

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS DA NATUREZA E DE TECNOLOGIA – CENT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ÉDSON LUÍS VOLPATO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE AGITAÇÃO VERTICAL NO
TEMPO DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO EM AÇO INOX**

BENTO GONÇALVES

2021

ÉDSON LUÍS VOLPATO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE AGITAÇÃO VERTICAL NO
TEMPO DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO EM AÇO INOX**

Trabalho de conclusão de curso II (MEC 0291),
apresentado como requisito parcial à conclusão do curso
de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Matheus Poletto.

BENTO GONÇALVES

2021

ÉDSON LUÍS VOLPATO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE UM SISTEMA DE AGITAÇÃO VERTICAL NO
TEMPO DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO EM AÇO INOX**

Trabalho de conclusão de curso II (MEC 0291),
apresentado como requisito parcial à conclusão do curso
de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Matheus Poletto.

Aprovado em: 25/11/2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Matheus Poletto

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Cesar Aguzzoli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por me motivar a continuar lutando pelos meus objetivos. Aos meus pais, Diomar e Nelcir, que foram peças-chave em toda a minha graduação e sem eles este sonho jamais seria realidade. Agradeço também a minha namorada Letícia por todo o apoio e paciência nesta etapa final da graduação, aos meus amigos e colegas de trabalho que me acompanharam ao longo desta trajetória. A Águia Inox e a todos os seus excelentes funcionários que apoiaram e viabilizaram este estudo, em especial ao Srs. Alex Conci, Leandro César Soccol e Airton Slodkowski. Por fim, mas não menos importante, deixo meu muito obrigado aos meus orientadores, Prof. Me. André Carlos Contini e ao Prof. Dr. Matheus Poletto, pela inspiração, pelos conselhos e dicas ao longo do trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

Sistemas de agitação são amplamente utilizados na indústria devido às suas diversas formas construtivas e versatilidade de aplicação, que variam desde homogeneização de mistura até evitar a solidificação do líquido armazenado. Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da temperatura da água ao longo do tempo quando submetida à ação de um agitador, comparando resultados teóricos e práticos. Os resultados experimentais foram extraídos através da construção de um equipamento em escala real, modificando um tanque existente para possuir as características necessárias para o estudo. Analiticamente, foram compiladas as equações clássicas de transferência de calor em uma planilha eletrônica com os mesmos dados de entrada presentes no experimento, tais como diâmetro, volume e materiais. Teoricamente, os resultados do tempo de aquecimento convergiram com os valores práticos obtidos e os coeficientes relevantes para a transferência de calor alteraram de maneira proporcional a intensidade imprimida pelo agitador no fluido armazenado. Experimentalmente, para as condições propostas no presente estudo, a utilização do sistema de agitação apresentou maiores valores de tempo quanto maior era a velocidade de rotação. Desta forma, acredita-se que a baixa velocidade de rotação aplicada impulsionou a perda de energia térmica, contrariando resultados encontrados por outros autores que utilizaram maiores velocidades e obtiveram ganhos na eficiência térmica.

Palavras-chave: Agitação, Transferência de Calor, Rotação.

ABSTRACT

Mixing systems are widely used in industry due to their different constructive variations and application versatility, which range from mixing homogenization to avoiding solidification of the stored liquid. This work aims to evaluate the behavior of water temperature over time when subjected to the action of an impeller, comparing theoretical and practical results. The experimental results were extracted through the construction of a real-scale equipment, adapting an existing tank to have the necessary characteristics for the study. Analytically, the classical heat transfer equations were combined in an electronic spreadsheet with the same input data present in the experiment, such as diameter, volume and materials. Theoretically, the heating time results converged with the practical values obtained and the relevant coefficients for heat transfer increased proportionally to the intensity created by the mixer in the stored fluid. Experimentally, for the conditions proposed in this study, using the mixing system presented greater time values as higher was the rotation speed. Therefore, it is believed that the low rotation speed applied boosted the loss of thermal energy, contradicting results found by other authors who used higher speeds and obtained gains in thermal efficiency.

