

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS, ENGENHARIAS, ARTES E
CIÊNCIAS DA VIDA**

LUCAS LUIS FORMENTINI CARLESSO

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM MISTURADOR COM PÁS EM
DIFERENTES INCLINAÇÕES CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA DO PROCESSO**

BENTO GONÇALVES

2022

LUCAS LUIS FORMENTINI CARLESSO

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM MISTURADOR COM PÁS EM
DIFERENTES INCLINAÇÕES CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA DO PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. MSc. Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin.

BENTO GONÇALVES

2022

LUCAS LUIS FORMENTINI CARLESSO

**ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM MISTURADOR COM PÁS EM
DIFERENTES INCLINAÇÕES CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA DO PROCESSO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica
na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador Prof. MSc. Eng. Marcelo
Dall'Onder Michelin.

Aprovado em: ___/___/_____

Banca examinadora

Prof. MSc.Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Vagner Grison

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Matheus Poletto

Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Leonardo e Arlete, pela motivação diária e por nunca permitirem que desistisse dos meus sonhos. Agradeço a minha companheira Katiane pela compreensão e suporte nesta reta final. Agradeço a Águia Inox, em especial aos Srs. Alex Conci e Leandro César Soccol, pela disponibilidade dos equipamentos e suprimentos para este trabalho acontecer. Agradeço a todos meus colegas de trabalho pela troca de idéias e auxílio, em especial ao Sr. Jardel Braun. E, por fim, agradeço a meu orientador, Prof. MSc. Eng. Marcelo Dall'Onder Michelin, pelas instruções e conselhos ao longo deste trabalho.

RESUMO

Os misturadores são equipamentos utilizados em diversos segmentos da indústria para realizar a mistura de dois ou mais componentes em diferentes escalas e aplicações, podendo variar diversas propriedades dos fluidos processados. Para a realização da mistura existe uma gama de modelos de impelidores que podem trabalhar desde baixa até alta rotação, com aplicações específicas como: melhor dissipação, quebra de partículas sólidas, geração de turbulência e movimentação de produtos com alta viscosidade. O principal objetivo deste trabalho é a análise do consumo de energia do motor elétrico em relação ao processo de mistura realizado por um misturador, de pás retas inclinadas, de 750 milímetros de diâmetro e 680 milímetros de costado. Para isto foram testadas diferentes inclinações das pás do impelidor (30°, 45° e 60°), visando determinar a inclinação com melhor desempenho energético sem causar impacto na qualidade do produto final. Os resultados foram obtidos através de um tanque em escala real, testando os modelos de impelidores na realização de uma mistura de 200 litros de água e 10 quilos de açúcar, acoplando-os no eixo de forma removível. Os testes indicaram que os impelidores de 45° e 60° realizam a mistura de maneira adequada (deixando poucas partículas de açúcar sem dissolução), porém, o impelidor de 60° consome 4,5% mais energia para realização do processo. Desta forma, concluiu-se que o impelidor de 45° é o mais adequado para o trabalho.

Palavras-Chave: Misturador, Impelidor, Mistura, Consumo de energia.

ABSTRACT

Mixers are equipment used in different segments of the industry, to mix two or more components at different scales and applications, being able to vary different properties of the processed fluids. For mixing, there is a wide range of impeller models that can work from low to high rotation, with specific applications such as: better dissipation, breaking solid particles, generating turbulence and moving products with high viscosity. The main objective of this work is to analyze the energy consumption of the electric motor in relation to the mixing process carried out by a mixer with inclined straight blades, 750mm in diameter and 680mm in width. For this, different inclinations of the impeller blades will be tested (30°, 45° and 60°), in order to find the inclination with the best energy performance without impacting the quality of the final product. The results will be obtained through the design of a full-scale tank, testing the models of impellers in the realization of a mixture of 200 liters of water and 10 kilos of sugar, coupling them in the axis in a removable way. The tests indicated that 45° and 60° impellers achieve adequate mixing (living few sugar particles without dissolution), however, the 60° impeller consumes 4.5% more energy to carry out the process. In this way, it was concluded that the 45° impeller is the most suitable for this job.

Keywords: Mixer, Impeller, Mixing, Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mistura heterogênea de areia, água e óleo.....	13
Figura 2:Amostra de sangue	14
Figura 3: Deslocamento de fluido.....	17
Figura 4: Escoamento de fluxo laminar	18
Figura 5: Escoamento de fluxo turbulento.....	18
Figura 6: Misturador com agitador de pás retas	19
Figura 7: Sistema agitador	20
Figura 8: Modelo de impelidores de fluxo axial	21
Figura 9: Impelidor de turbinas de pás planas.....	22
Figura 10: Impelidor cowles.....	23
Figura 11: Impelidor âncora.....	23
Figura 12: Demonstração de fluxo radial e axial	24
Figura 13: Posicionamento de impelidor axial	25
Figura 14: Fluxograma de atividades	26
Figura 15: Impelidor de pás retas removível 45°	27
Figura 16: Projeto do tanque com sistema impelidor	28
Figura 17: Modelagem 2D dos impelidores 30° e 60°	29
Figura 18: Impelidores 30° e 60° fabricados	29
Figura 19: Refratômetro	30
Figura 20: Display do refratômetro	31
Figura 21: CLP	32
Figura 22: Painel elétrico.....	32
Figura 23: Comparativo de deposição de partículas no fundo do tanque	35
Figura 24: Consumo de energia cumulativa.....	36
Figura 25: Relação eficiência x consumo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes e modelos de impelidores	21
Tabela 2: Componentes do painel elétrico	33
Tabela 3: Valores de grau brix coletados	36

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa (kg)
ρ	Massa específica (kg/m ³)
V	Volume (m ³)
W	Peso (N)
G	Aceleração da gravidade (m/s ²)
S	Densidade relativa ($\rho/\rho_{\text{água}}$)
D	Diâmetro (m)
v	Velocidade (m/s)
μ	Viscosidade dinâmica (N.s/m ²)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVO GERAL.....	12
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.4	LIMITAÇÕES.....	12
1.5	DELINEAMENTO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	MISTURA	13
2.1.1	<i>Mistura Heterogênea.....</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Mistura Homogênea.....</i>	<i>14</i>
2.1.3	<i>Operações de mistura.....</i>	<i>15</i>
2.2	MECÂNICA DOS FLUIDOS.....	16
2.2.1	<i>Propriedades principais dos fluidos.....</i>	<i>16</i>
2.2.2	<i>Tipos de escoamentos de fluidos.....</i>	<i>17</i>
2.3	EQUIPAMENTO DE MISTURA	19
2.3.1	<i>Tanque.....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Sistema Agitador.....</i>	<i>20</i>
2.4	EFICIÊNCIA DE MISTURA.....	23
3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	26
3.1	PROJETO DOS IMPELIDORES.....	27
3.2	COLETA DOS DADOS.....	30
3.2.1	<i>Eficiência do processo de mistura.....</i>	<i>30</i>
3.2.2	<i>Monitoramento do consumo de energia elétrica</i>	<i>31</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	EFICIÊNCIA DA MISTURA.....	34
4.1.1	<i>Análise da qualidade da mistura</i>	<i>34</i>
4.2	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO AGITADOR	36
4.3	ANÁLISE DE RESULTADOS	37

5 CONCLUSÃO	39
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Os misturadores estão presentes em diversos segmentos da indústria, transformando duas ou mais matérias-primas em um novo produto, com característica e funcionalidade específica.

Na Águia Inox, empresa do ramo de caldeiraria, foram produzidos 126 tanques com agitadores sendo eles para indústria de alimentos, químicos, farmacêuticos, cosméticos e para saneamento básico. A produção vem crescendo de maneira exponencial ao longo dos anos, o que demonstra a procura por este tipo de equipamento (ÁGUIA INOX, 2022).

Para realização da mistura a ferramenta mais utilizada é o agitador, composto de um sistema motorizado e impelidores. O consumo elétrico da motorização torna-se, desta forma, um fator importante a ser trabalhado para aumentar a lucratividade sem prejudicar a qualidade da mistura (ZANUTTO, 2020).

Neste trabalho, foram analisadas diferentes inclinações de pás do agitador em um tempo pré-determinado, verificando o consumo de energia do motor ao longo do processo e a qualidade da mistura final. Desta forma, foi possível encontrar a inclinação com melhor desempenho energético para a mistura, sem comprometer a qualidade do processo, e, assim, gerando menor demanda de energia na produção das misturas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Sendo os misturadores equipamentos de grande porte e que somam muitas horas seguidas de operação, o dimensionamento correto de seus componentes é fundamental para garantir o melhor resultado, e, assim, atender a demanda com maior lucratividade e menor consumo de energia.

Os impelidores mais utilizados no mercado são os impelidores de pás retas e inclinadas, e, desta forma, o estudo proposto visa verificar qual modelo pode gerar os melhores resultados para esta demanda.

Desta maneira, o sistema agitador realizará a mistura com o conjunto impelidor mais apropriado, garantindo assim a melhor condição de trabalho possível ao equipamento dentro das opções disponíveis.

