

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FERNANDO JOSÉ DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PONTO DE ALIMENTAÇÃO EM UM TANQUE
COM IMPULSOR MECÂNICO VISANDO A MITIGAÇÃO DE CANAIS
PREFERENCIAL**

SANTOS/SP

2024

FERNANDO JOSÉ DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PONTO DE ALIMENTAÇÃO EM UM TANQUE
COM IMPULSOR MECÂNICO VISANDO A MITIGAÇÃO DE CANAIS
PREFERENCIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia, sob orientação de Tomas Angel del Valls Casillas e coorientação de Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa.

SANTOS/SP

2024

532.5
S58a

Silva, Fernando José dos Santos.

Análise experimental do ponto de alimentação em um tanque com impulsor mecânico visando a mitigação de canais preferencial / Fernando José dos Santos Silva.

2024.

51 f.

Orientador: Dr. Tomas Angel del Valls Casillas .

Coorientador: Dr. Vitor da Silva Rosa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de pós-graduação em Mestrado profissionalizante em engenharia mecânica, Santos, SP, 2024.

I. , Tomas Angel del Valls Casillas. II. Análise experimental do ponto de alimentação em um tanque com impulsor mecânico visando a mitigação de canais preferencial.

AUTORIZAÇÃO DE REPRODUÇÃO

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente à Deus que está acima de tudo o que há no mundo, aos meus pais, Dona Maria do Carmo e Sr. Arthur pela minha geração, criação e educação, possibilitando uma estrutura familiar e me conduzindo na minha vida como cidadão do mundo, pessoalmente, socialmente, profissionalmente e academicamente falando, onde sempre me direcionaram e apoiaram em minhas escolhas e conquistas na vida. Ao meu filho Igor, que assim como eu fui, que ele seja um bom cidadão em espelho aos seus avós e seus pais para uma boa convivência no mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Ao Professor Dr. Vitor da Silva Rosa pela orientação, assim como sua dedicação e competência acadêmica, somadas ao profissional no desenvolvimento do projeto e atividades envolvidas na pesquisa.

Ao Professor Dr. Deovaldo de Moraes Júnior coordenador do Laboratório de Operações Unitárias possibilitando um vasto desenvolvimento de atividades e experiências nos laboratórios ampliando o conhecimento dos seus estudantes.

Aos mestres das disciplinas cursadas no decorrer do curso; Profa. Dra. Dorotéia Vilanova Garcia, Profa. Dra. Marlene Silva de Moraes, Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior, Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa, Prof. Dr. Felipe Bertelli, Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco.

Aos técnicos de laboratório Volnei de Lemos, Álvaro Luiz Moreira Conrado e Irineu Penha da Ressureição pela colaboração na montagem, manutenção e assistência da unidade experimental no desenvolvimento da pesquisa.

Aos estagiários do laboratório, André Franzon, Andressa Dellanoce, Arthur Carvalho, Augusto Andrini, Barbara Tavares, Fabiana Barrella, Giovanna Galvão, Lucas Quintas, Maria Eduarda, Martina Olivia, Matheus Martins, Michelle Caribé, Paloma Santagata, Ricardo Veneziano, Sabrina Lima, Vitor Palmarin e Vitor Russo pela colaboração no desenvolvimento das atividades experimentais.

À secretaria de pós graduação *Stricto Sensu* nas pessoas de Sandra Helena Aparecida de Araújo e Imaculada Scorza pelo acolhimento, paciência e a dedicada atenção de sempre em nossas solicitações.

À Universidade Santa Cecília – UNISANTA pela possibilidade e oferta do programa de mestrado na área de atuação e de meu interesse, assim como toda a estrutura física das dependências, salas de aulas, bibliotecas e laboratórios de ensino.

RESUMO

Tanques agitados com impulsores mecânicos são amplamente utilizados em processos industriais, incluindo a produção de fertilizantes, combustíveis, antibióticos e polímeros. A eficiência desses tanques pode ser comprometida pela formação de canais preferenciais, resultantes da configuração dos pontos de alimentação e descarga, o que afeta a homogeneidade e a qualidade do produto final. Este estudo teve como objetivo investigar experimentalmente a influência de diferentes fatores operacionais, como tipo de impulsor, ponto de alimentação, vazão e rotação, sobre a formação de canais preferenciais e a eficiência de diluição em um tanque de agitação. Um tanque cilíndrico transparente com volume útil de 12,27 L foi equipado com dois tipos de impulsores (axial inclinado a 45° e radial tipo Rushton), dois pontos de alimentação, duas vazões (0,5 e 1,0 L/min) e quatro rotações (0, 100, 300 e 500 rpm). As análises foram realizadas com espectrofotômetro de luz visível para avaliar o tempo médio de residência (TMR) e a homogeneidade da solução. Os resultados destacaram que vazões elevadas (1,0 L/min), rotações altas (500 rpm) e o uso do impulsor radial minimizam o TMR e promovem maior homogeneidade. A posição do ponto de alimentação oposta à saída também mostrou ser mais eficiente na redução de zonas mortas. Este trabalho fornece uma base experimental sólida para otimizar processos de mistura e diluição em aplicações industriais.

Palavras-Chave: Ponto de alimentação, Tanque, Diluição, Espectrofotômetro, Processo de produção.

ABSTRACT

Mechanically agitated tanks are widely used in industrial processes, including the production of fertilizers, fuels, antibiotics, and polymers. The efficiency of these tanks can be compromised by the formation of preferential channels caused by the configuration of feed and discharge points, affecting homogeneity and the quality of the final product. This study aimed to experimentally investigate the influence of different operational factors, such as impeller type, feed point, flow rate, and rotation speed, on the formation of preferential channels and dilution efficiency in an agitated tank. A transparent cylindrical tank with a useful volume of 12.27 L was equipped with two types of impellers (axial inclined at 45° and radial Rushton type), two feed points, two flow rates (0.5 and 1.0 L/min), and four rotation speeds (0, 100, 300, and 500 rpm). Analyses were conducted using a visible light spectrophotometer to evaluate the mean residence time (MRT) and solution homogeneity. The results showed that higher flow rates (1.0 L/min), higher rotation speeds (500 rpm), and the use of a radial impeller minimized MRT and promoted greater homogeneity. The feed point opposite the outlet also proved to be more effective in reducing dead zones. This study provides a solid experimental basis for optimizing mixing and dilution processes in industrial applications.

Key Words: Feeding point, Tank, Dilution, Spectrophotometer, Production process.

Lista de Figuras

Figura 1 - Serpentinhas. (a) Helicoidal; e (b) Espiral.....	17
Figura 2 Equipamento para agitação e mistura (ROSA, 2017)	18
Figura 3 – Esquema com as relações geométricas de Rushton: 1) Parede do tanque; 2) Altura do nível do fluido; 3) Eixo do impulsor; 4) Chicana; 5) Impulsor mecânico radial tipo Rushton 6 pás planas. $S1 = Dt/Da = 3$; $S2 = E/Da = 1$; $S3 = L/Da = 14$; $S4 = W/Da = 15$; $S5 = J/Dt = 0,1$ e $S6 = H/Dt = 1$ (Moraes Júnior e Moraes, 2017).	19
Figura 4– Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade.....	20
Figura 5 – Vistas do fluxo de escoamento com o impelidor: (a) axial; e (b) radial (Cremasco, 2012).....	21
Figura 6– Tipos de impulsores mecânicos: (a) Marinho 3 pás; (b) Gamma superior 3 pás; (c) Rushton; (d) Axial inclinada 4 pás; (e) Radial plana 4 pás; (f) Smith; (g) Dente de Serra; (h) Ribbon 2 anéis; (i) Ancora; (j) Fluxo Duplo; (k) Tubo; e (l) Ancora “EK”.	22
Figura 7 – Impulsores mecânicos: (a) tipo ancora; e (b) Fluxo axial duplo.	23
Figura 8- Comparação da posição e geometria das chicanas: (A) Chicana Padrão; (B) Meia chicana; (C) Chicana afastada; (D) Chicana Angular (Nogueira, Gomez e Cekinski, 2015).....	23
Figura 9– Tanque de agitação de fluido: (a) com chicana; e (b) sem chicana, formação de vórtice (FOUST, 1982).	24
Figura 10 – Posicionamento dos pontos de alimentação do equipamento da pesquisa, vistas lateral e superior do tanque: (a) alinhado oposto a saída e (b) alinhado sobre a saída.	25
Figura 11 - Detalhes do tanque e dos pontos de alimentação de 1 a 4 (ASSIRELLI, et al, 2002).	26
Figura 12 – Tipos de traçador: (a) sal; (b) açúcar; (c) corantes artificiais; e (d) cloreto de lítio.....	27
Figura 13– (a) trocador de calor; apresentando canal preferencial; e (b) tanque de agitação e mistura; apresentando zonas mortas ou estagnadas. (1) Zonas estagnadas; (2) Canal preferencial; (3) Agitação ideal.....	28
Figura 14 Unidade experimental	29
Figura 15 Detalhes da parte superior da unidade experimental; 1) linha de entrada do sistema; 2) válvula de globo de entrada; 3) válvula de gaveta de entrada; 4) controladora do motor; 5) rotâmetro; 6) tubulação de alimentação do tanque posição sobre a saída; 7) motor elétrico; 8) suporte do motor; 9) impulsor axial; 10) tanque; 11) linha de saída do sistema; 12) válvula de globo de saída; 13) válvula de gaveta de saída; 14) canal de descarga do sistema	30
Figura 16 Detalhes da parte inferior da unidade experimental; 1) tanque pulmão do sistema; 2) bomba de alimentação; 3) linha de entrada; 4) válvula de gaveta da linha de drenagem; 5) linha de drenagem; 6) canal de saída do tanque; 7) mangueira da linha de descarga.	31
Figura 17 Tanque cilíndrico em acrílico transparente.....	31
Figura 18 Impulsores mecânicos: (a) radial Rushton; e (b) Axial 4 pás inclinadas à 45°	32
Figura 19 Detalhe da altura de 30mm da saída da tubulação no fundo do tanque. ...	32

Figura 20 Tubulação de entrada no tanque de agitação posição alinhado sobre a descarga montada na unidade.....	34
Figura 21 - Proteção da unidade experimental: (a) Tanque de agitação e (b) Tanque pulmão.	35
Figura 22 Soluções de concentração, solução mãe e gradiente das soluções diluídas.	36
Figura 23 Gráfico da determinação do comprimento de onda no espectrofotômetro.	37
Figura 24 Coleta na linha de saída do tanque.....	38
Figura 25 Cubetas no espectrofotômetro	39
Figura 26 Tanque em agitação com impulsor radial e ponto de alimentação sobre saída do tanque apresentando uma diluição homogênea no processo	40
Figura 27 Formação de canal preferencial.....	41
Figura 28 Formação de canal preferencial com variação de impulsor: a) Axial e b) Radial.....	42
Figura 29 Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados com os resultados da pesquisa	44
Figura 30 Gráfico de efeitos principais para TMR	45
Figura 31 Gráfico de Interação pra TMR.....	45
Figura 32 Gráfico de superfície	46
Figura 33 Gráfico de contorno do TMR versus Rotação e Vazão	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 Planejamento experimental dos ensaios no laboratório.	33
Tabela 2 - Relação de concentração das soluções e resultados da absorvância.	36
Tabela 3 Resumo dos Tempos Médios de Residência (TMR) Obtidos nos Ensaios	43

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVO	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 Planejamento experimental.....	29
4.2 Métodos.....	34
4.2.1 Preparação do Sistema Experimental.....	34
4.2.2 Preparo das Soluções e Calibração do Espectrofotômetro.....	35
4.2.3 Execução dos Ensaios	37
4.2.4 Análise das Amostras	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1 Introdução aos Resultados.....	40
5.2 Comportamento da Mistura.....	40
5.3 Formação de Canais Preferenciais.....	41
5.4 Análise Quantitativa dos Resultados.....	43
6 CONCLUSÃO.....	48
7 TRABALHOS FUTUROS.....	49
8 Referências Bibliográficas	50

1. INTRODUÇÃO

Os tanques de agitação desempenham um papel fundamental em diversos setores industriais, como químico, alimentício, farmacêutico, petroquímico e biotecnológico. Esses equipamentos são amplamente utilizados para processos como mistura de componentes, diluição de soluções, homogeneização de misturas e reações químicas, fundamentais para a fabricação de produtos como polímeros, antibióticos, detergentes, laticínios e tintas (McCabe, Smith e Harriot, 2005). A versatilidade desses tanques é notável, pois podem ser configurados como reatores, reservatórios ou unidades de agitação e mistura, atendendo a diferentes necessidades de processo.

Entre os parâmetros que determinam a eficiência desses equipamentos, o tempo de mistura ocupa uma posição central. Ele é definido como o intervalo necessário para que um fluido alcance um estado homogêneo dentro do tanque, garantindo a distribuição uniforme de componentes e reações químicas completas. A precisão na determinação do tempo de mistura é essencial para atender às especificações de qualidade do produto final e minimizar desperdícios ou custos desnecessários. Segundo Rushton, Costin e Everett (1950), o tempo de mistura é influenciado por variáveis como o tipo de impulsor, a geometria do tanque, a posição do ponto de alimentação, a vazão de entrada e a rotação do motor.

O comportamento do fluido durante o processo de mistura varia de acordo com suas propriedades reológicas. Fluidos newtonianos, como soluções aquosas de sacarose ou cloreto de sódio, apresentam viscosidade constante independente do gradiente de velocidade, enquanto fluidos não-newtonianos, como suspensões e emulsões viscosas, possuem uma relação mais complexa entre tensão de cisalhamento e deformação (Pakzad et al., 2013). Essa distinção tem impacto direto no tempo de mistura, pois fluidos não-newtonianos frequentemente requerem configurações específicas de impulsor e ajustes na rotação para garantir homogeneidade.