Keywords: Mixing, Heat Transfer, Rotation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica de alguns materiais (300K)	13
Tabela 2 - Número de Prandtl para alguns materiais (300K)	14
Tabela 3 – Coeficientes de convecção natural para alguns materiais.....	16
Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor para tanques agitados	17
Tabela 5 - Classes e alguns modelos de impelidores.....	19
Tabela 6 - Dados do conjunto motor-reductor	25
Tabela 7 - Descritivo dos itens presentes no painel elétrico.....	32
Tabela 8 – Parâmetros teóricos obtidos para as rotações avaliadas neste estudo.....	36
Tabela 9 - Análise de precisão experimental.....	38
Tabela 10 - Resultados experimentais obtidos com a variação da velocidade de agitação.....	39
Tabela 11 - Comparativo entre rotação e tempo de aquecimento em trabalhos correlatos	40
Tabela 12 – Comparativo entre os tempos obtidos por meio da análise teórica e experimental	41

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo de calor em uma parede plana de espessura Δx e área A.	12
Figura 2 - Desenvolvimento da camada-limite de velocidade sobre uma placa plana.....	15
Figura 3 - Transição na camada-limite de convecção natural em uma placa vertical	16
Figura 4 - Impelidores de fluxo axial	20
Figura 5 - Sistemas de Agitação A (esquerda) e B (direita).....	21
Figura 6 - Fluxograma de etapas desenvolvidas.....	22
Figura 7 - Projeto 3D do protótipo de estudo	23
Figura 8 – Protótipo de estudo finalizado.....	24
Figura 9 - Projeto mecânico da hélice	26
Figura 10 – Hélice de quatro pás inclinadas construída	26
Figura 11 - Distribuição de temperaturas em uma parede cilíndrica composta	27
Figura 12 - Fluxograma do memorial de cálculo	29
Figura 13 – Conexão com rosca (esquerda) e resistor elétrico (direita).....	30
Figura 14 - Vista interna do reservatório.....	31
Figura 15 - Esquematização painel elétrico.....	31
Figura 16 - Painel elétrico construído para o experimento.....	32
Figura 17 - Posição original do sensor de temperatura	33
Figura 18 - Sensor flexível superior	34
Figura 19 - Erro de leitura com sensor de temperatura instalado na parte superior do tanque	34
Figura 20 - Poço seco para instalação de sensor	35
Figura 21 – Construção (esquerda) e instalação (direita) do poço seco	35
Figura 22 – Curvas de aquecimento da água obtidas através do experimento	38

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície	[m ²]
H	Altura de batelada ou altura de fluido armazenado	[m]
L	Altura paralela entre a pá do impelidor e o eixo de rotação	[m]
L_s	Altura paralela padrão entre a pá do impelidor e eixo de rotação	[m]
C_p	Calor específico	[J/(kgK)]
k	Coefficiente de condutividade térmica do material	[W/(mK)]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/(m ² K)]
L_c	Comprimento característico	[m]
i	Corrente elétrica	[A]
D	Diâmetro do impelidor	[m]
τ	Diâmetro do tanque	[m]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
\dot{E}_{ent}	Potência que entra no volume de controle	[J/s]
\dot{E}_{acum}	Potência que é acumulada no volume de controle	[J/s]
\dot{E}_{sai}	Potência que é emitida pelo volume de controle	[J/s]
\dot{E}_{ger}	Potência gerada no interior do volume de controle	[J/s]
G_c	Fator de correção geométrica	[-]
q_{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção	[W]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
m	Massa de produto armazenada	[kg]
Nu	Número de Nusselt	[-]
Pr	Número de Prandtl	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
μ_R	Razão de viscosidades	[-]
R	Resistência elétrica	[Ω]
R_{eq}	Resistência térmica equivalente	[K/W]
q_x	Taxa de transferência de calor	[W]
T_∞	Temperatura do fluido	[K]
T_s	Temperatura da superfície	[K]
ΔV	Tensão elétrica	[V]
v	Velocidade de escoamento	[m/s]

N	Velocidade de rotação do impelidor	[rps]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_b	Viscosidade dinâmica do fluido no centro do reservatório	[Pa.s]
μ_w	Viscosidade dinâmica do fluido na parede do reservatório	[Pa.s]
V	Volume de líquido	[m ³]