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar o consumo energético do motor elétrico de um misturador, alternando a inclinação das pás do impelidor e considerando a qualidade da mistura em um tempo pré-determinado.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Modelar três conjuntos de pás com diferentes inclinações (30°, 45° e 60°) em um *software* tridimensional;
- b) Avaliar os conjuntos projetados acoplando-os ao tanque misturador individualmente, considerando um tempo fixo e analisando a qualidade da homogeneização em cada caso;
- c) Analisar o consumo de energia elétrica do motor para cada situação;
- d) Avaliar o ângulo de pá mais apropriado por meio da relação entre consumo energético e qualidade da mistura.

1.4 LIMITAÇÕES

- a) Tanque misturador já existente, não podendo alterar suas dimensões;
- b) A análise da qualidade de homogeneização foi visual, com fotografias de amostras para comparação dos resultados.

1.5 DELINEAMENTO

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Dimensionamento e projeto dos conjuntos de pás;
- c) Fabricação dos conjuntos de pás;
- d) Experimentação dos conjuntos produzidos no misturador;
- e) Análise dos resultados;
- f) Conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os tópicos necessários para o entendimento e desenvolvimento do projeto. Inicialmente, será abordado o conceito de mistura e comportamento dos fluidos, e, posteriormente, o equipamento e os componentes principais do sistema agitador, responsável pela mistura.

2.1 MISTURA

Mistura pode ser definida como a junção de duas ou mais substâncias, sendo elas simples ou compostas. Suas propriedades físicas, como densidade e viscosidade, serão diferentes das substâncias puras. Existem dois tipos de mistura: homogêneas e heterogêneas (BATISTA, 2022).

2.1.1 Mistura Heterogênea

São misturas em que as substâncias envolvidas não se dissolvem umas nas outras, apresentando duas ou mais fases. Pode-se ainda dividir as heterogêneas em duas categorias: suspensas e colóides (DIAS, 2022)

Como pode ser visto na Figura 1, as suspensas, ou as misturas heterogêneas grosseiras, são aquelas em que é possível ver claramente a olho nu as partículas não dissolvidas, com suas fases bem distintas.

Figura 1: Mistura heterogênea de areia, água e óleo

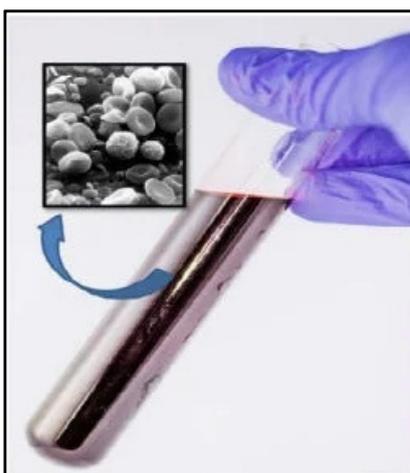


Fonte: (DIAS, 2022)

Por sua vez, uma mistura colóide apresenta o disperso com um tamanho entre 1 e 100nm, sendo possível a visualização deste apenas com aparelhos amplificadores (FERREIRA, 2022).

Conforme Figura 2, o sangue, apesar de aparentar homogeneidade, é uma mistura heterogênea colóide, pois apresenta partículas não dissolvidas em sua composição.

Figura 2: Amostra de sangue



Fonte: (FERREIRA, 2022)

2.1.2 Mistura Homogênea

A mistura homogênea apresenta uma única fase, pois ocorre a dissolução completa do soluto no solvente. Ao fim do processo de mistura, fica visível apenas o solvente com novas características, devido ao acréscimo do soluto (SOUZA, 2022).

A solubilidade também é um fator importante a ser considerado já que cada material possui um potencial de dissolução, isto é, uma capacidade de dissolver determinadas substâncias. Como exemplo pode-se citar a água, que com 100 ml capaz de dissolver 36 g de sal de cozinha (NaCl) e 197 g de açúcar (DIAS, 2022).

Uma mistura homogênea pode ser classificada conforme sua concentração. No caso de uma mistura em que o solvente dissolveu toda sua capacidade de soluto, considera-se uma solução saturada. Já nas insaturadas, subdividem-se em duas possibilidades: solução concentrada, no caso de o solvente estar perto de sua capacidade máxima de dissolução, e solução diluída, onde a quantidade de soluto é mais branda (DIAS, 2022).

Quando uma mistura homogênea não apresenta uma proporção específica de cada componente ela é considerada simples ou comum. Porém, existem muitos casos em que a quantidade de componentes é bem controlada, e a mistura recebe assim uma denominação específica (DIAS, 2022).

Um caso muito presente na indústria metalúrgica é da mistura homogênea eutética. Trata-se da mistura de componentes sólidos, com proporção específica de cada componente. Como exemplo, pode-se citar a solda, que apresenta uma mistura de estanho e chumbo, na proporção de 63% e 37% (DIAS, 2022).

Já uma mistura homogênea azeotrópica refere-se a uma mistura de componentes líquidos em proporções controladas. Um exemplo desta mistura é o álcool 96, contando com 96% de álcool e 4% de água (SOUZA, 2022).

2.1.3 Operações de mistura

O desempenho dos agitadores é caracterizado com base no resultado do processo da operação de mistura. Para cada tipo e propriedades de fluido, são selecionados diferentes misturadores (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

No caso da mistura de dois líquidos, as questões críticas a serem abordadas incluem número de líquidos e seus volumes, configuração do tanque, tempo de mistura e propriedades das substâncias. A viscosidade é um fator fundamental para o projeto do agitador, pois em caso de líquidos com média e baixa viscosidade (até 10000cP), a mistura pode ser realizada de forma eficaz com sistema de impelidores turbina, porém, no caso de viscosidades maiores, possivelmente será necessário o uso de componentes para auxiliar os impelidores a rotacionar a mistura como por exemplo fitas helicoidais (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Em misturas de sólidos suspensos em líquidos, impelidores axiais são mais adequados pois geram um padrão de fluxo que varre o fundo do tanque e suspende os sólidos (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O rotor de turbina a disco é o tipo mais adequado quando o objetivo é a dispersão gás-líquido. O disco é adequado para forçar as bolhas de gás espargidas a se moverem através de zonas de cisalhamento perto da ponta da pá do impulsor.

2.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS

O entendimento da mecânica dos fluidos é de vital importância para realização de uma mistura. Os engenheiros mecânicos utilizam-se desta ciência para o desenvolvimento de bombas, turbinas, compressores, equipamentos de calefação e resfriamento e até dispositivos de aquecimento solar (HIBBELER, R. C., 2017).

2.2.1 Propriedades principais dos fluidos

Supondo que o fluido seja um meio contínuo, pode-se considerar algumas características principais:

Massa específica: Refere-se a uma quantidade de massa contida em uma unidade de volume. Pode ser calculada com a Equação 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ : massa específica (kg/m³)

m : massa (kg)

V : volume (m³)

O fluido em seu estado líquido tem taxa de compressão praticamente nula, desta forma, a densidade apresenta muito pouca variação com a pressão. Porém no estado gasoso, a compressibilidade é alta e, portanto, a densidade é alterada significativamente com alteração de pressão e temperatura (HIBBELER, R. C., 2017).

Densidade Relativa: Segundo Hibbeler (2017), é a quantidade adimensional definida como a razão entre densidade de alguma outra substância considerada como um “padrão”. Sendo mais utilizada para líquidos, e a água submetida a pressão atmosférica de 101,3 kPa e uma temperatura de 4°C é considerado o padrão.

Assim, pode-se calcular o peso específico com a Equação 2:

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \quad (2)$$

Onde:

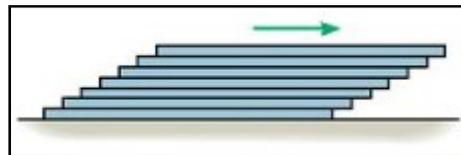
S: peso específico (N/m³)

ρ : massa específica (kg/m³)

$\rho_{\text{água}}$: densidade da água em pressão atmosférica (kg/m³)

Viscosidade: É uma propriedade do fluido que mede a resistência ao movimento de uma camada muito fina de fluido sobre uma camada adjacente. Esta resistência ocorre apenas quando uma força de cisalhamento ou tangencial age sob o fluido, como representado na Figura 3:

Figura 3: Deslocamento de fluido



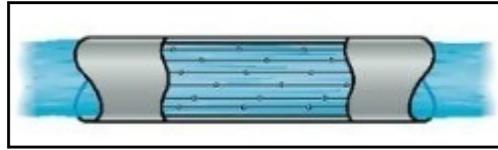
Fonte: (HIBBELER, R. C., 2017)

2.2.2 Tipos de escoamentos de fluidos

O processo de homogeneização pode acontecer com dois diferentes tipos de escoamento para o fluido, sendo eles fluxo turbulento e fluxo laminar. Na maioria dos casos presentes na indústria trabalha-se com regime turbulento justamente pela necessidade de redução da heterogeneidade dos componentes agitados (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Quando um fluido é altamente viscoso, ele tende a escoar muito lentamente por uma tubulação e as linhas de trajetória que as partículas seguem são uniformes e sem perturbação. As lâminas ou camadas finas de fluido são organizadas e, portanto, uma camada cilíndrica desliza suavemente em relação a uma camada adjacente. Este comportamento é conhecido como fluxo de escoamento laminar, representado na Figura 4 (HIBBELER, R. C., 2017).