Outro aspecto relevante é a relação entre o tempo espacial e o tempo de residência. O tempo espacial é o período necessário para que o volume total de alimentação do tanque seja processado, enquanto o tempo médio de residência reflete o intervalo médio que uma partícula ou molécula passa dentro do sistema.

Botinha, Miranda e Vieira (2015) apontam que, para alcançar uma mistura ideal, o tempo médio de residência deve ser próximo ao tempo espacial. Diferenças significativas entre esses valores indicam problemas como canais preferenciais ou zonas mortas, que comprometem a eficiência do processo.

A avaliação do tempo de mistura também está relacionada à eficiência energética do sistema. Segundo Rosa et al. (2020), a relação geométrica entre tanque e impulsor deve ser otimizada para minimizar o consumo de energia, especialmente em tanques industriais de grande escala. Por exemplo, impulsor mecânicos radiais, como o tipo Rushton, direcionam o fluido para as paredes do tanque, enquanto impulsores axiais promovem o fluxo em direção ao fundo, influenciando diretamente o tempo necessário para alcançar a homogeneidade (Cremasco, 2012).

Apesar de sua importância, a determinação precisa do tempo de mistura em condições industriais é desafiadora devido à formação de canais preferenciais. Esses canais representam trajetórias privilegiadas no fluxo do fluido, evitando interações completas e criando zonas estagnadas no tanque (Moraes, 2017).

Estudos experimentais mostram que a posição do ponto de alimentação tem impacto direto na formação desses canais, destacando a necessidade de análises mais detalhadas sobre sua influência (Assirelli et al., 2002). Além disso, a utilização de chicanas pode mitigar a formação de vórtices, melhorando a eficiência do processo (Nogueira, Gomez e Cekinski, 2015).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Este estudo visou analisar experimentalmente a formação de canais preferenciais em um tanque com impulsor mecânico, avaliando a influência da variação do ponto de alimentação no desempenho do processo de diluição, utilizando análise espectroscópica como ferramenta principal.

2.2 Objetivos específicos

- a) Preparar soluções utilizando água e corante alimentício como traçador para os ensaios de diluição;
- b) Avaliar o impacto de diferentes rotações do motor do impulsor no desempenho da mistura;
- c) Comparar o desempenho de dois tipos de impulsores mecânicos: turbina axial de 4 pás inclinadas a 45° e radial Rushton de 6 pás;
- d) Estudar o efeito da variação da posição do ponto de alimentação sobre o processo de diluição;
- e) Monitorar a vazão de alimentação do solvente de forma constante;
- f) Determinar a eficiência de diluição em função do tempo por meio de análise espectroscópica no espectrofotômetro de luz visível.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização de tanques nos processos industriais considera características essenciais, como o dimensionamento para atender à demanda de produção, o material de construção em relação às matérias-primas e reações químicas, e as especificações das entradas e saídas de fluxo. A necessidade de controle térmico durante o processo também é um fator determinante para a qualidade do produto final.

Em processos que exigem controle de temperatura, é comum a instalação de serpentinas no tanque para promover trocas térmicas, sejam exotérmicas ou endotérmicas. Essas serpentinas podem apresentar diversas geometrias, como redondas, quadradas ou retangulares, e conduzem fluidos específicos, como gases refrigerantes ou água em diferentes temperaturas, para aquecer ou resfriar a mistura. A escolha do material, como aço inoxidável, cobre, alumínio ou latão, deve considerar a compatibilidade química com a mistura processada, evitando reações indesejadas e danos ao equipamento.

Algumas serpentinas possuem resistências elétricas internas para aquecimento, possibilitando a transferência térmica por indução, sendo aplicáveis apenas em processos que requerem aumento de temperatura. Segundo Rosa et al. (2017), a principal vantagem desses acessórios, além de sua eficácia em reações específicas, é o baixo custo de implementação frente aos resultados obtidos.

Na Figura 1 estão apresentados exemplos de serpentinas utilizadas em processos industriais, que atuam como trocadores de calor para controle térmico de produtos.



(a)

(b)

Figura 1 - Serpentinhas. (a) Helicoidal; e (b) Espiral.

Na Figura 2, está representada um esquema com os elementos de construção de um equipamento para agitação e misturas utilizado na indústria.

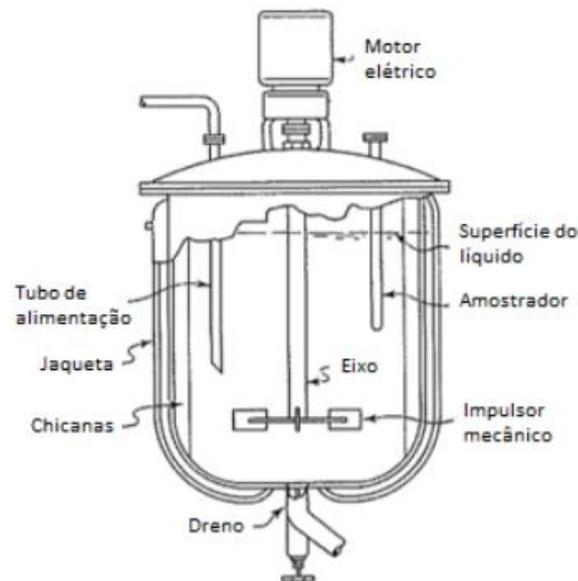


Figura 2 Equipamento para agitação e mistura (ROSA, 2017)

No processo de agitação e mistura, um motor elétrico aciona o eixo do impulsor dentro do tanque. O consumo de potência é um parâmetro crucial no dimensionamento do equipamento, sendo essencial para a correta seleção de um motor que atenda às demandas do processo. Aspectos como o tipo de impulsor, as dimensões do tanque e a reologia do fluido são fatores determinantes nesse contexto (Paul e Atiemo-Ubeng, 2004).

A agitação consiste na movimentação do fluido dentro do tanque, geralmente em uma única fase, com o objetivo de homogeneizar ou manter o material em movimento. Já a mistura envolve a interação de múltiplas fases, como líquido + sólido ou líquido + gás, promovendo reações ou a integração completa dos componentes. Em algumas situações, pode ser necessário um processo adicional de agitação após a reação, por exemplo, para homogeneizar misturas que sofreram decantação de partículas sólidas.

Em indústrias com altas demandas de produção, tanques de grandes dimensões ou múltiplos equipamentos são frequentemente utilizados para atender à capacidade requerida. A ampliação de escala entre tanques é uma prática comum para ajustar a produção às necessidades dos clientes. Rosa et al. (2020) validaram

modelos de previsão para ampliação de escala, desde que a geometria padrão dos tanques seja mantida.

Na figura 2 estão apresentadas as correlações geométricas propostas por Rushton, Costin e Everett (1950) para o tanque, as chicanas e o impulsor. Esse estudo demonstrou a relação ideal entre o consumo de potência do motor e a eficiência da mistura, sendo uma abordagem amplamente utilizada na indústria devido à sua eficácia em processos produtivos.

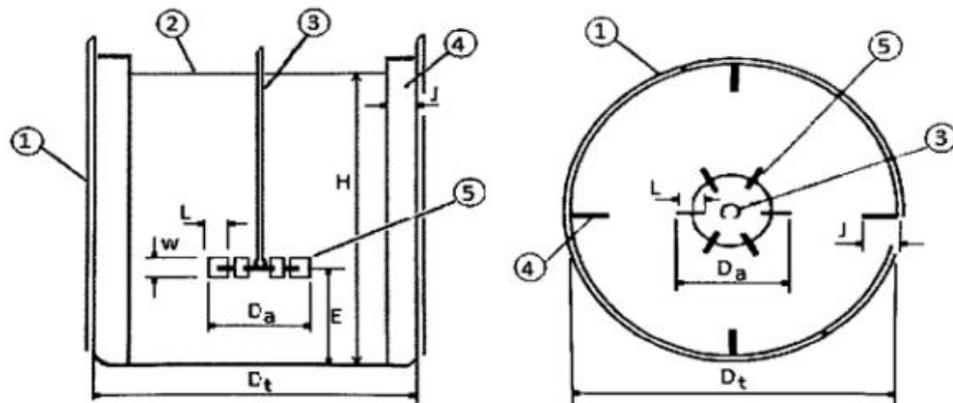


Figura 3 – Esquema com as relações geométricas de Rushton: 1) Parede do tanque; 2) Altura do nível do fluido; 3) Eixo do impulsor; 4) Chicana; 5) Impulsor mecânico radial tipo Rushton 6 pás planas. $S1 = Dt/Da = 3$; $S2 = E/Da = 1$; $S3 = L/Da = 14$; $S4 = W/Da = 15$; $S5 = J/Dt = 0,1$ e $S6 = H/Dt = 1$ (Moraes Júnior e Moraes, 2017).

As dimensões do tanque e dos componentes do sistema de agitação são descritas pelos seguintes parâmetros: D_t , que representa o diâmetro interno do tanque; D_a , que corresponde ao diâmetro do impulsor; H , que indica a altura do nível do tanque; J , que se refere à largura da chicana; E , que é a distância entre o impulsor e o fundo do tanque; W , que representa a altura das pás do impulsor; e L , que é a largura das pás do impulsor.

Em processos industriais de mistura ou agitação em tanques, os fluidos utilizados apresentam propriedades específicas, sendo classificados em newtonianos e não-newtonianos. O estudo do comportamento desses fluidos, conhecido como reologia, analisa como eles se deformam e fluem quando submetidos a tensões em condições termodinâmicas controladas.

Fluidos newtonianos possuem viscosidade dinâmica constante, ou seja, independente da taxa de deformação ou do gradiente de velocidade, sob uma dada pressão e temperatura. Esse comportamento é descrito pela Lei de Newton, conforme a equação apresentada no estudo. Exemplos típicos de fluidos newtonianos incluem

soluções aquosas de sacarose ou cloreto de sódio, que apresentam uma resposta linear e previsível às forças aplicadas.

Por outro lado, fluidos não-newtonianos exibem uma viscosidade que varia em função do gradiente de velocidade, mesmo sob condições fixas de pressão e temperatura. Isso significa que sua resposta à aplicação de tensões é mais complexa, sendo representada por curvas características em vez de uma relação linear. Fluidos como géis e suspensões viscosas exemplificam esse comportamento devido à sua aparência gelatinosa e maior resistência ao fluxo.

A Figura 4 ilustra a diferença entre a tensão de cisalhamento para fluidos newtonianos e não-newtonianos. Os fluidos newtonianos seguem uma relação linear, formando uma reta no gráfico, enquanto os fluidos não-newtonianos apresentam uma curva característica, destacando a dependência da viscosidade em relação à taxa de deformação. Essas distinções são fundamentais para o projeto e a operação eficiente de processos industriais que envolvem misturas ou agitações.

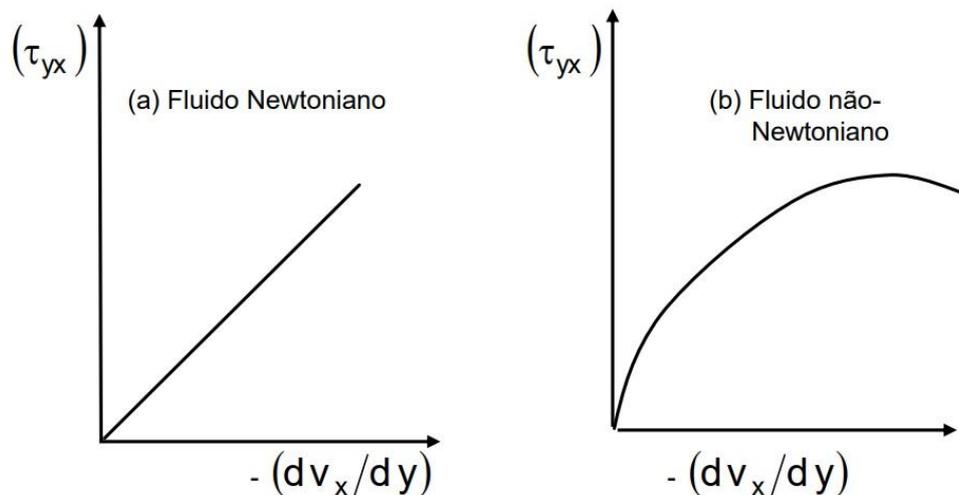


Figura 4– Tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade.

Estudos reológicos realizados por Bailey e Weir (1998) demonstraram variações significativas na precisão dos resultados da modelagem de fluidos não-newtonianos ao utilizar métodos convencionais com viscosímetros rotacionais. Os autores concluíram que é essencial seguir recomendações específicas para obter resultados mais precisos para cada fluido analisado.

Em processos de mistura e agitação, o comportamento reológico dos fluidos, sejam eles newtonianos ou não-newtonianos, é um fator crucial. A variação na rotação

do motor influencia o consumo de potência e, conseqüentemente, a seleção adequada do impulsor e o controle da rotação, impactando diretamente a eficiência da reação, a qualidade do produto final e o custo agregado (Pakzad et al., 2013).

O impulsor mecânico, ou impelidor, é composto por um eixo cilíndrico com pás na extremidade, cuja configuração varia de acordo com a aplicação e o efeito desejado na mistura. Conectado ao motor elétrico, o impulsor é responsável por movimentar o fluido no tanque, promovendo agitação ou mistura para alcançar os resultados esperados.

A relação geométrica entre o tanque e o impulsor deve ser adequadamente projetada, considerando o comportamento do fluido e seus efeitos fluidodinâmicos. A movimentação gerada pelas pás pode produzir um fluxo radial, direcionando o fluido para as paredes do tanque, ou um fluxo axial, conduzindo-o para o fundo (Cremasco, 2012).