LISTA DE ABREVIACOES

ABIA	Associação Brasileira da Indústria de Alimentos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geopolítica e Estatística
4BP	<i>Four Pitched Blade</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
IHM	Interface Homem-Máquina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	PROJETO DE PESQUISA.....	9
2.1	TEMA.....	9
2.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	9
2.3	OBJETIVO GERAL.....	10
2.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO.....	11
3.1	CONSERVAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA.....	11
3.2	CONDUÇÃO TÉRMICA.....	12
3.3	CONVECÇÃO TÉRMICA.....	13
3.3.1	Adimensionais relacionados.....	13
3.3.2	Convecção natural.....	16
3.3.3	Convecção forçada.....	17
3.4	AGITAÇÃO E MISTURA.....	18
3.4.1	Impelidores de Fluxo Axial.....	19
4	TRABALHOS CORRELACIONADOS.....	21
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
5.1	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	23
5.1.1	Sistema de Agitação.....	24
5.2	CÁLCULO ANALÍTICO.....	27
5.2.1	Metodologia de cálculo considerações.....	28
5.3	CONSTRUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	30
5.3.1	Princípio de Funcionamento e Melhorias.....	32
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6.1	RESULTADOS TEÓRICOS.....	36
6.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	37

6.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TEORIA E PRÁTICA.....	40
7	CONCLUSÃO.....	42
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Em 2018, segundo o IBGE, a fabricação de tanques, reservatórios metálicos e caldeiras para aquecimento central faturou aproximadamente 2,265 bilhões de reais. O crescimento da caldeiraria no Brasil está diretamente ligado com crescimento das indústrias dos ramos de bebidas, alimentos e produtos químicos, pois os reservatórios participam de todas as etapas do processo produtivo, direta ou indiretamente. Segundo a ABIA, no ano de 2020, a indústria brasileira de alimentos e bebidas registrou faturamento de 789,2 bilhões de reais, 12,8% a mais do que o ano anterior.

Devido a sua versatilidade de aplicação, os tanques reservatórios possuem variáveis construtivas que se adaptam à necessidade do comprador. Eles podem ser fabricados com diversos materiais, como aço inox, aço carbono, concreto e polipropileno. Armazenam diversos produtos variados, como bebidas, cosméticos, fármacos e alimentos, em distintas condições de trabalho. Podem ser projetados para trabalhar sob pressão atmosférica ou pressões elevadas, possuir sistema de aquecimento/resfriamento e sistemas de agitação.

O processo de agitação pode ser definido como movimentar o produto contido em reservatórios de armazenagem, onde a fase da mistura gerada deve permanecer homogênea ao longo de todo o tanque, garantindo que a mesma não sofra alterações durante o tempo de estocagem (JEFFERSON,2019).

Este trabalho visa analisar a influência que um sistema de agitação vertical superior gera no tempo aquecimento de água de um reservatório, por meio de experimentos práticos e também utilizando um cálculo analítico teórico. Serão propostas quatro situações distintas: Aquecimento sem agitação; aquecimento com agitação em rotações de 21,5, 43,0 e 64,5 rpm. Espera-se também que a metodologia desenvolvida possa servir como ferramenta de projeto para melhor funcionamento de tanques com agitação.

2 PROJETO DE PESQUISA

Este capítulo demonstra os assuntos referentes ao tema, justificativa do tema, objetivo geral, objetivos específicos e ambientes de realização do trabalho.

2.1 TEMA

Influência de um sistema de agitação no tempo de aquecimento de água de um reservatório.

2.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A Água Inox é uma empresa do ramo de caldeirarias que apresenta crescimento consecutivo nos últimos anos. Em 2020, ela registrou um faturamento de 55,52 milhões de reais, crescendo 11,4% em relação ao ano de 2019. Foram produzidos neste período 323 tanques, dentre eles 130 (40,2%) possuíam algum tipo de agitação e 64 (19,8%) possuíam sistemas de agitação e aquecimento combinados.

Diversos podem ser os motivos pelos quais a Água Inox se destaca no mercado em que atua. A competitividade que a empresa possui é reflexo dos diversos investimentos realizados no decorrer dos anos, principalmente na área da Engenharia de Projeto, o cérebro do processo fabril. Softwares de cálculo, modelagem e simulação que são atualizados anualmente garantem precisão dimensional e integridade estrutural, buscando sempre o menor custo de fabricação.