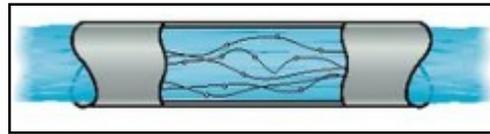
Figura 4: Escoamento de fluxo laminar



Fonte: (HIBBELER, R. C., 2017)

Com o aumento da velocidade, ou a redução da viscosidade, as partículas tendem a fluir de maneira mais errática e desorganizada, causando uma alta taxa de mistura. Este é o escoamento de fluxo turbulento, representado na Figura 5 (HIBBELER, R. C., 2017).

Figura 5: Escoamento de fluxo turbulento



Fonte: (HIBBELER, R. C., 2017)

Entre os dois tipos de escoamento, existe o escoamento transicional, onde no escoamento em questão coexistem partes laminares e turbulentas (HIBBELER, R. C., 2017).

Para determinar o tipo de escoamento de forma quantitativa, recorre-se ao número de Reynolds, uma grandeza adimensional, que quanto maior o valor, maior a turbulência de escoamento. A Equação 3 apresenta o cálculo para encontrar o número de Reynolds (BRUNETTI, 2008).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

Onde:

Re: número de Reynolds (-)

ρ : massa específica do fluido (kg/m^3)

v: velocidade (m/s)

D: diâmetro equivalente (m)

μ : viscosidade dinâmica (N.s/m^2)

Depois de realizado o cálculo, o tipo de escoamento é definido por: $Re \leq 2300$ escoamento laminar, $2300 < Re < 2400$ escoamento de transição e $Re \geq 2400$ escoamento turbulento (HIBBELER, R. C., 2017).

2.3 EQUIPAMENTO DE MISTURA

O misturador é utilizado para realizar a mistura de dois ou mais componentes dos mais variados segmentos da indústria, desta forma, o projeto é específico para cada caso.

Além do volume do tanque, podem ser controladas pressão, temperatura, viscosidade e densidade do produto, tempo de processo e diversas outras características necessárias para cada processo. Na Figura 6 pode ser observado um modelo de misturador.

Figura 6: Misturador com agitador de pás retas



Fonte: (ÁGUIA INOX, 2022)

2.3.1 Tanque

O tanque é dimensionado por *software* conforme a necessidade de volume, pressão interna e demais solicitações estruturais. Geralmente cilíndrico e apoiado em pés tubulares, são fabricados seguindo normas construtivas e de segurança.

No caso de possuir uma pressão interna diferente da atmosférica, sendo assim considerado um vaso de pressão, deve-se seguir a NR13, que apresenta

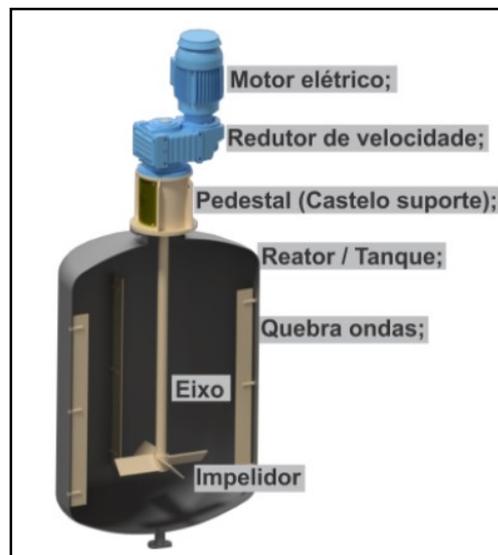
medidas de segurança desde a construção do vaso a controle da pressão/vácuo com válvulas e dispositivos.

O material utilizado para fabricação pode ser aço inox, aço carbono, concreto (em caso de silos ou reservatórios maiores) e até polipropileno. A especificação do material deve suprir as necessidades do produto/processo perante qualidade e normas vigentes, e, complementar a isso, visar o melhor custo-benefício possível (VOLPATO, 2021).

2.3.2 Sistema Agitador

Para a realização da mistura o equipamento conta com um sistema agitador, contemplando um sistema motoredutor, uma vedação da motorização com o interno do tanque para não contaminar o produto, e o eixo com os impelidores. Como pode-se ver na Figura 7, para a criação de um obstáculo no fluxo do fluido pode ser acrescentado quebra ondas no vaso, aumentando a turbulência da mistura (BERESTINAS, 2020)

Figura 7: Sistema agitador



Fonte: (BERESTINAS, 2020)

A Tabela 1 apresenta as principais classes e modelos de impelidores existentes na indústria, tanto para misturas na fase de transição quanto para regime turbulento. É importante considerar, para a questão da eficiência do processo, que o sistema de agitação pode ser instalado em diversas posições no tanque: no topo,

fundo, lateral, central, descentralizado, inclinado, na vertical e na horizontal (VOLPATO, 2021).

Tabela 1: Classes e modelos de impelidores

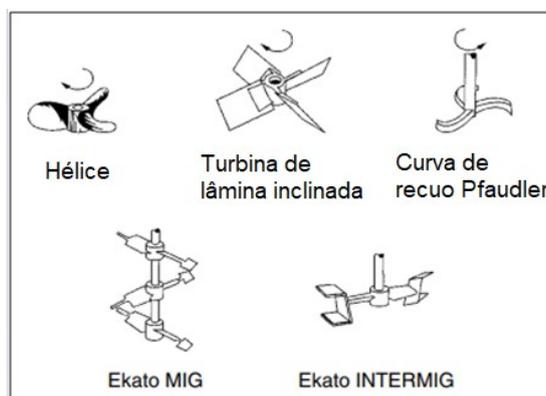
Classes de Impelidores	Modelos
Fluxo Axial	Hélice propulsora, turbinas com pás inclinadas
Fluxo Radial	Impulsores de lâmina plana, turbina Rushton e turbina Smith
Alto Cisalhamento	Cowles, turbina de barras, impelidor dente de serra

Fonte: PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA (2004)

Os impelidores axiais, na maior parte de suas aplicações, têm como função a transferência de calor em fluidos de viscosidade baixa e média. Para esta aplicação, o impelidor direciona o fluxo para o fundo do tanque (por meio do sentido de rotação) tornando a troca térmica mais homogênea. Para mistura de gases ou sólidos flutuantes, o fluxo de rotação inverso, jogando o fluxo para cima, é mais eficiente (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Os principais modelos de impelidores axiais são os helicoidais e o de pás inclinadas. O helicoidal, por não alterar as características físico-químicas do produto, é amplamente utilizado na indústria de armazenamento de laticínios como silos ou grandes tanques de armazenamento. Ele pode ser instalado tanto no costado quanto no teto ou no fundo de equipamentos menores (VOLPATO, 2021). Na Figura 8 é possível observar respectivamente os principais impelidores de fluxo axial.

Figura 8: Modelo de impelidores de fluxo axial



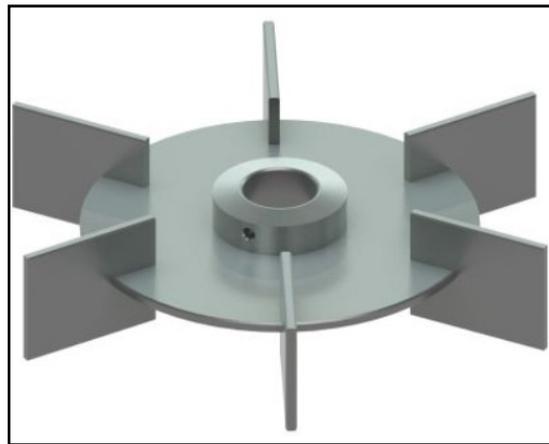
Fonte: (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004)

É válido ressaltar que o impelidor de pás retas inclinadas, apesar de estar na categoria de impelidores axiais, também gera fluxo radial, sendo considerado um impelidor de fluxo misto. Para fluxos radiais, existem impelidores de pás totalmente verticais (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O impelidor de pás inclinadas é amplamente utilizado por trabalhar com viscosidades entre 1 e 10^5 cP (QUEIROZ, 2009). Seu sistema consiste em um cubo com lâminas aparafusadas ou soldadas no mesmo. As lâminas podem estar entre 10 e 90° da horizontal, mas o ângulo mais utilizado é 45°(PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

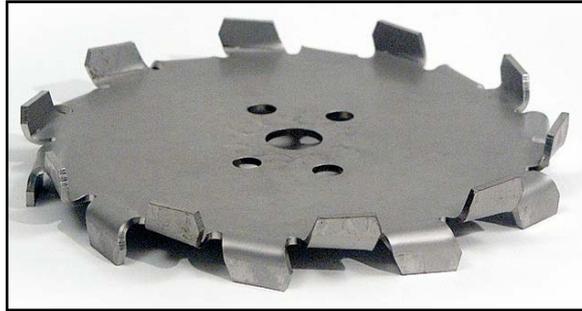
O impelidor turbina é um exemplo de modelo de fluxo radial para médio cisalhamento e alta turbulência. Sua principal função é a dispersão de fluidos e sólidos. Na Figura 9 pode ser visto um impelidor de turbinas de pás planas (KAUVIN, 2022).