A Figura 5 apresenta as linhas de fluxo e o comportamento do fluido dentro do tanque com diferentes modelos de impulsores.

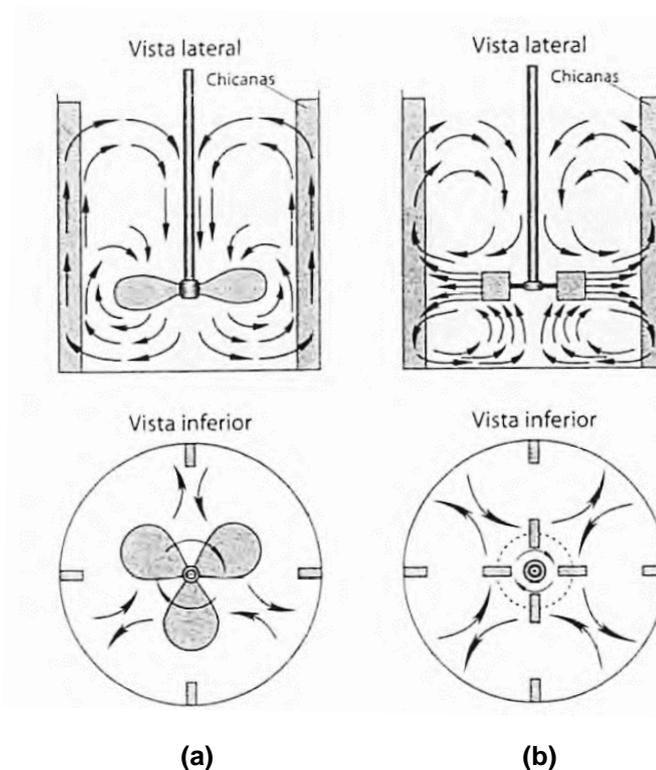


Figura 5 – Vistas do fluxo de escoamento com o impelidor: (a) axial; e (b) radial (Cremasco, 2012).

O tipo de impulsor mecânico utilizado em processos de agitação ou mistura está diretamente relacionado ao efeito desejado no fluido, seja para promover a homogeneização ou para alcançar uma reação química específica. A escolha do modelo de impulsor é essencial para garantir o melhor resultado ao final do processamento, influenciando diretamente a qualidade e eficiência do produto final.

Na Figura 6, são apresentados alguns modelos de impulsores mecânicos amplamente utilizados em equipamentos industriais durante os processos de produção.

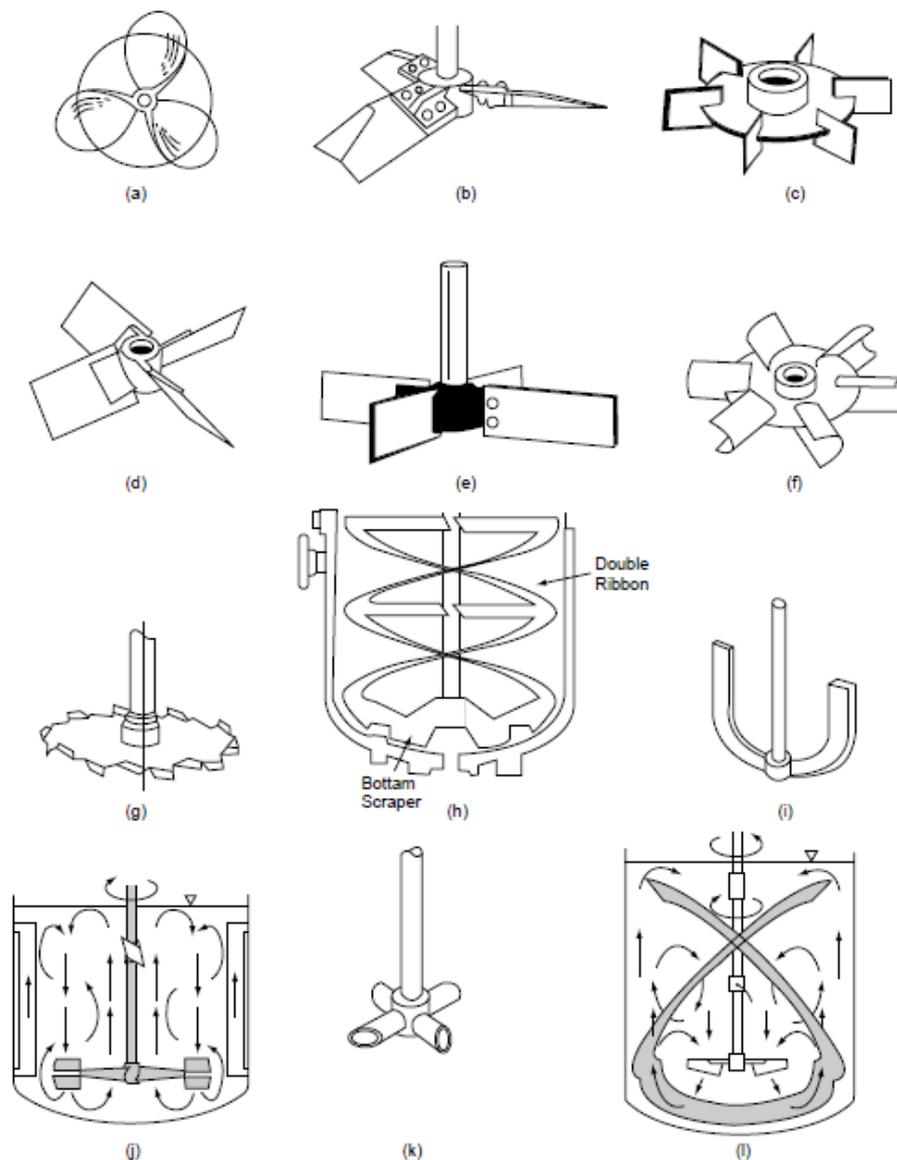


Figura 6– Tipos de impulsores mecânicos: (a) Marinho 3 pás; (b) Gamma superior 3 pás; (c) Rushton; (d) Axial inclinada 4 pás; (e) Radial plana 4 pás; (f) Smith; (g) Dente de Serra; (h) Ribbon 2 anéis; (i) Ancora; (j) Fluxo Duplo; (k) Tubo; e (l) Ancora “EK”.

A Figura 7 apresenta diferentes tipos de impulsores mecânicos comumente aplicados em tanques industriais.



Figura 7 – Impulsores mecânicos: (a) tipo ancora; e (b) Fluxo axial duplo.

As chicanas são acessórios instalados nos tanques para reduzir ou controlar a formação de vórtices gerados pelo movimento do impulsor no fluido. Geralmente compostas por 4 ou 2 defletores, também podem ser encontradas com 1 ou 3 defletores, dependendo da aplicação e das características do processo.

A Figura 8 ilustra diferentes modelos e configurações de chicanas, além de sua aplicação em tanques utilizados para agitação e mistura.

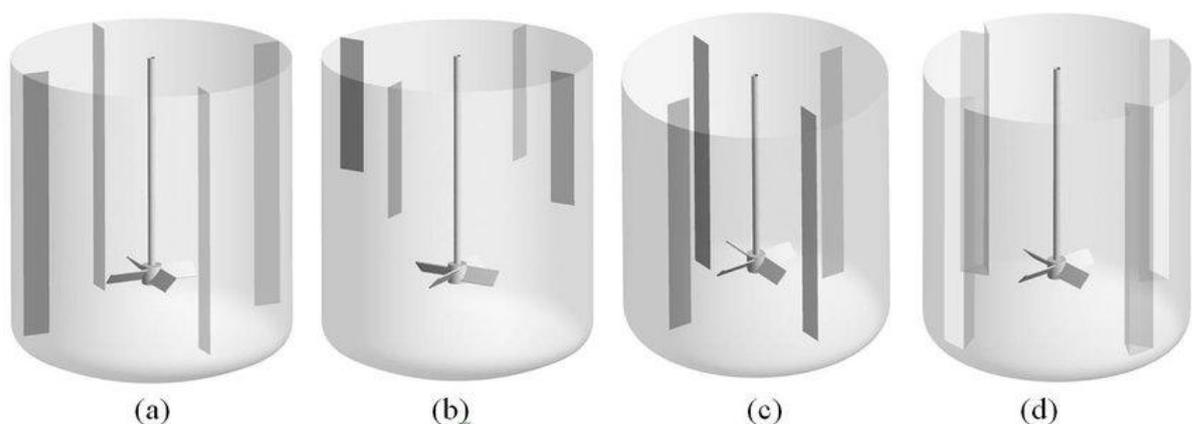


Figura 8- Comparação da posição e geometria das chicanas: (A) Chicana Padrão; (B) Meia chicana; (C) Chicana afastada; (D) Chicana Angular (Nogueira, Gomez e Cekinski, 2015).

O posicionamento, o tamanho e a geometria das chicanas podem ser ajustados durante o projeto de dimensionamento, dependendo do efeito desejado no processo. Em muitos casos, a formação de vórtices no fluido prejudica as reações químicas ou físicas entre as matérias-primas, tornando indispensável o uso de chicanas para minimizar e controlar esse fenômeno durante a agitação ou mistura.

A Figura 9 ilustra o comportamento do fluido dentro do tanque, destacando a diferença entre as condições com e sem chicanas, evidenciando o turbilhonamento e a formação de vórtices na ausência desses acessórios.

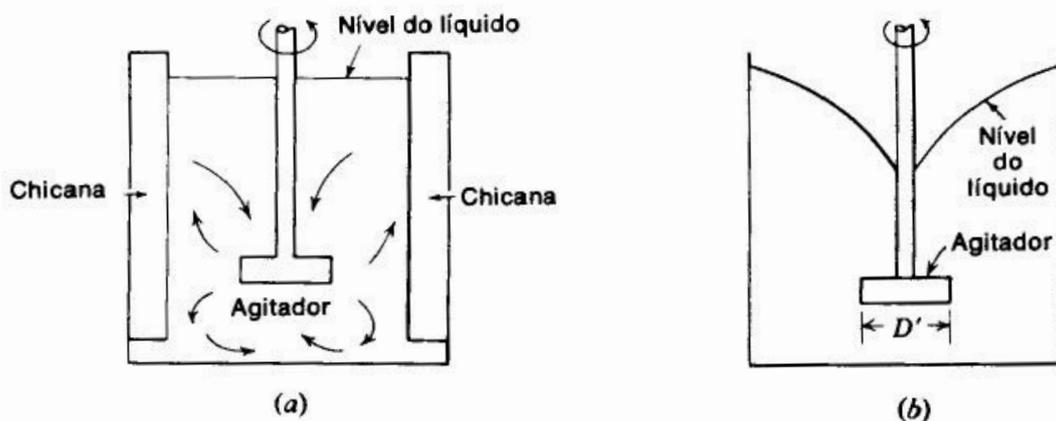


Figura 9– Tanque de agitação de fluido: (a) com chicana; e (b) sem chicana, formação de vórtice (FOUST, 1982).

Quando o impulsor está instalado no centro do tanque, o aumento da velocidade de rotação gera um fluxo circular tangencial, resultando na formação de um vórtice no centro do tanque. Em altas velocidades, esse efeito pode expor o impulsor, causando aeração na mistura e comprometendo a eficiência do processo.

Esse fenômeno pode levar a uma mistura incompleta, provocando a estratificação dos componentes. No caso de misturas contendo sólidos, há o risco de acúmulo de partículas sob o impulsor, em vez de promover sua dispersão uniforme.

No contexto de agitação e mistura, o ponto de alimentação pode ser ajustado de acordo com o efeito desejado e as características do equipamento disponível, garantindo maior controle sobre o processo, conforme observado na Figura 10.

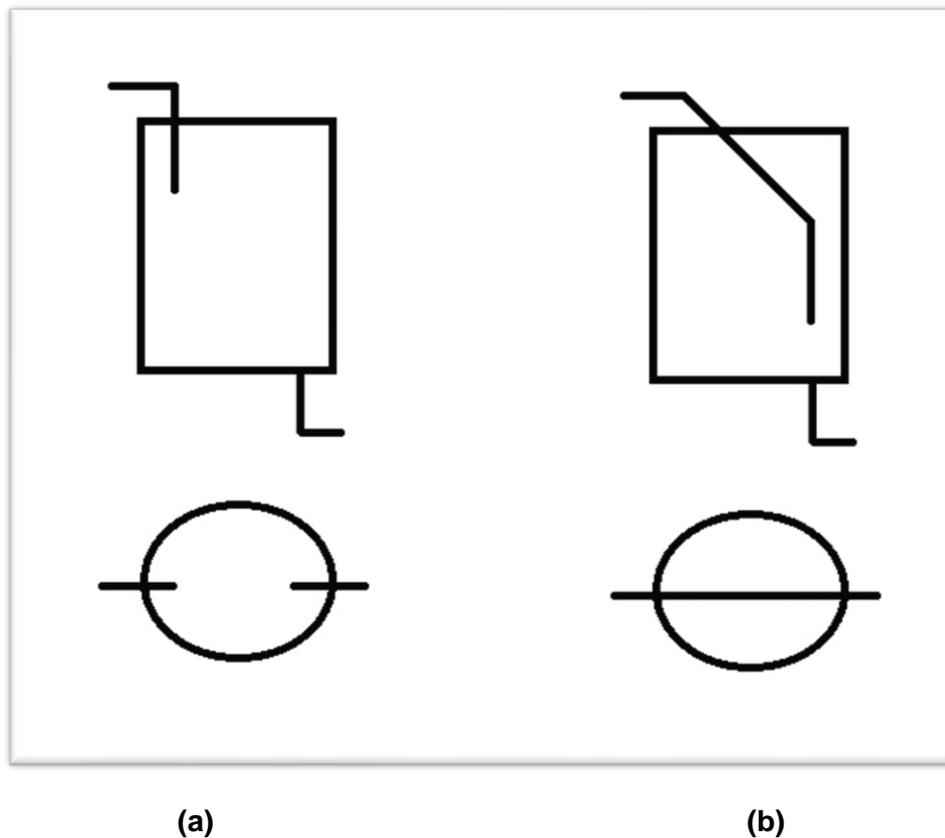


Figura 10 – Posicionamento dos pontos de alimentação do equipamento da pesquisa, vistas lateral e superior do tanque: (a) alinhado oposto a saída e (b) alinhado sobre a saída.