Entretanto, o método utilizado na empresa para dimensionamento de sistemas de agitação e a sua correlação com outros processos (sistemas de aquecimento, por exemplo) segue em descompasso com os demais, pois o software disponível apresenta os resultados, mas não a metodologia de cálculo utilizada, além de não levar em consideração fatores externos que influenciam na mistura. Desta forma, a análise dos dados de saída é limitada e não é possível avaliar se a solução proposta é a melhor ou se está de acordo com o que se pretende projetar.

Baseada na incerteza da resposta oferecida pelos softwares utilizados pela Água inox para este tipo de dimensionamento, tem-se a justificativa deste estudo. O trabalho proposto pode se tornar uma ferramenta auxiliar para decisões futuras no dimensionamento de novos tanques produzidos pela empresa.

2.3 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência que um sistema de agitação vertical gera no tempo de aquecimento de água em um reservatório de aço inox.

2.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obter analiticamente o tempo de aquecimento de água sem sistema de agitação.

Calcular analiticamente o tempo de aquecimento de água com a presença de um sistema de agitação vertical nas velocidades de rotação 21,5 rpm, 43,0 rpm e 64,5 rpm.

Extrair os tempos de aquecimento experimentais nas quatro situações propostas, sem agitação, agitação vertical com rotação de 21,5 rpm, 43,0 rpm e 64,5 rpm, por meio da construção de um equipamento em escala real.

Confrontar os valores calculados com os dados experimentais a fim de validar a utilização da metodologia de cálculo construída para futuros dimensionamentos.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que serve como base teórica para o estudo proposto. Serão apresentados os tópicos relevantes à conservação de energia térmica, processos de transferência de calor e suas aplicações, mecânica de fluidos e sistemas de mistura.

3.1 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

O princípio de conservação de energia estabelecido pela primeira lei da termodinâmica define a conservação de energia total do sistema, sob forma de energia mecânica e energia interna. Esta última, por sua vez, pode ser dividida em energia térmica, nuclear e química. Partindo deste princípio, a única forma que esta quantidade de energia pode variar em um sistema fechado é através de transferência de calor por suas fronteiras ou por um trabalho realizado no sistema ou pelo sistema (INCROPERA; BERGMAN; LAVINE, 2019). Para um tanque, o balanço de energia em regime permanente pode ser representado pela Equação 1:

$$\dot{E}_{acum} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_{ger} \quad (1)$$

Essa equação demonstra que a taxa de aumento de energia acumulada pelo sistema é igual a diferença entre as taxas de energia que entram e saem, somada a taxa de energia gerada dentro das fronteiras do volume de controle. As energias que entram e que são emitidas do sistema são um fenômeno ligados ao processo que acontece na superfície do volume de controle, como por exemplo perdas por convecção entre o líquido e as paredes do recipiente.

Já a geração de energia é um fenômeno volumétrico que está ligado à transformação de energia química, elétrica, magnética ou nuclear em energia térmica ou mecânica, dentro dos limites do volume de controle. Um exemplo comum para tal energia gerada é o aquecimento resistivo, que converte energia elétrica em térmica, quando uma corrente elétrica passa por um condutor. A taxa de energia elétrica dissipada no interior do volume de controle sob a forma de energia térmica é definida pela Equação 2:

$$\dot{E}_g = i^2 R = \Delta V \cdot i \quad (2)$$

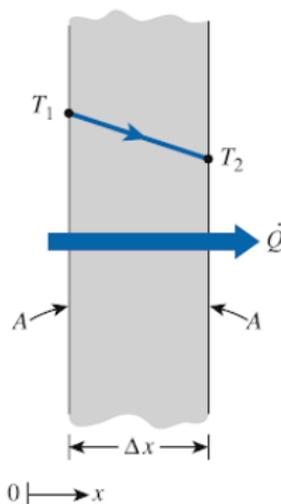
3.2 CONDUÇÃO TÉRMICA

Condução térmica é definida como o fluxo de energia que ocorre a partir das partículas mais energéticas de um corpo ou substância para partículas vizinhas menos energéticas. Esta condução pode ocorrer em corpos sólidos, líquidos ou gasosos (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A transferência de calor ocorre, necessariamente, através da diferença de temperatura entre os corpos em contato. Além disso, a taxa de transferência de calor por condução térmica depende da geometria e do material.

No estado fluido, devido ao espaço entre as moléculas ser muito maior, o trânsito de energia térmico é menor, assim, a condutividade térmica dos fluidos é geralmente inferior à dos sólidos (INCROPERA; BERGMAN; LAVINE, 2019). A Figura 1 apresenta o fluxo de calor entre duas superfícies planas, do lado mais energético para o lado menos energético, em uma distância Δx .