Figura 9: Impelidor de turbinas de pás planas



Fonte: (FUSION FLUID EQUIPMENT, 2022)

Para atender uma alta necessidade de cisalhamento e turbulência, o impelidor *cowles* é amplamente utilizado. Este modelo trabalha com alta rotação e fluxo radial, visando produzir uma boa dispersão, reduzir as partículas sólidas e homogeneizar os produtos líquidos (KAUVIN, 2022). A Figura 10 apresenta um impelidor *cowles*.

Figura 10: Impelidor *cowles*

Fonte: (SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2022)

O modelo de impelidor tipo âncora é utilizado em casos de produtos muito viscosos ($10^6\text{cp} - 6 \times 10^6\text{cp}$). Realizando um trabalho de raspagem no interno do tanque, a âncora obriga o produto a se deslocar, e, para isto, a âncora fica muito próxima a parede interna do tanque. Na Figura 11 exemplifica-se um impelidor tipo âncora (KAUVIN, 2022).

Figura 11: Impelidor âncora



Fonte: (KAUVIN, 2022)

2.4 EFICIÊNCIA DE MISTURA

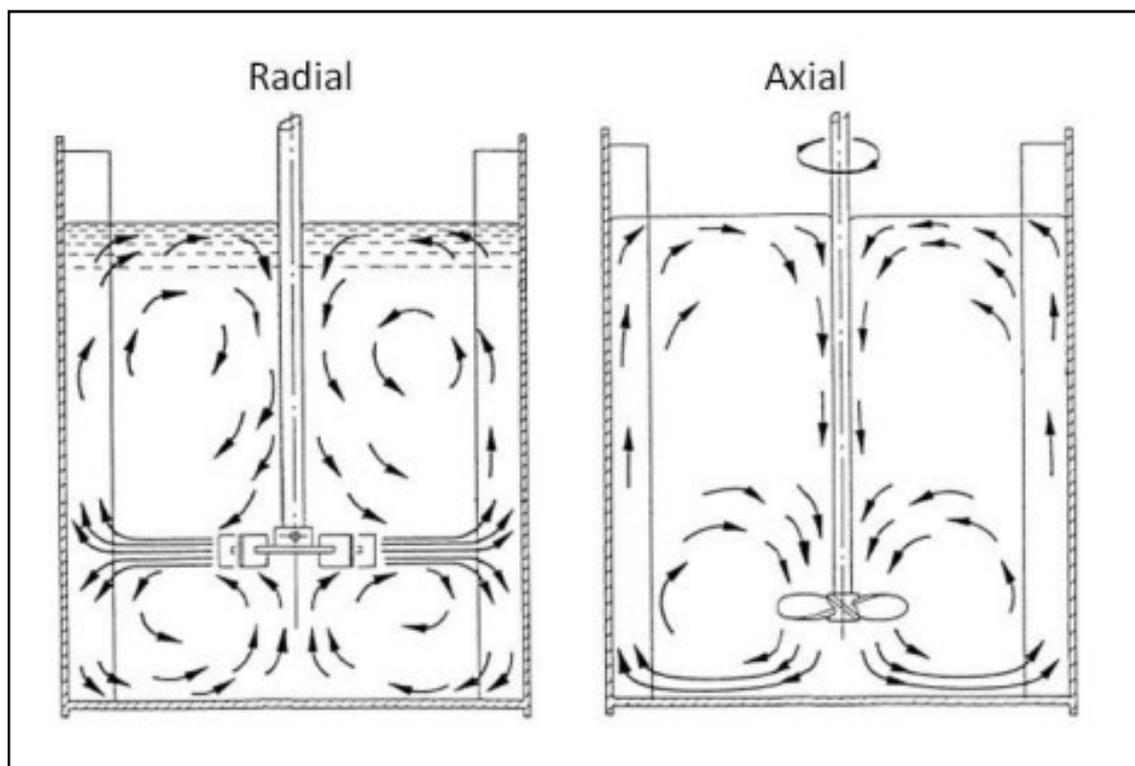
A eficiência do processo de mistura trata-se de atingir o objetivo desejado da forma menos custosa possível. Para cada aplicação, um tipo de impelidor específico trará melhores resultados.

Dependendo do tipo de impelidor utilizado, o escoamento do fluido pode ser radial, axial, ou tangencial. O escoamento radial é aquele que geral linhas de fluxo perpendicularmente ao eixo do agitador, impulsionando a grande massa líquida contra as paredes do tanque (ALMEIDA, 2021).

Já o escoamento axial gera linhas de fluxo paralelas ao eixo do agitador, ou seja, impulsiona a grande massa líquida contra o fundo do tanque, escoamento este, geralmente gerado pelo impelidor de hélice naval (ALMEIDA, 2021).

Na Figura 12, ilustra-se o comportamento de escoamento do fluido em cada caso.

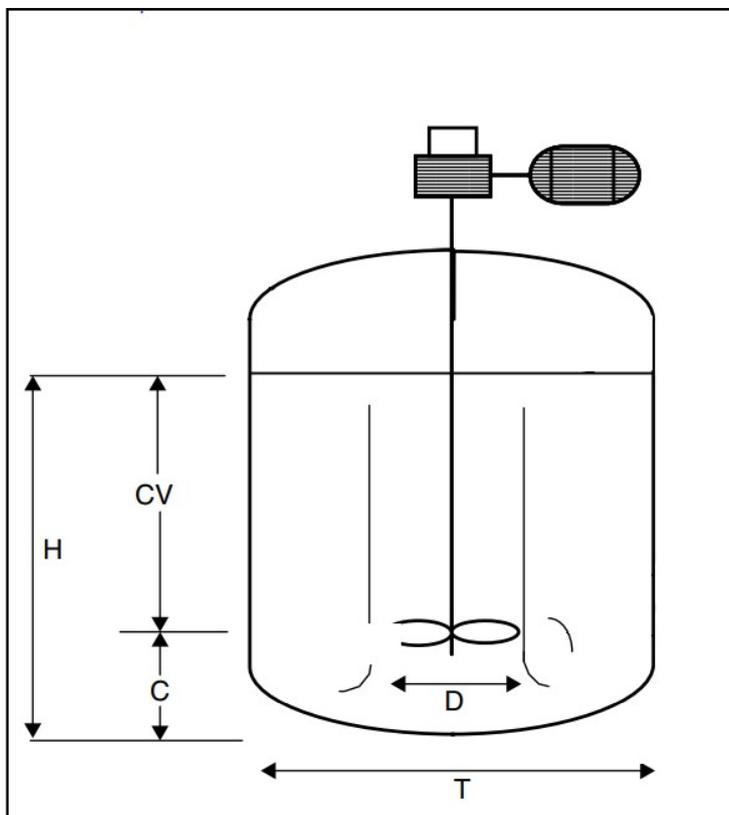
Figura 12: Demonstração de fluxo radial e axial



Fonte: (COKER, A. K., 2007)

Em caso de impelidores axiais, a distância do mesmo para o fundo do tanque tem impacto significativo nos resultados finais da mistura. Na Figura 13, podem-se observar as principais medidas a analisar.