Um estudo realizado por Assirelli et al. (2002) validou experimentalmente a influência de quatro diferentes pontos de alimentação no desempenho das reações em tanques de agitação. Os resultados indicaram que a posição sobre o vórtice de arrasto gerado pelo impulsor apresentou maior eficiência, sendo comparados a outros estudos da literatura que incluíram a avaliação de dois novos modelos de impulsores desenvolvidos. A Figura 11 apresenta, de forma esquemática, os pontos de alimentação analisados nos ensaios experimentais.

A variação do ponto de alimentação é um fator relevante para otimizar o desempenho do processo de agitação e mistura, promovendo melhores resultados nas reações desejadas.

O tempo de residência está diretamente associado à concentração da solução durante o processo. Quando a concentração atinge 50% do valor inicial, o intervalo desde o início até esse ponto é definido como o tempo médio de residência da mistura, um parâmetro importante para avaliar a eficiência do processo.

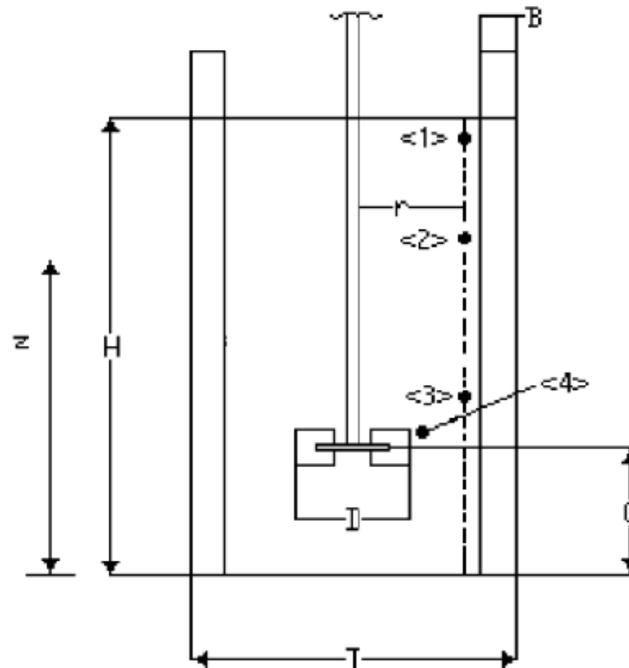


Figura 11 - Detalhes do tanque e dos pontos de alimentação de 1 a 4 (ASSIRELLI, et al, 2002).

O tempo médio de residência é um parâmetro fundamental em operações com tanques, sendo ideal quando seus valores estão próximos ao tempo espacial do processo, conforme apontado por Botinha, Miranda e Vieira (2015). O tempo espacial, por sua vez, é definido como o tempo necessário para processar completamente o volume total do tanque, equivalente ao volume de entrada da alimentação durante a diluição.

O comportamento fluidodinâmico em um processo pode ser analisado por meio da Distribuição de Tempo de Residência (DTR), um método descrito por Fogler (2009). Nesse método, um traçador é adicionado ao sistema e sua concentração é monitorada ao longo do tempo, avaliando a diluição no interior do tanque. Considera-se um processo ideal quando o tempo de residência coincide com o tempo médio de distribuição do DTR.

Traçadores são substâncias introduzidas na mistura para observar o comportamento do fluido ou reações durante análises experimentais. Eles podem ser naturais, como compostos provenientes de plantas, animais ou isótopos ambientais, ou artificiais, como sais, pigmentos e compostos orgânicos ou inorgânicos (Silva et al., 2009).

A escolha do traçador depende de fatores como custo, precisão, facilidade de mensuração, periculosidade, manuseio e versatilidade. Entre os mais utilizados estão sacarose, sal (cloreto de sódio) e corantes alimentícios, que podem ser diluídos em água para formar soluções aquosas conforme a concentração desejada. A Figura 12 ilustra exemplos de traçadores comumente utilizados em processos industriais.



Figura 12 – Tipos de traçador: (a) sal; (b) açúcar; (c) corantes artificiais; e (d) cloreto de lítio.

O termo "canal preferencial" refere-se a um fenômeno observado em processos ou equipamentos, no qual o fluido segue um trajeto específico e preferencial, criando um "vício" no fluxo. Essa característica pode ser prejudicial em determinados equipamentos, reduzindo a eficiência operacional e comprometendo os resultados esperados do processo, além de influenciar negativamente na manutenção do equipamento.

A formação de canais preferenciais também está associada à presença de zonas mortas, áreas do equipamento onde o fluido não circula, tornando essas regiões inutilizadas no processo. A Figura 13 ilustra um exemplo desse fenômeno, destacando as zonas mortas e seus impactos no desempenho do equipamento.

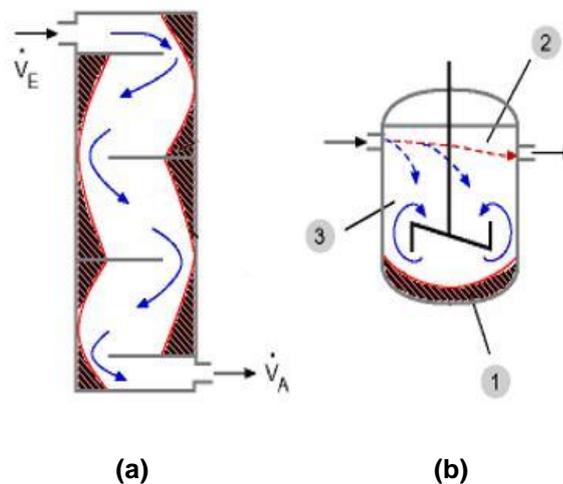


Figura 13– (a) trocador de calor; apresentando canal preferencial; e (b) tanque de agitação e mistura; apresentando zonas mortas ou estagnadas. (1) Zonas estagnadas; (2) Canal preferencial; (3) Agitação ideal.

A formação de canais preferenciais ocorre principalmente quando o fluido, como no caso de um fluxo líquido ascendente, busca percorrer o menor trajeto entre o ponto de entrada no equipamento e a saída ao final do processo. Esse fenômeno pode ser previsto ao comparar o tempo real do processo com o tempo espacial. Se o tempo espacial for maior que o tempo real, a formação de canais preferenciais está presente. Por outro lado, quando o tempo real excede o tempo espacial, ocorrem zonas mortas ou estagnadas (Moraes, 2017).

A ausência de fluido nas zonas mortas pode resultar em reações químicas indesejadas, causando corrosão, formação de bolsões de ar e deterioração do equipamento, além de possíveis contaminações no produto final. Essas ocorrências comprometem a eficiência e a durabilidade do equipamento, aumentando os custos de manutenção preventiva e corretiva e afetando os resultados esperados do processo.

Para minimizar a formação de canais preferenciais, é essencial utilizar equipamentos adequadamente dimensionados, considerando a configuração entre os pontos de alimentação e descarga do fluido. Essa abordagem permite otimizar o processo, melhorar a reação ou mistura do produto final e preservar a integridade do equipamento, reduzindo custos e garantindo melhores resultados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Planejamento experimental

O planejamento experimental foi concebido para investigar a influência de diferentes configurações operacionais no desempenho de mistura em um tanque de agitação equipado com impulsores mecânicos. O foco principal foi compreender como parâmetros-chave, como o tipo de impulsor, a posição do ponto de alimentação, a vazão de entrada e a rotação do impulsor, afetam a formação de canais preferenciais e a eficiência do processo de diluição. A abordagem adotada buscou garantir uma análise rigorosa, estabelecendo variáveis de controle e de resposta que permitissem avaliar as condições operacionais de forma detalhada e comparativa.

A unidade experimental foi projetada em função das correlações geométricas propostas por Rushton. O tanque principal, elemento central do sistema, possui uma geometria cilíndrica e é construído em acrílico transparente, o que permite a observação visual em tempo real dos fenômenos internos, como o comportamento dos fluxos e a dispersão dos fluidos. O volume útil do tanque, de 12,27 litros, foi cuidadosamente dimensionado para atender aos requisitos dos ensaios, permitindo variações controladas nos fatores experimentais.

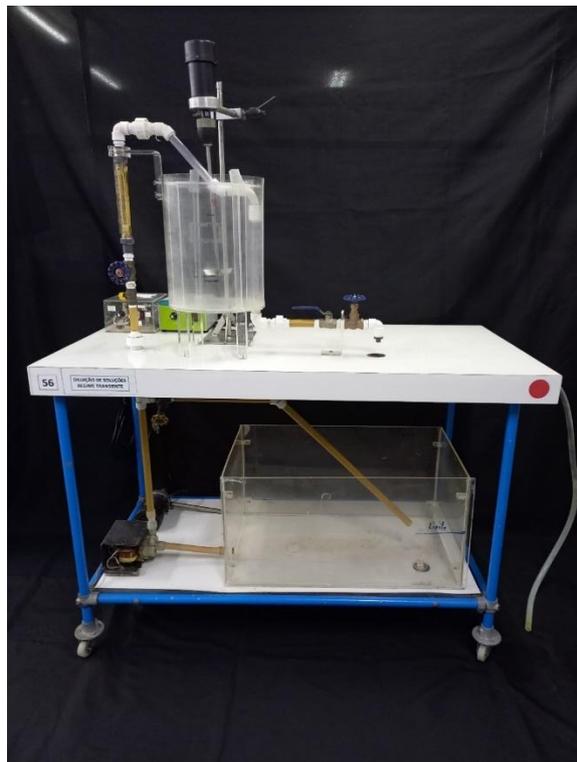


Figura 14 Unidade experimental

O tanque está montado sobre uma estrutura metálica tubular equipada com rodízios, o que facilita sua movimentação e instalação no laboratório. Essa estrutura oferece estabilidade durante os ensaios e foi projetada para acomodar os demais componentes do sistema, como válvulas, rotâmetro e bomba de alimentação. A configuração geral da unidade experimental é apresentada na Figura 14, destacando a integração de seus elementos e a funcionalidade do conjunto.

Os componentes principais do sistema são apresentados com mais detalhes nas Figuras 15 e 16, que destacam os elementos localizados nas partes superior e inferior da unidade experimental, respectivamente.

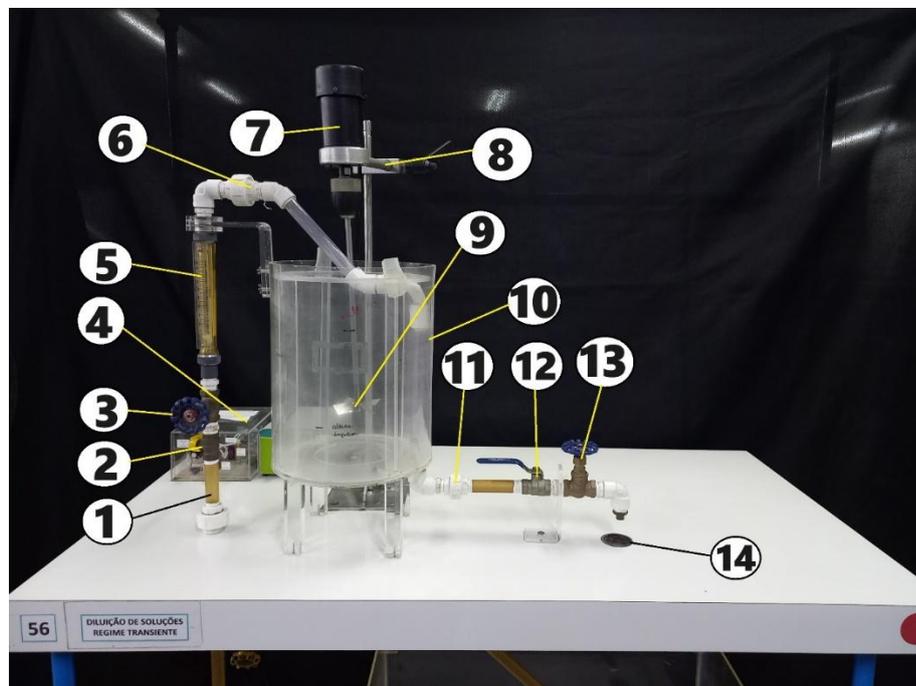


Figura 15 Detalhes da parte superior da unidade experimental; 1) linha de entrada do sistema; 2) válvula de globo de entrada; 3) válvula de gaveta de entrada; 4) controladora do motor; 5) rotâmetro; 6) tubulação de alimentação do tanque posição sobre a saída; 7) motor elétrico; 8) suporte do motor; 9) impulsor axial; 10) tanque; 11) linha de saída do sistema; 12) válvula de globo de saída; 13) válvula de gaveta de saída; 14) canal de descarga do sistema

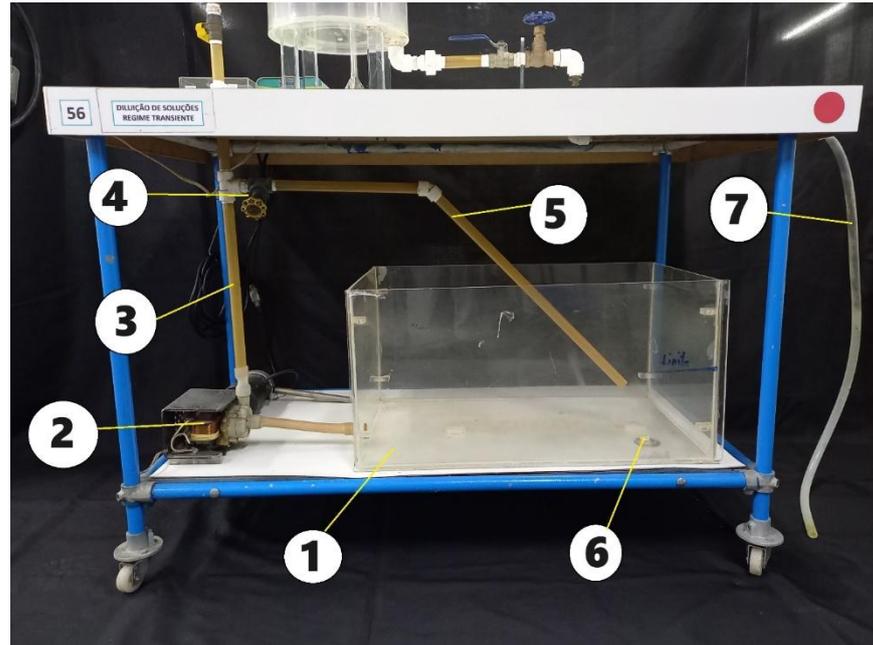


Figura 16 Detalhes da parte inferior da unidade experimental; 1) tanque pulmão do sistema; 2) bomba de alimentação; 3) linha de entrada; 4) válvula de gaveta da linha de drenagem; 5) linha de drenagem; 6) canal de saída do tanque; 7) mangueira da linha de descarga.