Figura 1 - Fluxo de calor em uma parede plana de espessura Δx e área A .



Fonte: ÇENGEL; GHAJAR (2012)

A Equação 3 apresenta a taxa de transferência de calor por condução de calor entre duas paredes planas:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

Onde k é a condutividade térmica do material. A Tabela 1 apresenta valores de condutividade térmica de alguns materiais que serão abordados no presente estudo.

Tabela 1 - Condutividade térmica de alguns materiais (300K)

Material	W/mK
Aço inox AISI 304	14,9
Ar	0,0260
Lã de Rocha (manta)	0,0400
Água (líquido saturado)	0,607
Espuma de Poliuretano	0,0230

Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

3.3 CONVECÇÃO TÉRMICA

Quando o movimento de massa ou fluido é nulo, a transferência de calor ocorre através da condução térmica entre os corpos. Na convecção térmica, que ocorre entre uma superfície e um fluido (líquido ou gasoso), são combinados efeitos de movimento do fluido com a condução térmica. Desta forma, convecção está diretamente ligada à velocidade de movimentação do fluido e, quanto maior for o movimento, maior será a transferência de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A Equação 4 permite calcular a taxa de transferência de calor por convecção térmica (lei de Newton do resfriamento):

$$q_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

O termo h é o coeficiente de transferência de calor e é uma propriedade do fluido obtido geralmente por correlações extraídas experimentalmente. O seu valor está diretamente ligado com os fatores que influenciam na taxa de transferência de calor, como natureza do fluido, velocidade de deslocamento e geometria da superfície (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.3.1 Adimensionais relacionados

O número de Nusselt é o coeficiente utilizado para obtenção do coeficiente de convecção do fluido a ser estudado, levando em consideração seu comprimento característico, seu coeficiente convectivo e a condutividade térmica do fluido. Para a camada limite térmica, o número de Nusselt corresponde ao que o coeficiente de atrito representa para a camada limite

de velocidade (INCROPERA; BERGMAN; LAVINE, 2019). A Equação 5 permite a obtenção do valor numérico deste adimensional:

$$Nu = \frac{hL_c}{k_f} \quad (5)$$

O número de Prandtl é outro adimensional relevante para obtenção do coeficiente h , visto que ele é uma propriedade do fluido. Através do número de Prandtl é possível mensurar a efetividade de transporte, por difusão, de momento da camada limite de velocidade e energia térmica (INCROPERA; BERGMAN; LAVINE, 2019). Seu valor tem influência no crescimento relativo das camadas-limite térmica e de velocidade. Quando o número de Prandtl é menor que 1, o desenvolvimento da camada-limite de velocidade é mais lento que o desenvolvimento a camada-limite térmica, ou seja, o calor se difunde mais facilmente se comparado a velocidade de escoamento (metais líquidos, por exemplo). Já em fluidos como óleos, a difusividade térmica é menor, com Prandtl maior que 1. O valor numérico para este adimensional é calculado pela Equação 6:

$$Pr = \frac{\text{Difusividade de quantidade de movimento}}{\text{Difusividade térmica}} = \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k_f} \quad (6)$$

O número de Prandtl para os fluidos abordados neste trabalho podem ser vistos na Tabela 2. Mais detalhes de outros materiais podem ser vistos em: Incropera, Bergman e Lavine (2019).

Tabela 2 - Número de Prandtl para alguns materiais (300K)