Figura 13: Posicionamento de impelidor axial



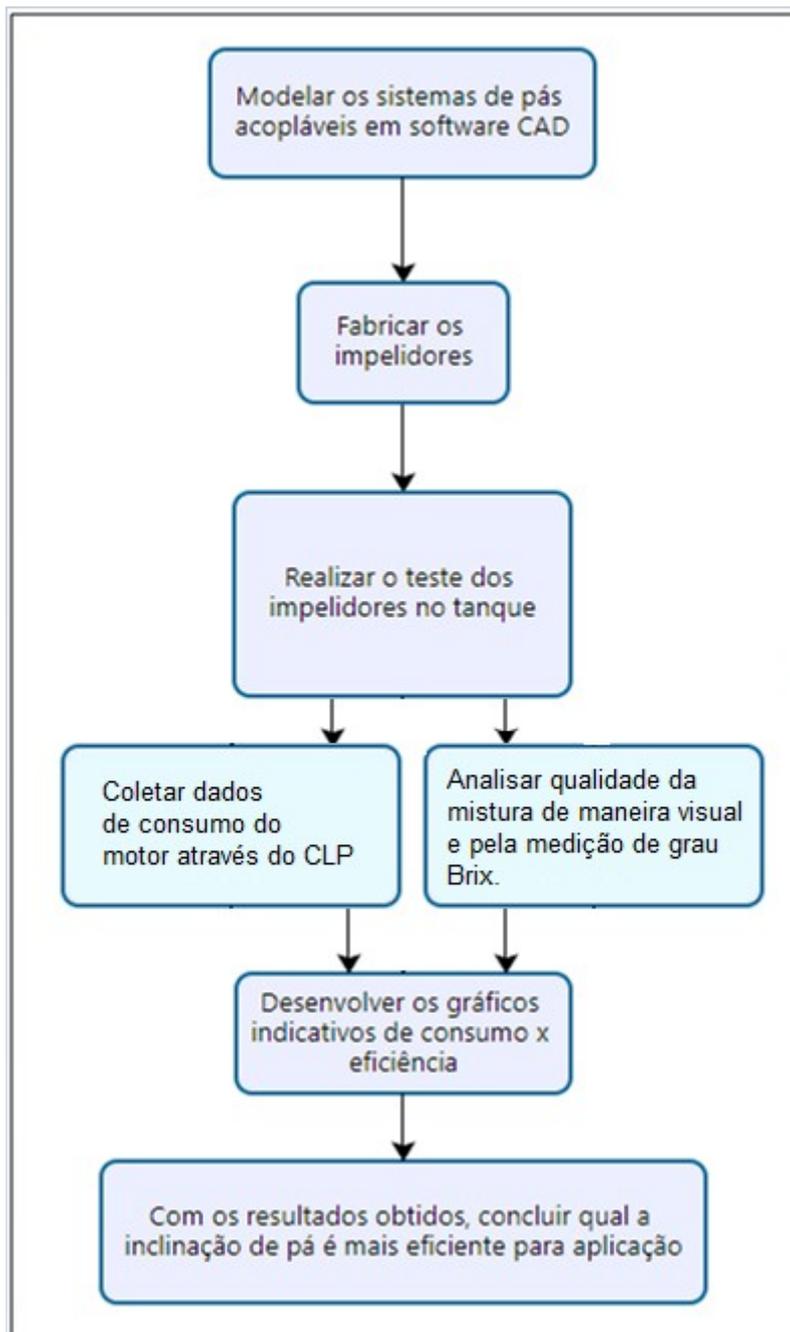
Fonte: (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004)

Para o funcionamento adequado de um impelidor axial de pás retas, em caso do diâmetro do impelidor ser menor que $T/2,5$, recomenda-se que a sua altura em relação ao fundo do tanque seja menor que $T/4$ (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para realização da modelagem e fabricação dos impelidores e, posteriormente, os testes no tanque. Através do fluxograma presente na Figura 14 indicam-se as etapas do projeto e seu desenvolvimento.

Figura 14: Fluxograma de atividades



Fonte: Do autor

3.1 PROJETO DOS IMPELIDORES

O desenvolvimento da modelagem 3D dos impelidores foi realizado através do *software* CAD *SolidWorks* 2020.

Cada impelidor conta com a base das pás soldadas em uma bucha na inclinação desejada, a qual será acoplada no eixo agitador do tanque. Por fim, as pás são parafusadas nesta base inclinada. O impelidor de fluxo axial com pás retas removíveis presente no tanque consta na Figura 15.

Figura 15: Impelidor de pás retas removível 45°

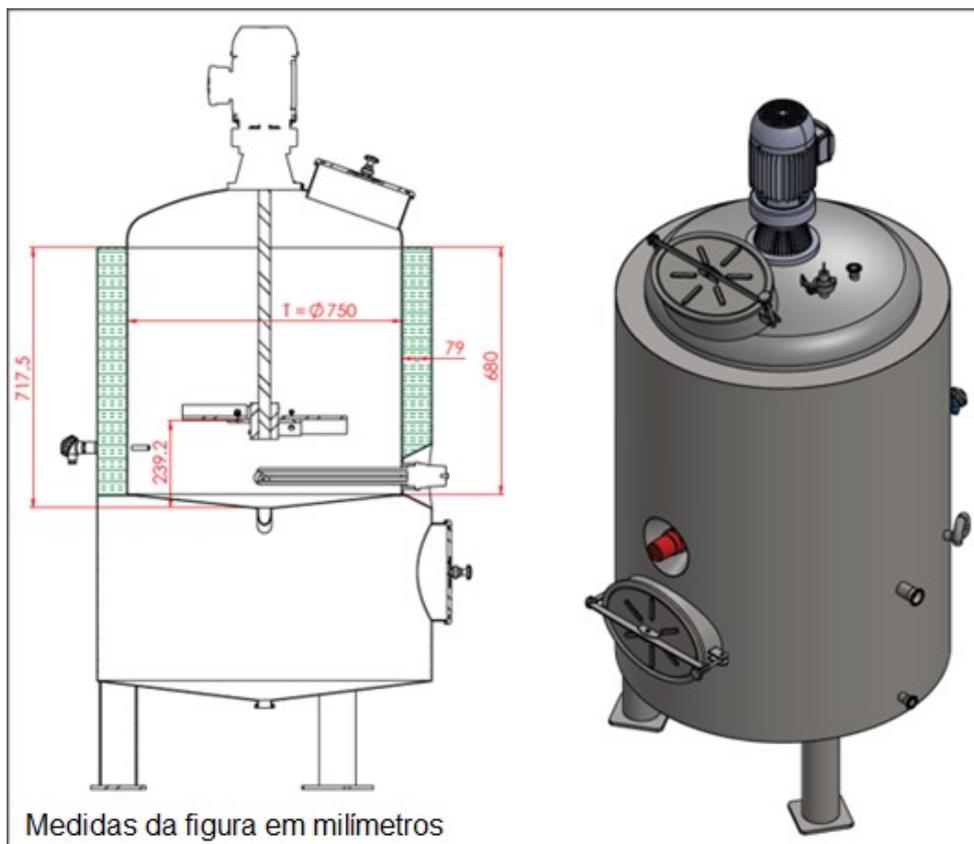


Fonte: Do autor

Os impelidores aplicados no tanque produzidos até então ficam posicionados com inclinação de 45°. Esta inclinação tem sido adotada historicamente por conveniência e, portanto, este trabalho propôs a avaliação funcional do equipamento em outras duas inclinações: 30° e 60°.

O tanque, que já está fabricado, possui um sistema de troca de impelidores que possibilita a realização dos testes, necessitando apenas da substituição do conjunto de impelidores com as especificações desejadas. A Figura 16 ilustra o projeto dimensional do tanque com o sistema impelidor.

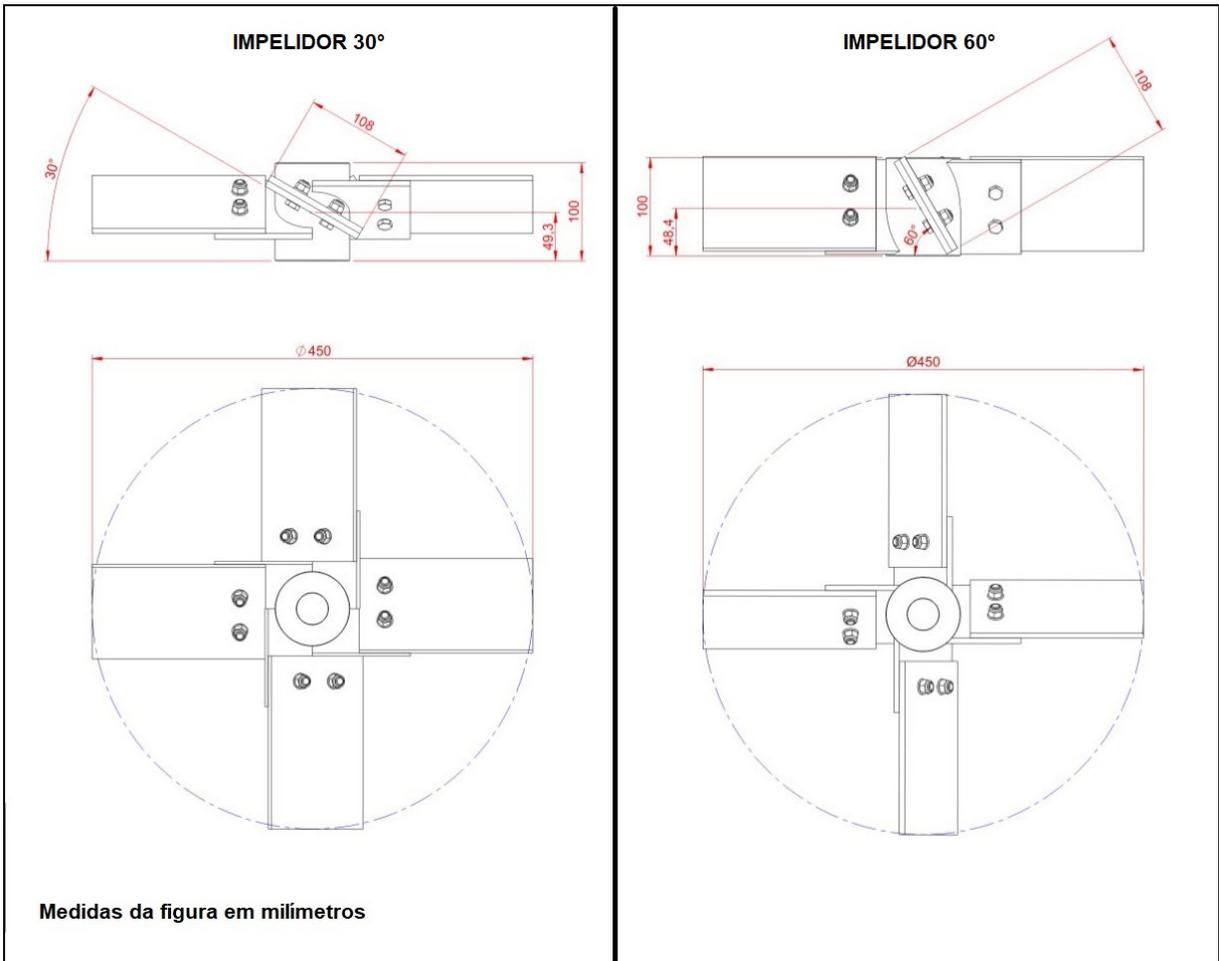
Figura 16: Projeto do tanque com sistema impelidor



Fonte: (VOLPATO, 2021)

Os outros dois impelidores (30° e 60°) foram fabricados com o mesmo material presente no restante do tanque, aço inox AISI304, e com a mesma espessura e comprimento do impelidor existente. O desenho técnico utilizado para fabricação de ambos é apresentado na Figura 17.