O tanque principal, representado na Figura 17, é construído em acrílico incolor para permitir a observação direta do comportamento do fluido durante os ensaios.

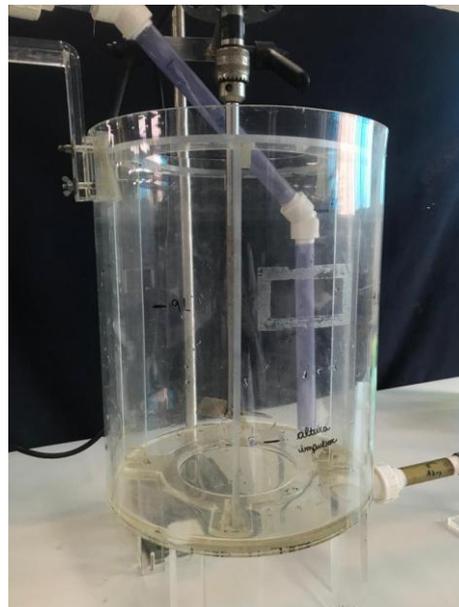


Figura 17 Tanque cilíndrico em acrílico transparente

A investigação experimental foi estruturada com base em um delineamento fatorial completo, considerando os seguintes fatores: dois tipos de impulsos

mecânicos, sendo um axial com 4 pás inclinadas a 45° e outro radial com 6 pás do tipo Rushton, conforme ilustrado na Figura 18; dois pontos de alimentação, um alinhado sobre a descarga a 30 mm acima do fundo do tanque (Figura 19) e outro oposto à saída, localizado a 160 mm acima do fundo (Figura 20); duas vazões de alimentação, de 0,5 L/min e 1,0 L/min; e quatro velocidades de rotação do impulsor, definidas em 0, 100, 300 e 500 rpm.

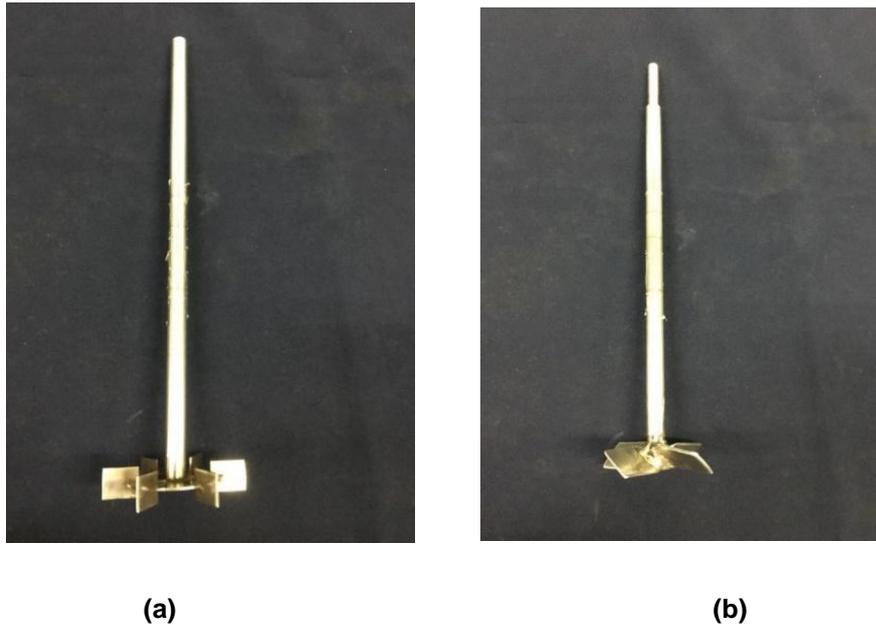


Figura 18 Impulsores mecânicos: (a) radial Rushton; e (b) Axial 4 pás inclinadas à 45°

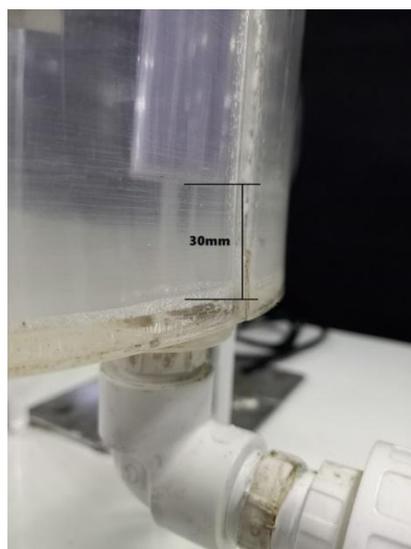


Figura 19 Detalhe da altura de 30mm da saída da tubulação no fundo do tanque.

Essas combinações resultaram em um total de 32 configurações experimentais, detalhadas no Tabela 1. Adicionalmente, cada configuração foi replicada em duplicata, totalizando 64 ensaios efetivos.

Tabela 1 Planejamento experimental dos ensaios no laboratório.

Impulsor mecânico	Ponto de alimentação	Vazão (Lpm)	Rotação (rpm)
Axial 4 pás inclinada a 45°	Alinhado sobre a Descarga do tanque	0,5	0
			100
			300
			500
		1	0
			100
			300
			500
	Oposto a descarga do tanque	0,5	0
			100
			300
			500
1		0	
		100	
		300	
		500	
Radial 6 pás padrão Rushton	Alinhado sobre a Descarga do tanque	0,5	0
			100
			300
			500
		1	0
			100
			300
			500
	Oposto a descarga do tanque	0,5	0
			100
			300
			500
1		0	
		100	
		300	
		500	

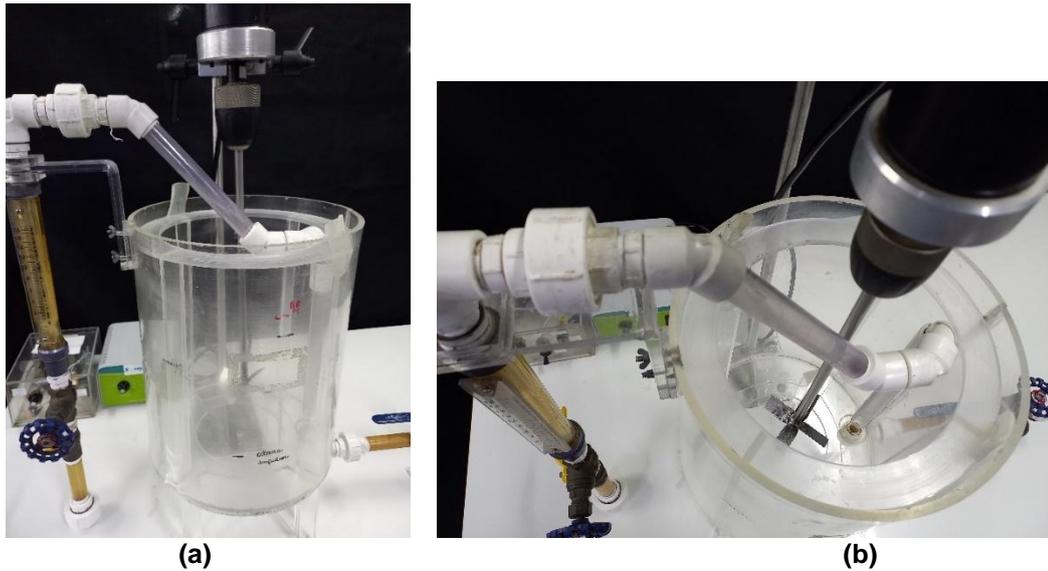


Figura 20 Tubulação de entrada no tanque de agitação posição alinhado sobre a descarga montada na unidade.

4.2 Métodos

Os métodos utilizados no estudo foram estruturados de forma a garantir a realização de ensaios sistemáticos e reproduzíveis para avaliar a eficiência de mistura em diferentes configurações operacionais do tanque de agitação. Essa seção descreve os procedimentos adotados desde a preparação inicial dos equipamentos e soluções até a coleta e análise das amostras.

4.2.1 Preparação do Sistema Experimental

Antes do início dos ensaios, foi realizada uma inspeção completa da unidade experimental para verificar as condições dos equipamentos e assegurar sua limpeza. O tanque de agitação e o tanque pulmão foram lavados com água destilada, e as bordas superiores de ambos receberam proteção com filme plástico para evitar contaminações externas, como partículas de poeira e detritos, que poderiam interferir nas medições espectroscópicas.

A Figura 21 apresenta o sistema protegido e pronto para os ensaios.

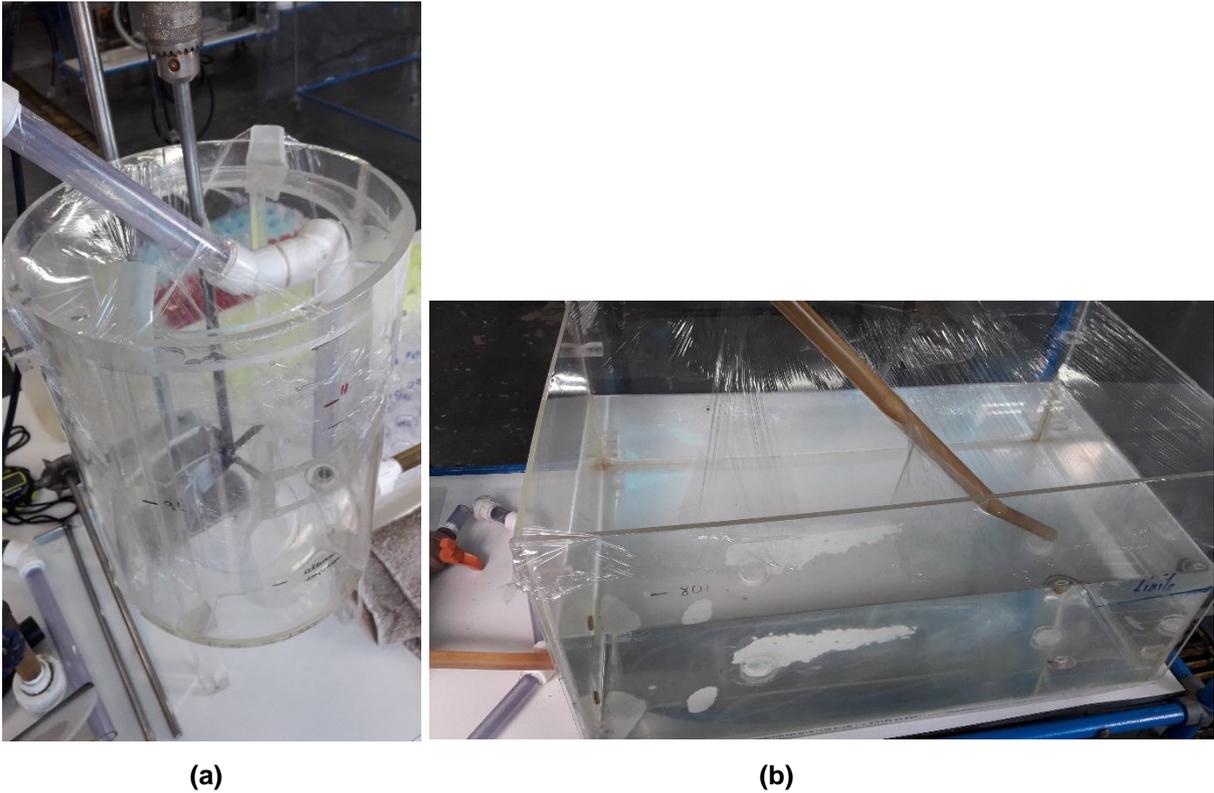


Figura 21 - Proteção da unidade experimental: (a) Tanque de agitação e (b) Tanque pulmão.

O tanque de agitação foi abastecido com 12,27 litros de água destilada, correspondentes ao seu volume útil. O tanque pulmão, responsável por alimentar o sistema durante os ensaios, foi preenchido com 80 litros de água destilada para garantir o abastecimento contínuo.