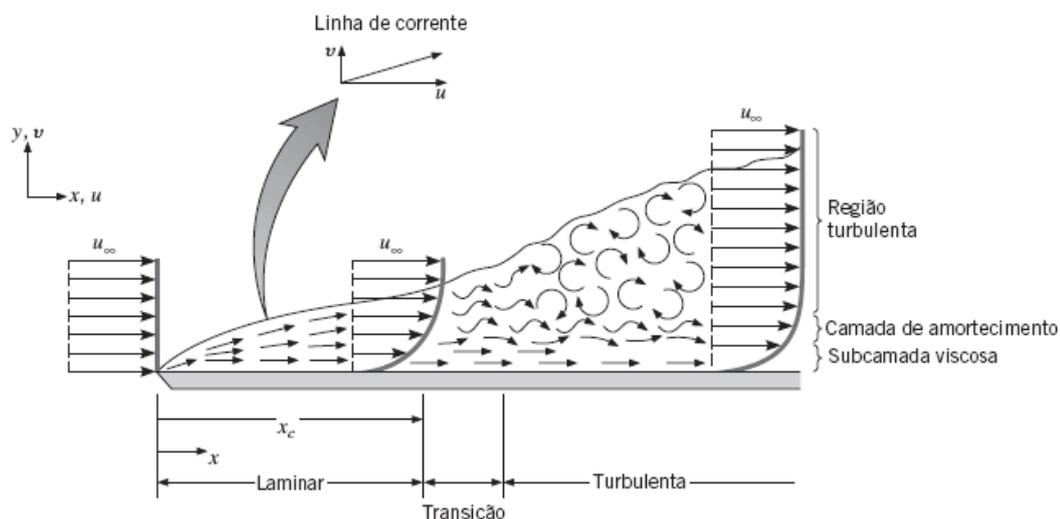
Material	Pr
Ar	0,707
Água	5,83

Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

O número de Reynolds é um adimensional resultante do estudo de Osborn Reynolds, que chegou a uma relação entre a velocidade de escoamento do fluido e de suas forças, inerciais e viscosas. Segundo Incropera, Bergman e Lavine (2019), se as forças inerciais são de menor intensidade, os distúrbios gerados são extintos e o escoamento permanece laminar, caso

contrário, ocorre a transição para um regime turbulento (Reynolds elevado), conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Desenvolvimento da camada-limite de velocidade sobre uma placa plana.



Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

O cálculo utilizado para obtenção do número de Reynolds leva em consideração a densidade e/ou viscosidade do fluido, a velocidade de escoamento e o comprimento característico da superfície onde o fluido está escoando, conforme apresentado na Equação 7.

$$Re = \frac{vL_c}{\nu} = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (7)$$

Para fluxos em tubos, a linha de transição entre laminar e turbulento ocorre com número de Reynolds na faixa 2000 até 4000. Para tanques misturadores, o cálculo para número de Reynolds é modificado, e o valor de transição varia dependendo da potência e do número de impelidores, mas fica entre 50 e 5000 (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004). Assim, sua fórmula para cálculo é modificada, conforme Equação 8:

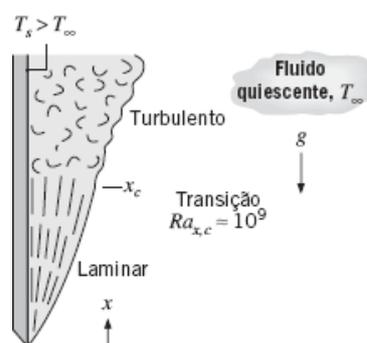
$$Re = \frac{ND^2\rho}{\mu} \quad (8)$$

Onde N e D estão ligados com as características do impelidor da agitação, velocidade de rotação e diâmetro externo, respectivamente.

3.3.2 Convecção natural

Na convecção natural, o movimento do fluido é resultante da atuação de forças flutuantes induzidas pela diferença de densidades, que ocorrem geralmente devido à variação de temperatura do fluido e uma força de corpo proporcional a massa específica (INCROPERA; BERGMAN; LAVINE, 2019). Vale ressaltar que a camada-limite de convecção natural não é restringida para um escoamento laminar, pois distúrbios no escoamento do fluido podem ser intensificados (relativas das forças viscosas e de empuxo), levando a transição do escoamento laminar para turbulento, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Transição na camada-limite de convecção natural em uma placa vertical



Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

No presente estudo, a convecção natural é aplicada em cenários com o reservatório sem ação de um sistema de agitação, com um fluxo de calor através de suas paredes para o ambiente. Devido às limitações experimentais enfrentadas, não foi possível quantificar algumas variáveis importantes para a obtenção dos coeficientes de convecção natural (temperatura da superfície do tanque, por exemplo). Assim, serão utilizados valores de referência, conforme apresenta a Tabela 3:

Tabela 3 – Coeficientes de convecção natural para alguns materiais

Material	h [W/m ² k]
Ar	5,0
Água	50

Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

3.3.3 Convecção forçada

A convecção forçada é ocasionada pela atuação de meios externos, como uma bomba ou ventilador (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Ela é encontrada em diversas aplicações industriais, como trocadores de calor e turbinas a vapor. Vale ressaltar que na ocorrência de convecção forçada, a convecção natural também está presente, devido ao gradiente de temperaturas gerado durante o processo. Apesar de a literatura exemplificar a possibilidade de ocorrência de convecção forçada em superfícies externas, este trabalho irá considerar que a transferência de calor na superfície externa do reservatório se dará por convecção natural, enquanto na superfície interna ambas serão consideradas.