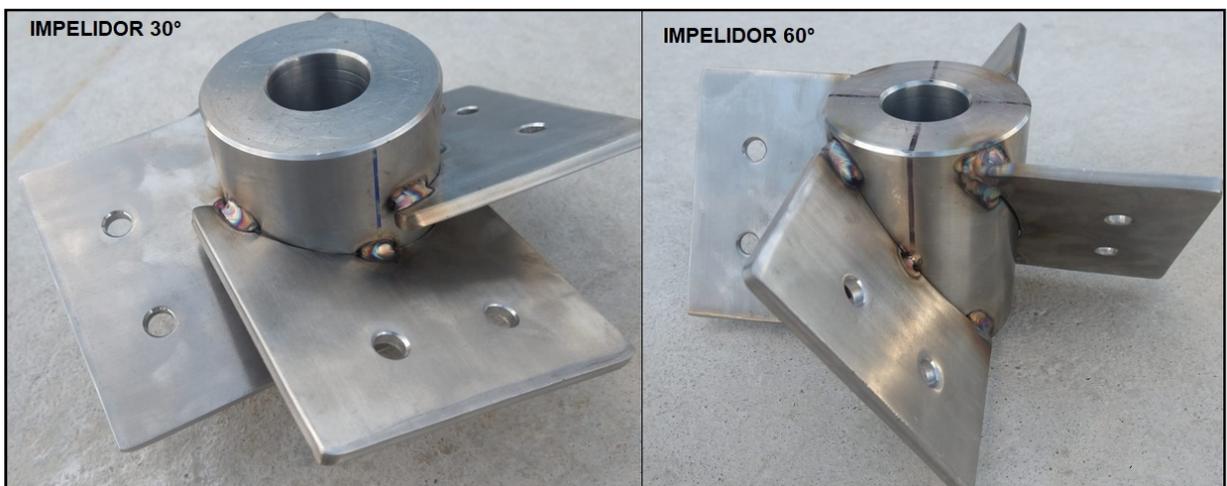
Figura 17: Modelagem 2D dos impelidores 30° e 60°



Fonte: Do autor

Na Figura 18 apresentam-se os dois impelidores fabricados:

Figura 18: Impelidores 30° e 60° fabricados



Fonte: Do autor

3.2 COLETA DOS DADOS

Em uma mistura de açúcar em água, foram realizados dois testes para cada inclinação de pá visando uma maior assertividade e credibilidade aos dados, totalizando seis testes de 15 minutos cada.

Para cada teste, o tanque foi preenchido com 200 litros de água e 10 quilogramas de açúcar (50 g/L), estes, despejados pela porta de inspeção superior de maneira suave, para que não ocorra mistura antes de partida do agitador.

3.2.1 Eficiência do processo de mistura

A eficiência da mistura é avaliada pela presença de partículas no fundo do tanque e pelo teor de açúcar na água, medido com um refratômetro. O índice de refração tem ligação direta com o grau de sacarose de uma mistura, desta forma, o refratômetro, por meio da escala Brix, indica qual dos impelidores trabalhou de forma mais eficiente na mistura do açúcar. Um grau Brix é equivalente a 1 g de açúcar para cada 100 g de solução (SLABOR, 2022).

O refratômetro utilizado é um modelo analógico da marca *Brewparts* (Figura 19), com escala Brix 0-32% e calibração de fábrica. Sua precisão é de $\pm 0,2\%$ Brix.

Para sua utilização, é necessário coletar a amostra do produto, colocar em seu prisma e fechar a capa plástica. O grau Brix, então, pode ser visto olhando pelo visor, de preferência apontando para um local iluminado.

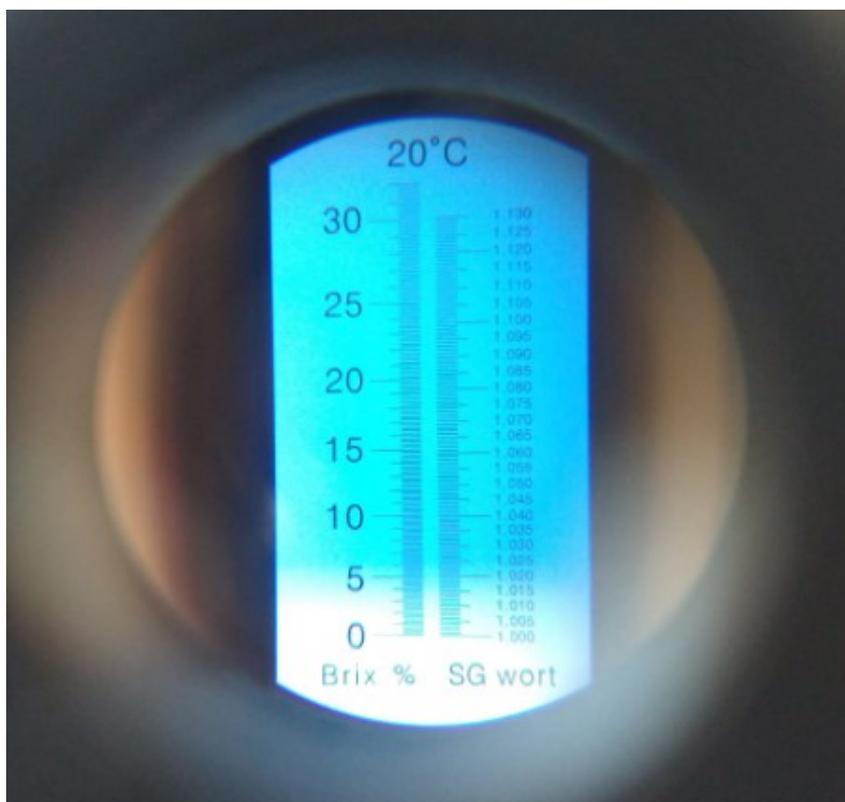
Figura 19: Refratômetro



Fonte: Do autor

O refratômetro utilizado ainda possui uma segunda escala, a *SG Wort*, utilizada para medição de densidade específica por meio da refração. Por sua vez, esta escala trabalha de 1,000 a 1,130. A Figura 20 demonstra o display visualizado ao olhar no visor.

Figura 20: Display do refratômetro



Fonte: Do autor

3.2.2 Monitoramento do consumo de energia elétrica

Para a coleta de dados do motor foi utilizado um CLP com IHM da *Unitronics*, disponível na *Águia Inox*. A medição da corrente (A) em função do tempo (s) permitiu gerar uma curva de consumo ao longo do processo e informando ao fim do período o consumo total nos quinze minutos de teste. Na Figura 21, pode ser visto o CLP.

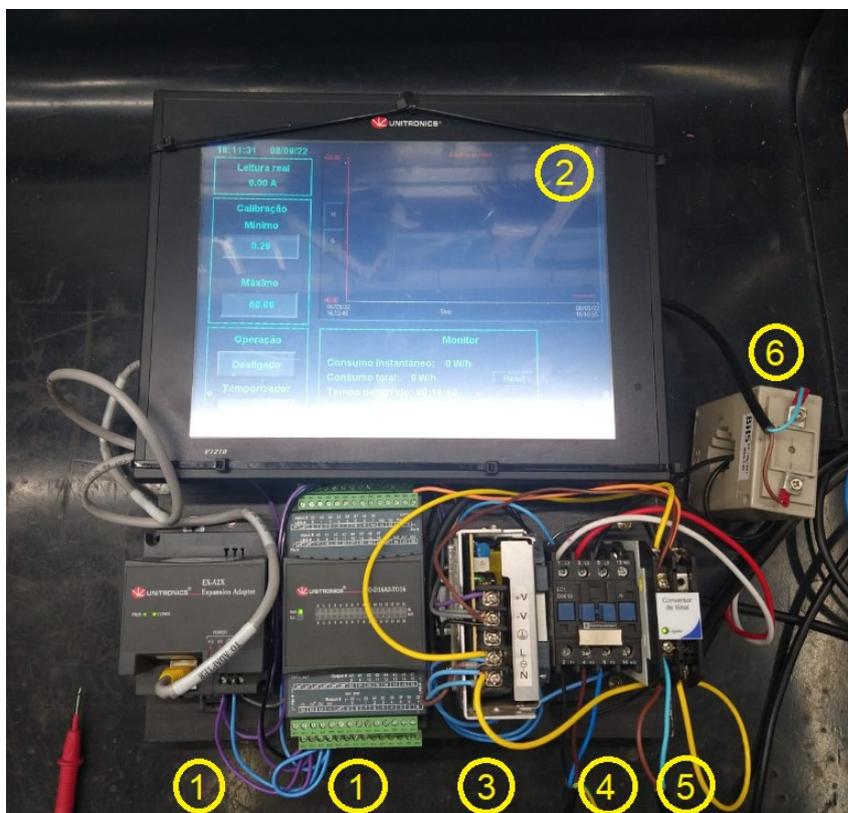
Figura 21: CLP



Fonte: Do autor

Desenvolveu-se um painel elétrico com os componentes necessários para fazer a ligação do motor ao CLP e garantir a comunicação entre eles. Na Figura 22, apresenta-se o painel com seus componentes.