A bomba de alimentação foi configurada para operar em regime de fluxo contínuo, enquanto válvulas de gaveta e de globo foram ajustadas para equilibrar as vazões de entrada e saída, mantendo o nível do fluido constante no tanque de agitação.

4.2.2 Preparo das Soluções e Calibração do Espectrofotômetro

A solução utilizada nos ensaios foi preparada com corante alimentício azul como soluto e água destilada como solvente. Para a calibração inicial, 3 mL de corante foram diluídos em 1 litro de água, gerando a solução-mãe. Em seguida, foram preparadas soluções com concentrações gradativamente menores, conforme descrito na Tabela 2, para construir a curva padrão de concentração e absorvância.

Tabela 2 - Relação de concentração das soluções e resultados da absorbância.

Solução	Volume Solução Mãe (ml)	Concentração Solução Mãe	Absorbância	Observação
Mae	1000	1,00	2,746	3ml de corante em 1 litro solvente
3:1	75	0,75	2,146	75 ml solução mãe 25 ml solvente
1:1	50	0,50	1,488	50 ml solução mãe 50 ml solvente
1:3	25	0,25	0,752	25 ml solução mãe 75 ml solvente
1:9	10	0,10	0,292	10 ml solução mãe 90 ml solvente
1:19	5	0,05	0,151	5 ml solução mãe 95 ml solvente
Branco	0	0,00	0,000	0 ml solução mãe 100 ml solvente

A Figura 22 ilustra as diferentes soluções preparadas.

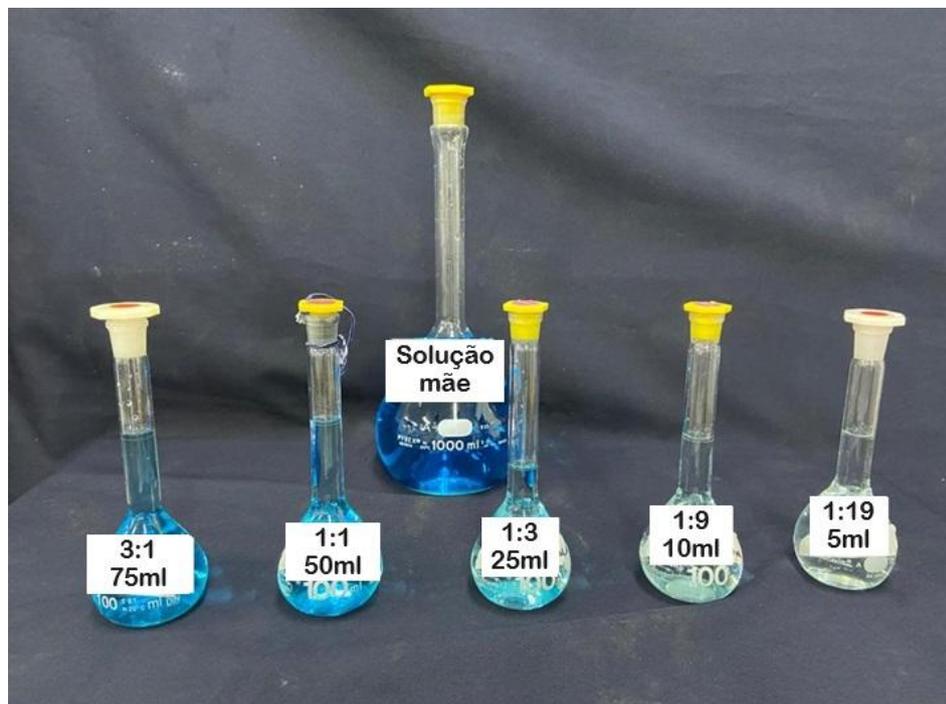


Figura 22 Soluções de concentração, solução mãe e gradiente das soluções diluídas.

O espectrofotômetro foi calibrado de acordo com as orientações do fabricante. Inicialmente, cubetas de referência foram preenchidas com água destilada para ajustar o branco (0% de absorvância e 100% de transmitância). Cubetas escuras foram utilizadas para estabelecer o ponto de absorvância máxima.

O comprimento de onda ideal para as análises foi definido como 640 nm. Essa escolha foi baseada no gráfico apresentado na Figura 23, que mostra a relação entre comprimento de onda e absorvância, destacando o ponto de maior precisão para a realização das medições.

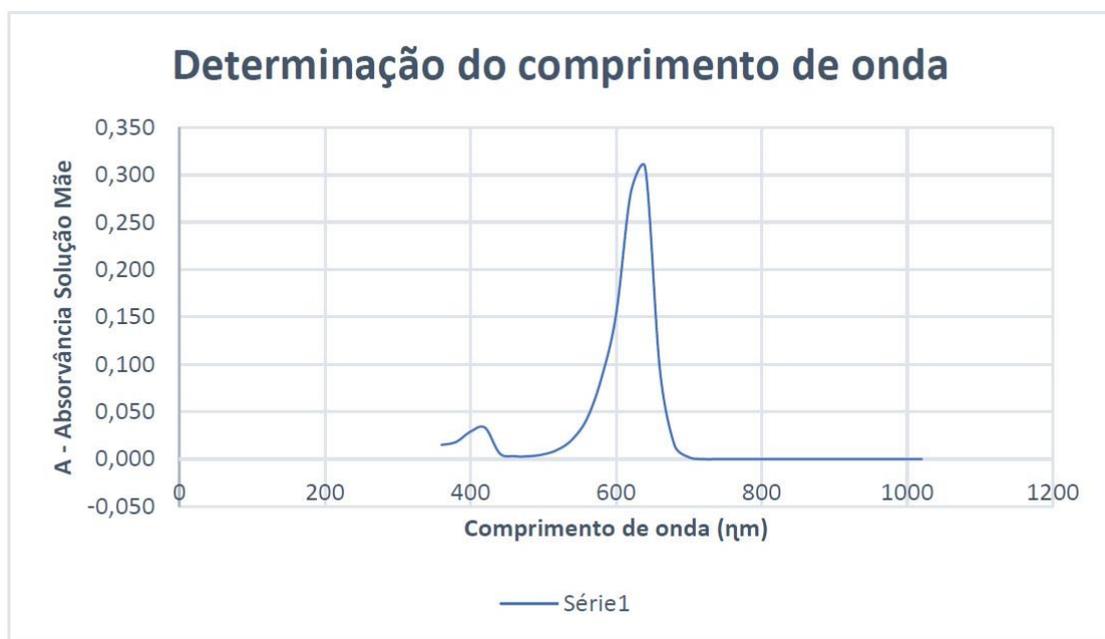


Figura 23 Gráfico da determinação do comprimento de onda no espectrofotômetro.

4.2.3 Execução dos Ensaio

Cada ensaio começou com o acionamento do motor do impulsor mecânico e da bomba de alimentação. O impulsor foi ajustado para uma das quatro velocidades previstas no planejamento experimental (0, 100, 300 ou 500 rpm), enquanto a vazão de alimentação foi mantida em 0,5 L/min ou 1,0 L/min, dependendo da configuração. As posições dos pontos de alimentação (alinhado sobre a descarga ou oposto à saída) foram ajustadas previamente.

O início de cada ensaio foi marcado pela coleta da amostra inicial (C_0) diretamente do tanque. A partir desse ponto, amostras foram coletadas na linha de

saída em intervalos específicos: a cada 10 segundos durante os primeiros 1200 segundos, a cada 30 segundos entre 1230 e 3000 segundos, e a cada 60 segundos entre 3060 e 5100 segundos. Cada amostra foi identificada e armazenada em recipientes de 50 mL para posterior análise no espectrofotômetro.

A Figura 24 mostra o procedimento de coleta na saída do tanque.



Figura 24 Coleta na linha de saída do tanque

4.2.4 Análise das Amostras

As amostras coletadas foram analisadas no espectrofotômetro de luz visível, conforme os parâmetros estabelecidos durante a calibração. Antes de cada medição, as cubetas foram ambientadas com as respectivas soluções, minimizando interferências. A absorbância de cada amostra foi registrada e comparada com a solução inicial (C_0) para calcular a eficiência de diluição ao longo do tempo. A Figura 25 apresenta as cubetas posicionadas no espectrofotômetro.



Figura 25 Cubetas no espectrofotômetro

Com base nos dados coletados, foram gerados gráficos representando a relação entre concentração e tempo, permitindo avaliar o comportamento do fluido em diferentes condições operacionais. Cada configuração foi replicada duas vezes, totalizando 64 ensaios e mais de 13.800 medições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução aos Resultados

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais foram analisados para avaliar a influência de diferentes configurações operacionais sobre a formação de canais preferenciais e a eficiência de diluição no tanque de agitação. Essa análise incluiu o cálculo do tempo médio de residência (TMR), a avaliação da homogeneidade da mistura e a identificação de zonas mortas e canais preferenciais. Gráficos e tabelas foram utilizados para apresentar as interações entre os fatores.

5.2 Comportamento da Mistura

As observações visuais e espectroscópicas confirmaram o impacto significativo das condições operacionais na eficiência de mistura. A Figura 26 mostra o tanque em agitação com o impulsor radial a 500 rpm e ponto de alimentação sobre a saída do tanque apresentando uma coloração homogênea que indica uma mistura eficiente.

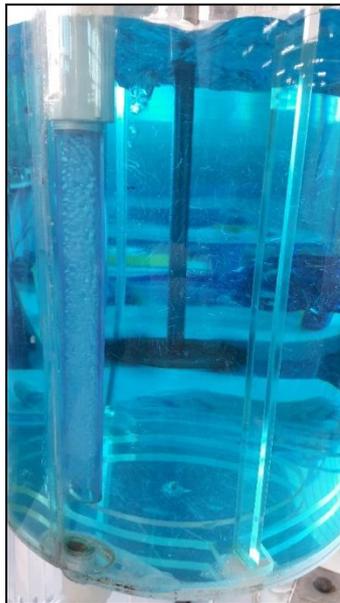


Figura 26 Tanque em agitação com impulsor radial e ponto de alimentação sobre saída do tanque apresentando uma diluição homogênea no processo

A eficiência de mistura observada com o impulsor radial em altas rotações (500 rpm) e vazão elevada (1,0 L/min) pode ser atribuída à maior energia cinética transmitida ao fluido. O fluxo gerado pelo impulsor radial distribui o fluido de maneira mais uniforme, minimizando gradientes de concentração ao longo do tanque. Esse

comportamento está de acordo com Cremasco (2012), que destaca a eficácia de impulsores radiais em promover fluxos tangenciais que atingem as paredes do tanque, reduzindo zonas mortas.

Por outro lado, configurações com baixas rotações (100 rpm) mostraram dificuldades em alcançar uma homogeneidade satisfatória. Isso ocorre porque a energia dissipada não é suficiente para romper as barreiras de densidade criadas pela concentração de corante em regiões específicas. Esse resultado reforça a necessidade de ajustes finos na velocidade de rotação para diferentes aplicações industriais, dependendo da viscosidade e propriedades do fluido.

5.3 Formação de Canais Preferenciais

A formação de canais preferenciais foi identificada em várias condições, especialmente em baixas rotações ou em configurações com vazão reduzida. A Figura 27 apresenta a formação de um canal preferencial em um ensaio realizado sem rotação, com o ponto de alimentação sobre a saída e vazão de 0,5 L/min. Nessa configuração, a diluição foi insuficiente, gerando zonas mortas no tanque.



Figura 27 Formação de canal preferencial

Além disso, a Figura 27 ilustra o impacto do tipo de impulsor na formação de canais preferenciais. A comparação entre o impulsor axial inclinado e o radial tipo Rushton destaca que o radial é mais eficiente na mitigação de zonas mortas, especialmente em configurações de baixa rotação.

A formação de canais preferenciais, particularmente evidente em configurações com ponto de alimentação sobre a saída e sem rotação (0 rpm), evidencia a limitação do fluxo gravitacional para promover a diluição uniforme. Esses canais atuam como rotas preferenciais para o fluido de entrada, que evita interações completas com o conteúdo do tanque. De acordo com Botinha et al. (2015), esses efeitos são comuns em sistemas de mistura mal configurados e podem impactar diretamente a eficiência de processos industriais, como reações químicas e formulações de produtos.

No caso da comparação entre impulsores axial e radial (Figura 28), a superioridade do impulsor radial pode ser explicada pela capacidade de gerar padrões de fluxo tridimensionais. Esse tipo de fluxo promove maior interação entre o fluido de entrada e o conteúdo do tanque, enquanto o fluxo axial tende a formar um padrão unidirecional, dificultando a diluição em algumas regiões, como o topo do tanque.