Para o presente estudo, o meio externo causador da convecção forçada na água armazenada é o sistema de agitação instalado no tanque. Baseado na bibliografia consultada para este trabalho referente ao dimensionamento de sistemas de agitação (Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), o cálculo para obtenção do número de Nusselt sofre algumas modificações a partir da equação original, levando em considerações a geometria do reservatório e possíveis gradientes de viscosidades do fluido, conforme mostra a equação 9:

$$Nu = K \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot \mu_R^c \cdot G_c \quad (9)$$

Os valores de K e dos expoentes a, b e c estão ligados diretamente ao tipo de impelidor. Neste trabalho, o objeto escolhido para análise será uma agitação do tipo 4BP, cujos valores destes coeficientes estão apresentados na Tabela 4. Como o sistema de aquecimento por resistores elétricos não era uma das opções disponíveis na literatura para este cálculo, a superfície de aquecimento que será adotada é a do fundo do tanque, pois o resistor será instalado em uma posição e inclinação que não causará influência no deslocamento do fluido, semelhante ao comportamento de serpentinas externas.

Tabela 4 - Coeficientes de transferência de calor para tanques agitados

Impelidor	Superfície de Aquecimento	Re	K	a	b	c
4BP	Fundo	>100	1,08	2/3	1/3	0,14

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

A razão de viscosidades μ_R mede o gradiente de viscosidades que pode existir entre o centro e a parede do tanque. Ao mesmo tempo, G_C é um fator de correção geométrico, que analisa a diferença entre as recomendações construtivas para um agitador e as medidas adotadas em projeto, levando em considerações diâmetro do tanque, volume a ser processado e dimensões do impelidor. As equações que definem ambos os termos estão descritos na Equação 10 e na Equação 11, respectivamente:

$$\mu_R = \frac{\mu_b}{\mu_w} \quad (10)$$

$$G_c = \left[\frac{1}{\left(\frac{H}{\tau}\right)} \right]^{0,15} \left[\frac{L}{L_s} \right]^{0,2} \quad (11)$$

Para a Equação 11, o coeficiente H é definido como altura de batelada ou altura de fluido presente no reservatório. Seu cálculo leva em consideração a massa e densidade fluido armazenado e o diâmetro interno do tanque, conforme Equação 12:

$$H = \left(\frac{m}{\rho}\right) / \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \quad (12)$$

3.4 AGITAÇÃO E MISTURA

O processo de mistura pode ser definido como diminuição de sua heterogeneidade, visando o resultado de um processo desejado. Esta variação pode ser proveniente de diferenças de concentração, temperatura e fase. Efeitos secundários são os objetivos críticos deste processo, como reações químicas e transferência de calor (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA; 2004). Esta mistura pode ser líquido-sólido, líquido gás, líquidos miscíveis, líquidos imiscíveis ou somente movimentação de fluido.

Segundo Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), o processo de mistura é uma peça chave no processo produtivo em diversas indústrias, tais como petroquímicas, biotecnologia, alimentação, bebidas, cosméticos, água potável, tintas, farmacêutica, etc. Desta forma, o sistema de agitação é dimensionado para promover a circulação do fluido em todo o corpo interno do reservatório e garantir que a mistura possua as mesmas características físico-

químicas homogêneas ao longo de todo o tanque. Caso o processo requirite adição ou remoção de calor do fluido, o tanque é equipado com mecanismos de transferência de calor, como serpentinas internas, serpentinas externas e resistores elétricos. O movimento do fluido gerado pela ação do agitador melhora a troca convectiva e potencializa a homogeneização térmica (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

A Tabela 5 apresenta as principais classes e os tipos de impelidores utilizados na indústria, tanto para misturas na fase de transição quando em regime turbulento. Neste ponto vale ressaltar que o sistema de agitação escolhido pode ser instalado em diversas posições do tanque, no topo, fundo ou lateral, central ou descentralizada, vertical, horizontal também inclinada. Além disso, as características construtivas do reservatório também influenciam na eficiência dos impelidores, como formato do fundo e presença de defletores (quebra-vórtices).