Figura 22: Painel elétrico



Fonte: Do autor

Os componentes numerados na Figura 22 são nomeados e descritos na Tabela 2. As marcas utilizadas no estudo foram as disponibilizadas pela empresa Água Inox para realização do estudo.

Tabela 2: Componentes do painel elétrico

Item	Nome	Função
1	CLP	Processamento e controle das medidas de corrente obtidas do motor
2	IHM	Exibição e armazenamento dos dados coletados pelo CLP
3	Fonte de alimentação	Conversão de 220VCA para 24VCC
4	Contator	Acionamento e proteção do motor elétrico
5	Conversor de corrente	Conversão do sinal de entrada 0-5A para 4-20mA
6	Transformador de corrente	Conversão do sinal de entrada 0-50A para 0-5A

Fonte: Do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e comparados os resultados obtidos nos testes de inclinação de cada impelidor.

4.1 EFICIÊNCIA DA MISTURA

Como comentado anteriormente, o impelidor de pás inclinadas tem características de fluxo misto, isto é, gera fluxo axial e radial. Quanto menor a inclinação da pá, mais axial será o fluxo (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Neste projeto, pelo fato de o impelidor estar a 239mm do fundo do tanque, quando o recomendado é no máximo 187,5mm, o fluxo axial tende a não conseguir realizar uma varredura eficiente dos sólidos depositados ao fundo do tanque.

Desta forma, um fluxo com uma característica mais radial tende a ser mais eficiente, neste caso, por gerar um maior arraste de líquido, jogando-o contra a parede do tanque e levando-o próximo ao fundo uma turbulência que força as partículas depositadas à dissolução.

4.1.1 Análise da qualidade da mistura

Após a realização dos testes das três inclinações, todas em duplicada, apresentou-se deposição acentuada de partículas no fundo do tanque para a inclinação de 30°, em ambos os testes. Diferentemente, para os ângulos de 45° e 60° isto não ocorreu.

Esta diferença deve-se ao fato de o impelidor de 30° trabalhar com um fluxo majoritariamente axial, e, tendo em vista o afastamento acima do recomendado para um fluxo axial, do impelidor em relação ao fundo, este modelo não foi capaz de varrer o fundo do tanque.

Já os impelidores de 45° e 60°, por possuírem um fluxo radial mais presente, causaram maior arraste de líquido e, ao bater contra a parede do tanque, geraram turbulência no fundo, causando maior dissolução de partículas. Na Figura 23, pode-se analisar o fundo do tanque nas três inclinações.

Figura 23: Comparativo de deposição de partículas no fundo do tanque



Fonte: Do autor

O grau Brix coletado nos testes realizados corroboram o fato de o impelidor de 30° ter apresentado deposição no fundo do tanque. Pois, como pôde ser observado na Tabela 3, os impelidores de 45° e 60° apresentam valores de grau Brix próximos entre si e superiores aos valores do impelidor de 30°.

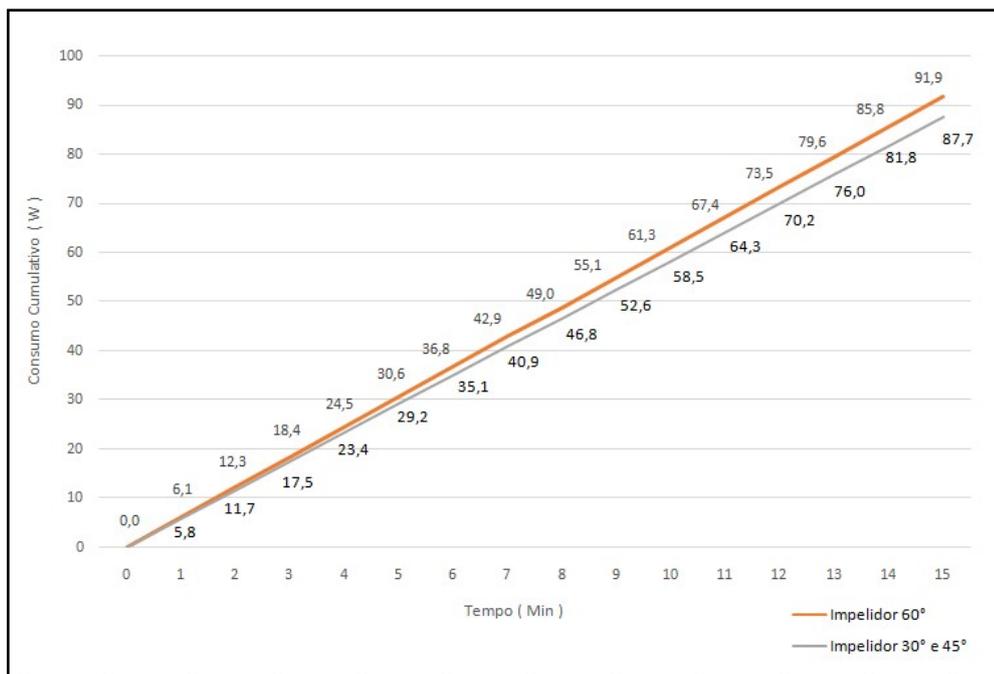
Tabela 3: Valores de grau brix coletados

Modelo de Impelidor	Teste 1	Teste 2	Média
30°	5° Bx	4,9° Bx	4,95° Bx
45°	6° Bx	5,8° Bx	5,9° Bx
60°	6° Bx	6,1° Bx	6,05° Bx

4.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO AGITADOR

Após a coleta dos dados de consumo do motor elétrico, observou-se que para todas as inclinações testadas geraram gráficos de comportamento linear, isto é, o motor não oscilou seu torque a ponto de aumentar a corrente ao longo do processo. Na Figura 24 apresenta-se o gráfico contendo os consumos coletados.

Figura 24: Consumo de energia cumulativa



Fonte: Do autor

Pelo fato de motor estar super dimensionado para a aplicação, tendo em vista que foi utilizado menos da metade da capacidade de volume do tanque e a mistura ser de açúcar com água, com uma viscosidade próxima a 1cP, a exigência de torque foi baixa, gerando gráficos iguais para os ângulos de 30° e 45°. Ao longo dos quinze minutos de processo, estes dois modelos consumiram 87,7 W.

Já o impelidor de 60° consumiu 91,9 W, cerca de 4,5% a mais que os outros dois impelidores, comprovando que quanto maior o ângulo de inclinação das pás presentes no impelidor, maior esforço do agitador para funcionar na rotação desejada, e, conseqüentemente, maior o consumo de energia elétrica.

A equidade de consumo entre o impelidor de 30° e 45° justifica-se pelo fato de que a diferença de esforço entre estes dois modelos foi insignificante a ponto de o CLP não identificar alteração de corrente.

4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Correlacionando os resultados de eficiência e consumo é possível verificar que o impelidor de 30° é inadequado para a aplicação, pois a medição do consumo energético não apresentou diferença perceptível em relação ao impelidor de 45° e uma eficiência de mistura consideravelmente inferior. Válido ressaltar que, o baixo rendimento do impelidor de 30° pode estar atrelado ao seu afastamento acima do recomendado do fundo do tanque.