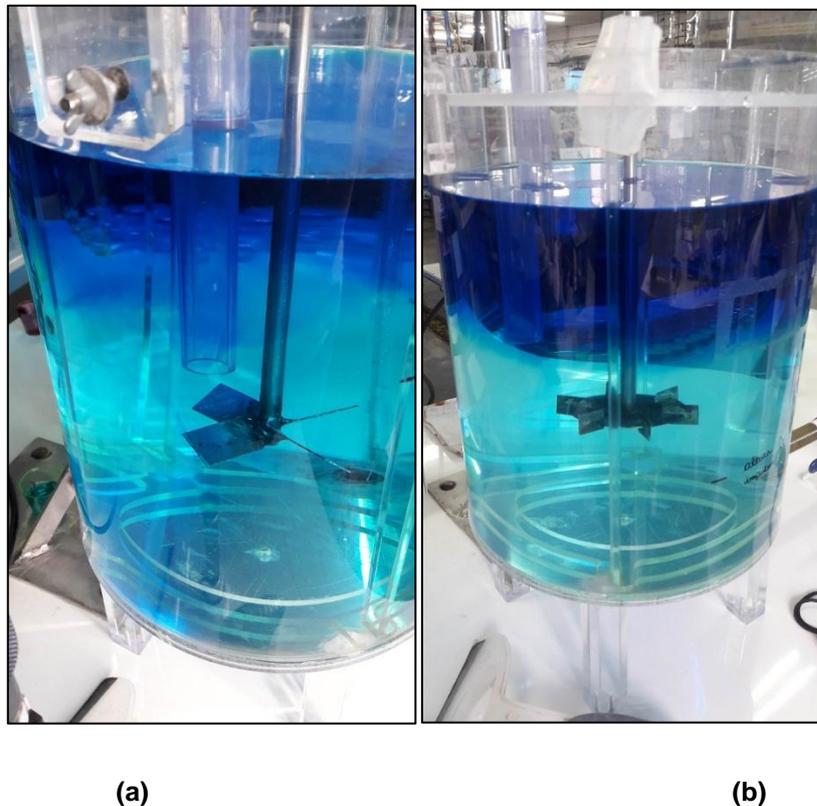


Figura 28 Formação de canal preferencial com variação de impulsor: a) Axial e b) Radial

5.4 Análise Quantitativa dos Resultados

A análise quantitativa concentrou-se nos valores de Tempo Médio de Residência (TMR), obtidos a partir das amostras coletadas em cada ensaio experimental. Esses resultados permitiram avaliar a eficiência de diluição em diferentes configurações operacionais, considerando as variáveis independentes (tipo de impulsor, ponto de alimentação, vazão e rotação) e suas interações.

A Tabela 3 apresenta os valores de TMR obtidos, indicando diferenças significativas dependendo da configuração do sistema.

Tabela 3 Resumo dos Tempos Médios de Residência (TMR) Obtidos nos Ensaio

Impulsor	Ponto de Alimentação	Vazão (L/min)	Rotação (rpm)	TMR (min)
Axial	Alinhado sobre a saída	0,5	500	15,15
Axial	Oposto à saída	1,0	500	6,59
Radial	Alinhado sobre a saída	1,0	300	12,19
Radial	Oposto à saída	0,5	100	14,83

Observou-se que:

- a) **Vazão:** Foi o fator mais influente no processo, com TMR mais baixos associados a vazões mais altas (1,0 L/min). Em contraste, a vazão de 0,5 L/min resultou em TMRs significativamente maiores, evidenciando que o aumento da vazão melhora a eficiência de diluição ao reduzir o tempo necessário para homogeneizar o conteúdo do tanque.
- b) **Rotação:** As rotações mais altas (300 e 500 rpm) promoveram tempos médios de residência menores, especialmente quando combinadas com vazão elevada. A rotação mais baixa (100 rpm) apresentou TMRs superiores, indicando que a energia de agitação era insuficiente para homogeneizar o fluido.
- c) **Tipo de Impulsor:** O impulsor radial tipo Rushton foi mais eficiente que o axial inclinado a 45°, reduzindo o TMR em configurações com vazões elevadas e rotações altas. Isso pode ser atribuído à sua capacidade de criar padrões de fluxo mais amplos, que promovem melhor interação entre o fluido e o corante.

d) **Ponto de Alimentação:** A posição alinhada sobre a saída foi menos eficiente em promover homogeneidade em baixa rotação, favorecendo a formação de canais preferenciais. Já a posição oposta apresentou resultados mais consistentes, com maior redução de TMR.

Os valores de TMR destacados no **Quadro 4.1** indicam que as melhores configurações para minimizar o tempo médio de residência incluem:

1. Vazão de 1,0 L/min.
2. Rotação de 500 rpm.
3. Impulsor radial tipo Rushton.
4. Ponto de alimentação oposto à saída.

Essas condições proporcionaram um TMR médio de aproximadamente 6 minutos, comparado a mais de 15 minutos em configurações com vazão de 0,5 L/min e sem rotação.

Para compreender melhor a influência dos fatores no TMR, foi utilizada uma análise estatística por meio do software Minitab®. O Gráfico de Pareto, apresentado na Figura 29, destaca os fatores que tiveram maior impacto nos resultados. O fator vazão (C) ultrapassou a linha de significância estatística, confirmando sua relevância. Em contraste, o tipo de impulsor (A) apresentou menor impacto quando analisado isoladamente.

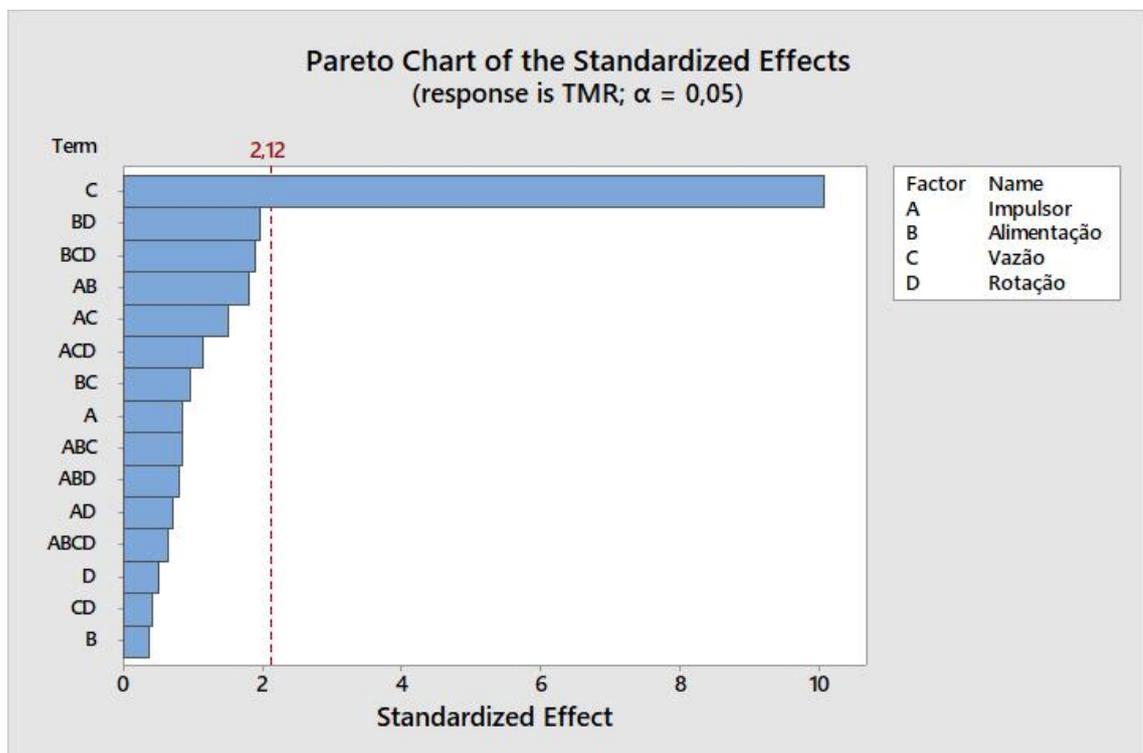


Figura 29 Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados com os resultados da pesquisa

Além disso, gráficos de efeitos principais, como o da Figura 30, ilustram a relação entre cada fator e o TMR. A inclinação acentuada da linha para o fator vazão reforça sua significância no processo. Em comparação, o tipo de impulsor e o ponto de alimentação mostraram menores variações, alinhando-se à média geral.

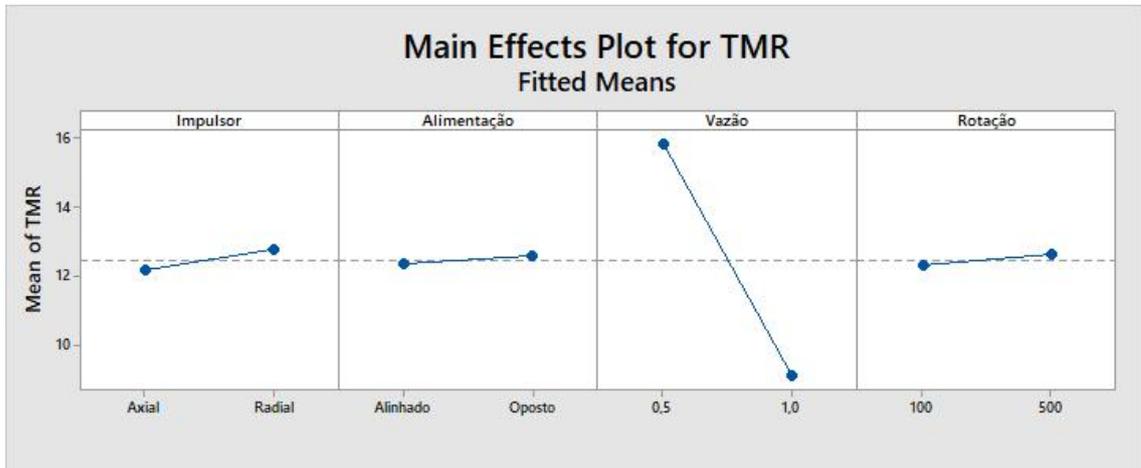


Figura 30 Gráfico de efeitos principais para TMR

As interações entre os fatores foram exploradas com gráficos de interação, como o apresentado na Figura 31.

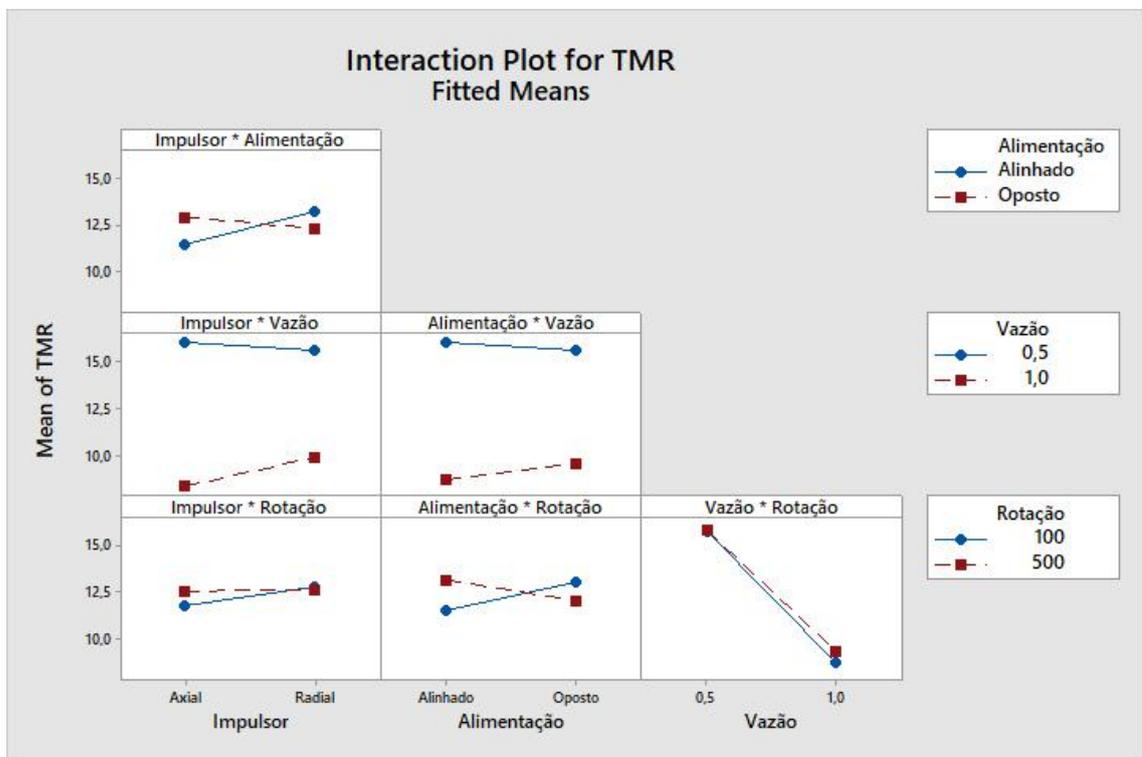


Figura 31 Gráfico de Interação pra TMR

Esse gráfico evidencia que a combinação de rotação alta e vazão elevada gera uma interação positiva, resultando em menores TMRs. A interação entre impulsor e ponto de alimentação também é notável, indicando que o impulsor radial é mais eficaz em configurações com o ponto de alimentação oposto.

A análise dos gráficos de contorno e superfície permitiu uma compreensão mais detalhada das interações entre as variáveis experimentais, como vazão, rotação e o tempo médio de residência (TMR). Os resultados indicaram que tanto a vazão quanto a rotação desempenham papéis cruciais na eficiência de diluição no tanque de agitação.

O gráfico tridimensional apresentado na Figura 32 ilustra a relação entre vazão, rotação e TMR. Observa-se que as menores médias de TMR foram obtidas com a combinação de vazão elevada (1,0 L/min) e rotação máxima (500 rpm). Nessas condições, o fluido alcança uma mistura mais eficiente devido à maior energia de agitação disponível, reduzindo a formação de zonas mortas e promovendo a homogeneidade. Em contrapartida, configurações com vazões reduzidas (0,5 L/min) e rotações menores resultaram em TMR significativamente maiores, demonstrando a dificuldade em romper canais preferenciais e dispersar o soluto de maneira eficaz.

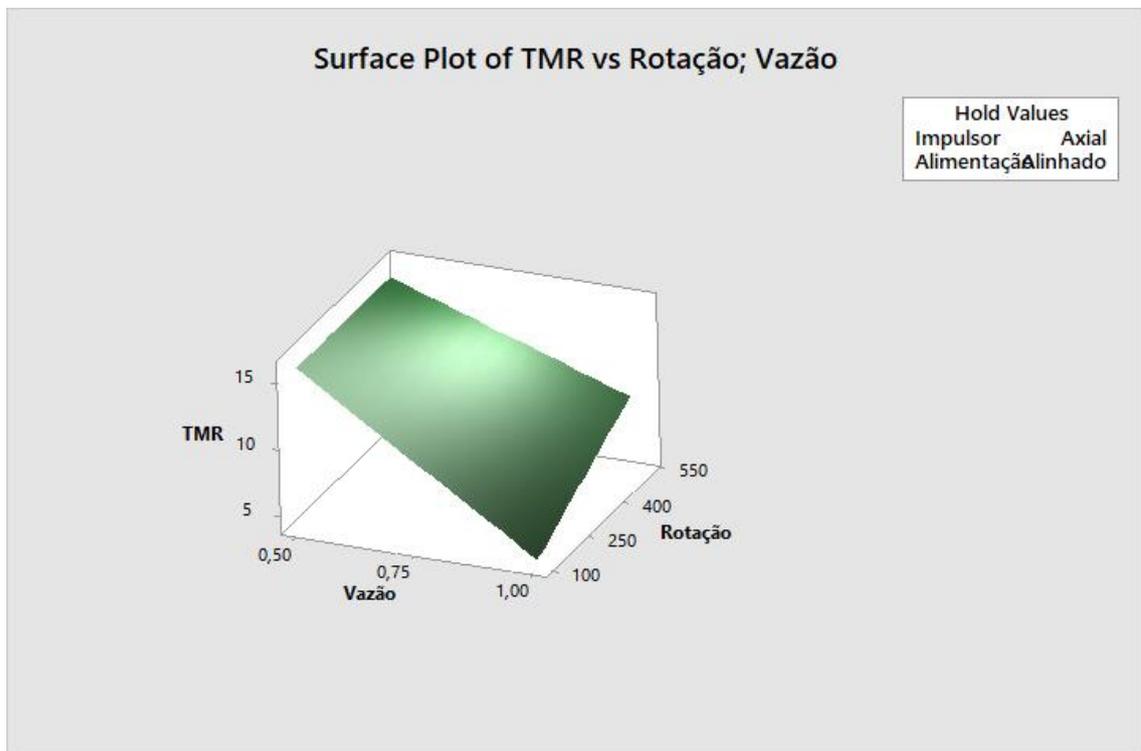


Figura 32 Gráfico de superfície

O gráfico de contorno, apresentado na Figura 33, reforça esses achados ao mapear as condições operacionais que resultaram nos menores valores de TMR.

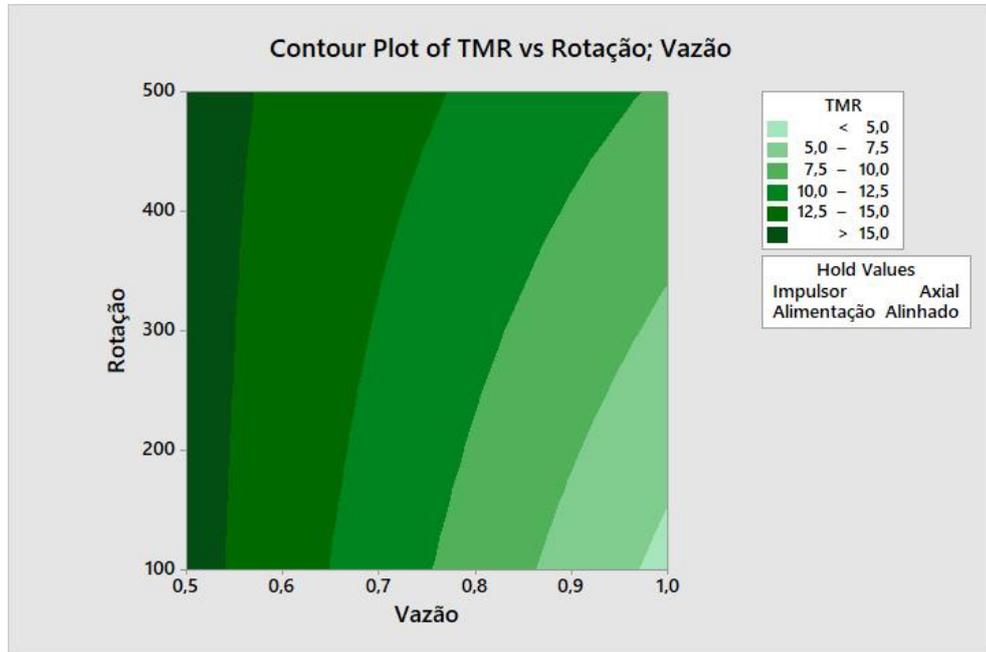


Figura 33 Gráfico de contorno do TMR versus Rotação e Vazão

As áreas mais claras no gráfico correspondem às combinações ideais de vazão e rotação, indicando que a máxima eficiência foi atingida nas condições de alta vazão e rotação elevada. Por outro lado, as áreas mais escuras evidenciam as configurações menos favoráveis, associadas a maiores tempos de residência e, conseqüentemente, menor eficiência de diluição.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram confirmar experimentalmente a formação de canais preferenciais em tanques agitados e evidenciar os fatores que mais influenciam na eficiência de diluição. As configurações testadas mostraram que a combinação de vazão elevada, altas rotações do impulsor e o uso de impulsores mecânicos radiais são determinantes para minimizar o tempo médio de residência (TMR) e promover maior homogeneidade na mistura. Além disso, o estudo demonstrou que a posição do ponto de alimentação é um fator crítico, destacando que a posição oposta à saída do tanque proporciona melhores resultados em termos de diluição uniforme, reduzindo significativamente zonas mortas.

O uso de análise espectroscópica no espectrofotômetro de luz visível foi fundamental para quantificar com precisão a eficiência de diluição ao longo do tempo. A metodologia adotada, incluindo o preparo de soluções com corante alimentício e a calibração rigorosa do equipamento, garantiu a reprodutibilidade e a confiabilidade dos dados. Esses resultados mostram que as técnicas utilizadas são adequadas para avaliar o comportamento de fluidos em processos industriais.

A comparação entre os dois tipos de impulsores testados revelou que o impulsor radial tipo Rushton é mais eficiente na mitigação de canais preferenciais, especialmente em altas rotações e vazões. Por outro lado, o impulsor axial inclinável apresentou desempenho inferior, reforçando que a escolha do tipo de impulsor deve considerar as condições operacionais específicas do processo.

A variação da vazão também desempenhou um papel central, sendo o fator de maior impacto no TMR. Vazões mais altas reduziram o tempo necessário para alcançar a homogeneidade, enquanto vazões menores, combinadas com rotações baixas, acentuaram a formação de canais preferenciais e comprometeram a eficiência do processo.

Portanto, este estudo atingiu plenamente o objetivo de analisar experimentalmente a influência de diferentes fatores operacionais na formação de canais preferenciais e na eficiência de diluição em tanques agitados. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuras investigações, incluindo estudos com outros tipos de traçadores, maior variação de viscosidade nos fluidos e aplicação em tanques de maior escala. Além disso, as conclusões podem ser diretamente aplicadas

em projetos industriais para otimizar processos de mistura, diluição e homogeneização.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramento deste estudo, sugere-se a realização de ensaios em tanques de maior escala, permitindo avaliar a aplicabilidade dos resultados em condições industriais. Adicionalmente, o uso de sistemas automatizados de análise espectroscópica pode melhorar a precisão e eficiência no monitoramento do processo.

Outras possibilidades incluem a utilização de traçadores químicos ou fluorescentes, variação de modelos de impulsores, e a introdução de fluidos não-newtonianos para explorar o impacto de propriedades viscosas no comportamento do fluxo. Também é recomendada a ampliação das combinações de vazão, rotação e posicionamento do fluido para identificar configurações ainda mais eficientes.

Para alinhar os estudos a práticas sustentáveis, o uso de água de reuso pode ser avaliado, bem como a análise de concentrações variadas de traçadores. Por fim, é importante explorar geometrias alternativas de tanques, como formatos quadrados ou com saídas centralizadas e fundos cônicos, visando otimizar a dinâmica do fluxo e reduzir zonas mortas.

8 Referências Bibliográficas

ASSIRELLI, M., BUJALSKI, W., EAGLESHAM, A., & NIENOW, A. W. **Study Of Micromixing in a Stirred Tank Using a Rushton Turbine**. Chemical Engineering Research and Design, 80(8), 855–863, (2002).

BAILEY, W. J., WEIR, I. S. **Investigation of Methods for Direct Rheological Model Parameter Estimation**, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 21, pp. 1-13, 1998.

BOTINHA, B. R, MIRANDA, H. V. de, VIEIRA, F. T.. **Estimação das frações de desvio e zonas mortas a partir das curvas de distribuição de tempos de residência em reator contínuo do tipo tanque agitado (CSTR)**. Universidade Federal do Espírito Santo, Campus de Alegre, COBEQIC 2015, Unicap, Campinas, SP 19 a 22/07/2015.

BUENO, WILLIE ALVES. **Manual de espectroscopia vibracional**. Análise espectral. McGraw-Hill, São Paulo 1990

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Chemical Processing Equipment**. 2000.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. Agitação e Mistura. p. 97-119, São Paulo. Editora Blucher. 2012.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

GAUTO, M. A, ROSA, G. R. **Processos e Operações Unitárias da indústria química**. Rio de Janeiro. RJ. 2011.

GOMIDE, R. **Operações unitárias**, v. 2, parte 2, Operações com fluidos. Mistura e agitação. p. 230 - 292. São Paulo: Edição do autor.1997.

GONÇALVES, T.A.C.; COSTA, M.M.; MARQUES, M.O.; FERREIRA, H.L.; VASCONCELOS R.A.; FERNANDES V.H.E. **Estudo da distribuição do tempo de residência em um reator contínuo de tanque agitado**. Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – Campus Montes Claros, Departamento de Engenharia Química. 2018

- HARRIS, D. C.; **Análise Química Quantitativa**; tradução Carlos Alberto Riehl.[et
- JESUS, A. A., MORAES JR., D., ROSA, V. DS S. **influência da posição de alimentação no aquecimento de água em tanque com impulsor mecânico e serpentina helicoidal**. 15º CONIC SEMESP, UNAERP, Guarujá, SP, 2015.
- MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. Nova York: Mcgraw-hill Education, 2005. p. 1140.
- MIGUELÃO, P.; PARISENTTI. J., OLIVEIRA, D. L. DE., **Distribuição de Tempos de Residência em reatores contínuos do tipo tanque agitado (CSTRS)**, Unoesc & Ciência - ACET Joaçaba, v. 9, n. 2, p. 129-136, jul./dez. 2018.
- MORAES Jr. D.; MORAES, M.S. **Laboratório de operações unitárias I**. Santos: 2ed. 2017. 113p.
- MORAES Jr. D.; MORAES, M.S. **Laboratório de operações unitárias II**. Santos: 2ed. 2017. 59p.
- NOGUEIRA, A. & GOMEZ, J. & CEKINSKI, E. **ESTUDO DE CFD SOBRE A INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DA CHICANA EM TANQUES DE MISTURA**. 11630-11637. 10.5151/chemeng-cobeq2014-0690-24416-181766. (2015).
- PAUL EL, ATIEMO-UBENG SM, **Handbook of mixing**. New York: Editora Wiley-Interscience, 2004.
- ROSA, V. S., MORAES JÚNIOR, D., LUCINDO, M. A. A., MORAES, M. S., TORNEIROS, D. L. M., SILVA, F. J. S., PAIVA, J. L. **“Ampliação de escala entre tanques na agitação de líquidos newtonianos e não-newtonianos”**. COBEQ-ENBEQ 2020;
- RUSHTON, J. H., E. W. COSTICH, H. J. EVERETT, **Power characteristics of mixing impellers**, Chemical Engineering Progress, 46(8), 395–476, 1950.
- SILVA L. L. DA; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H. DE; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. **TRAÇADORES: O USO DE AGENTES QUÍMICOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS, AMBIENTAIS, PETROQUÍMICOS E BIOLÓGICOS**. Quim. Nova, Vol. 32, No. 6, 1576-1585, 2009

SILVA, A. P., SANCHEZ, K. A. F., MANSO, L. M., LUCINDO, M. A. A, ROSA, V. S. **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE EXTERNO DE CONVECÇÃO NO RESFRIAMENTO DE LÍQUIDOS NEWTONIANOS EM TANQUE COM AGITAÇÃO.** COBEQ, Uberlândia, MG, 21 a 24/07/2019.

SILVA, F.J. DOS S.; ROSA, V. DA S. **Estudo de relevância de aplicação de ampliação de escala entre tanques em processos de produção de agitação de misturas de fluidos.** IX ENPG, UNISANTA. Santos. 2020.

SKOOG, DOUGLAS A., DONALD WEST, F. HOLLER, STANLEY CROUCH. **Fundamentos de Química Analítica:** Tradução da 9ª edição norte-americana, 2nd edição. Cengage Learning Editores, 2015.

SKOOG, WEST, HOLLER, CROUCH. **FUNDAMENTOS DE QUÍMICA ANALÍTICA –** EDITORA THOMSON

The Era of Classical Spectroscopy. Spectral nature of light. MIT Spectroscopy. Disponível em: <web.mit.edu/spectroscopy/history/history-classical.html>. Acesso em 21/01/2021.

The Era of Modern Spectroscopy. MIT Spectroscopy. Disponível em: <web.mit.edu/spectroscopy/history/history-modern.html>. Acesso em 21/01/2021.

WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A. **Fundamentos de Química Analítica.** 8ª edição, 2005.