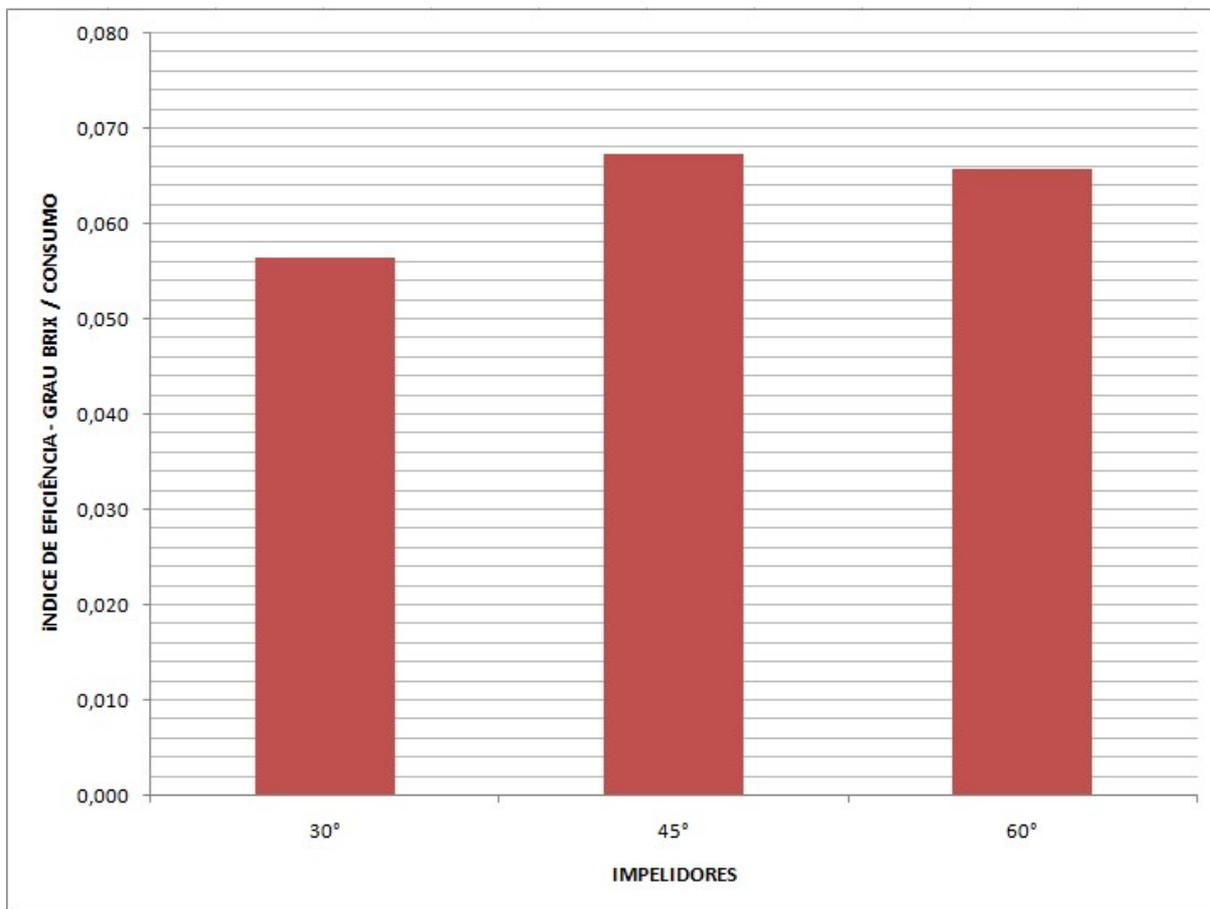
Da mesma forma pode-se verificar que o impelidor de 45° possui uma eficiência de mistura semelhante ao impelidor de 60°, sendo o de 60° levemente superior (em torno de 1,5%), com um consumo energético menor (cerca de 4,5% inferior). A redução no consumo energético justifica-se pela diminuição do volume de líquido que o impelidor de 45° movimenta, desta forma, exigindo menor esforço do motor.

Desta forma, conclui-se que o impelidor de 45° é o mais apropriado para este tipo de mistura, corroborando com o fato de esta inclinação ser a mais presente nos misturadores atuais.

Ao dividir o valor de grau Brix médio pelo consumo total de cada teste obteve-se um índice de eficiência. A Figura 25 demonstra de maneira visual, com

este índice no eixo das coordenadas, a comparação dos resultados e quais impelidores obtiveram melhores resultados.

Figura 25: Relação eficiência x consumo



Fonte: Do autor

5 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento dos testes e análise dos resultados, é possível concluir que, ao menos para este caso de mistura, a prática corrobora com o indicado na literatura, isto é, a utilização do impelidor 45° garante a eficiência do processo com um consumo energético 4,5% inferior ao consumo do impelidor de 60°.

O método utilizado para medir o consumo elétrico do motor, por meio da tomada de medidas instantâneas de corrente com o CLP, se mostrou eficiente para monitoramento de aumento ou diminuição de consumo durante o processo. Todavia, para o agitador em questão, por não haver diferença significativa na demanda de torque para cada inclinação, não foi possível diferenciar o consumo do impelidor de 30° e 45°.

O refratômetro se mostrou uma ferramenta muito eficiente e confiável para verificação do grau de açúcar da mistura, sem ele, não seria possível quantificar os testes, e, conseqüentemente, classificá-los de maneira confiável.

Tratando-se de misturas, é sempre importante fazer testes prévios antes de produção em larga escala, como recomenda a literatura. Isto se torna necessário, pois existem diversas variáveis no processo que podem alterar os resultados, como por exemplo, pressão, temperatura, viscosidade, tipo de substância a ser misturada, velocidade de rotação, diâmetro e inclinação dos impelidores e tempo de processo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o desenvolvimento e análise dos testes, sugerem-se as seguintes análises:

- Análise do sistema de agitação com a instalação de defletores, a fim de gerar um obstáculo para o fluxo e intensificar a mistura, verificando também o consumo elétrico.
- Para obtenção de resultados mais expressivos de consumo elétrico, acrescentar mais níveis de impelidores ao longo do eixo do agitador. Desta forma, o motor deverá realizar maior esforço e o consumo energético para cada inclinação será mais significativo.
- Alterar o soluto da mistura, a fim de verificar se há um comportamento padrão de mistura em relação a eficiência de processo e consumo energético.
- Analisar a eficiência de um impelidor com inclinação 30° ou inferior, isto é, predominantemente de fluxo axial, posicionado mais próximo ao fundo do tanque.

REFERÊNCIAS

ÁGUIA INOX. Disponível em: www.aguiainox.com Acesso em 19 de março de 2022.

ALMEIDA, Aline et al. **Avaliação de diferentes tipos de impelidores na taxa de transferência de calor e tempo de mistura em um biorreator de bancada.** Monografia (graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Ponta Grossa, 2021.

BATISTA, Carolina. **Misturas Homogêneas e Heterogêneas.** 2022. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/misturas-homogeneas-e-heterogeneas/#:~:text=Existem%20dois%20tipos%20de%20misturas,por%20pelo%20menos%20duas%20fases> Acesso em 05 de maio de 2022.

BERESTINAS, Gabriel. **Eficiência em equipamentos de agitação e mistura.** 2020. Disponível em: https://www.mixtecpro.com.br/blog_Eficiencia.html. Acesso em 23 de abril de 2022.

BRUNETI, Franco. **Mecânica dos fluidos.** 2ª ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall. 2008.

COKER, A. K. **Ludwid's applied process design for chemical and petrochemical plants.** 4ª ed. Burlington, MA. Gulf Professional Publishing. 2007.

DIAS, Diogo Lopes. **Tipos de misturas.** 2022. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/tipos-misturas.htm> Acesso em 25 de março de 2022.

FERREIRA, Victor Ricardo. **Coloides.** 2022. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/coloides.htm#:~:text=Os%20coloides%20são%20classificados%20como,nm%20%3D%2010-9%20m> Acesso em 28 de março de 2022.

FUSION FLUID EQUIPMENT. **RT6 Impeller.** Disponível em: <https://fusionfluid.com/products/mixing-impellers/rushton-turbine-6-blade-rt6> Acesso em 17 de maio de 2022.

HIBBELER, R. C. **Mecânica dos fluidos.** 1 ed. São Paulo. Pearson Education do Brasil. 2017.

KAUVIN AGITADORES. **Impelidores.** 2022. Disponível em: <https://www.kauvin.com.br/impelidores/> Acesso em 17 de maio de 2022.

PAUL, Edward L.; ATIEMO-OBENG, Victor; KRESTA, Suzanne M. **Handbook of industrial mixing: science and practice.** 1ª ed. John Wiley and Sons. 2004.

QUEIROZ, Rafael. **A influência do acabamento de superfície interna do tanque no número de potência de novos impelidores.** 50 f. Dissertação (mestrado) -

Universidade Estadual Paulista - UNESP, Faculdade de Engenharia, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91729?show=full> Acesso em 05 de julho de 2022.

SLABOR. Disponível em: www.splabor.com.br.com Acesso em 08 de agosto de 2022.

SOLUCOES INDUSTRIAIS. **Máquinas e Equipamentos**. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/reatinox/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/agitador-tipo-cowles> Acesso em 17 de maio de 2022.

SOUZA, Liria Alves de. **Misutras homogêneas e heterogêneas**. 2022. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/misturas-homogeneas-heterogeneas.htm> Acesso em 10 de maio de 2022.

VOLPATO, Édson Luís. **Análise da influência de um sistema de agitação vertical no tempo de aquecimento de água de um reservatório em aço inox**. 45f. Monografia (graduação) -Universidade de Caxias do Sul – UCS. Bento Gonçalves. 2021.

ZANUTTO, Adriane. **Estudo experimental da agitação intermitente em reator batelada**. Universidade Tecnológica do Paraná. UTFPR. 2020