Tabela 5 - Classes e alguns 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)

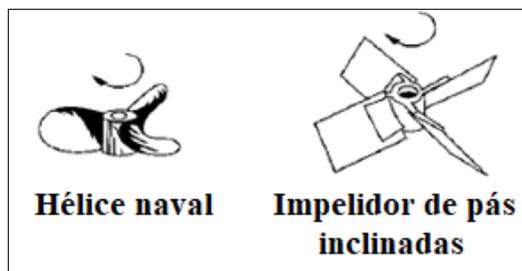
3.4.1 Impelidores de Fluxo Axial

Os impelidores de fluxo axial são empregados na indústria em processos que requerem transferência de calor e mistura para fluidos de baixa e média viscosidade, onde a rotação do agitador direcione o fluxo de fluido para o fundo do tanque. Já, para aplicação em dispersão de gás ou mistura de sólidos flutuantes, o fluxo no sentido inverso é mais eficiente. (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O primeiro modelo desenvolvido para este tipo impelidor é a hélice naval, que pode ser instalada tanto na lateral de tanques grandes quanto no teto de tanques pequenos. Este tipo de hélice é usado na indústria de laticínios, por exemplo, em agitadores para grandes tanques de armazenamento de leite, garantindo que o fluido não sofra alterações físico-químicas durante o período de estocagem.). Por ser fabricada originalmente por forjamento, a hélice naval não é empregada em grandes dimensões devido ao seu elevado peso, custo de fabricação e dificuldade de instalação/manutenção (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Atualmente, as turbinas de pás inclinadas são formadas através da união, por solda ou uniões parafusadas, entre um cubo central usinado e chapas igualmente distribuídas ao longo da superfície do cubo, constituindo um sistema mais leve que uma hélice naval de mesmo diâmetro. Estas pás podem ser posicionadas com qualquer ângulo de inclinação (geralmente 45°), em relação a horizontal, gerando assim componentes de fluxo axial e radial, sendo considerado um impelidor de fluxo misto (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004). A Figura 4 ilustra os dois tipos de impelidores de fluxo axial descritos anteriormente, uma hélice naval e um impelidor de pás inclinadas, respectivamente.

Figura 4 - Impelidores de fluxo axial



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

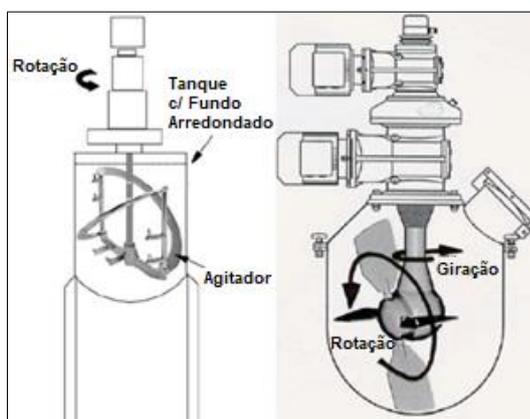
4 TRABALHOS CORRELACIONADOS

A evolução constante da indústria está diretamente ligada ao domínio dos fenômenos físicos envolvidos no processo de fabricação. É evidente que as empresas e universidades despendam tempo e recursos a fim de obter melhores equipamentos. Desta forma, estudos relacionados com sistemas de agitação e mistura e/ou sistemas de aquecimento em reservatórios são alvo constante de estudos, dada a importância que estes têm no processo produtivo.

Arfelli (2009) desenvolveu um trabalho referente ao projeto mecânico e análise térmica de tanques com agitação, tendo como fluido de teste xarope de açúcar cristal. Utilizando o software de simulação Geopack, o trabalho mostrou que o coeficiente global de troca térmica é inversamente proporcional a relação D/τ (diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque). Desta forma, quanto menor for o diâmetro do impelidor em relação do diâmetro do tanque, maior é o coeficiente global de troca térmica (para um mesmo o nível de agitação, com maior rotação).

Sob outra perspectiva, Delaplace et al. (2004) comparou o tempo de mistura de uma solução viscosa em dois sistemas de agitação distintos, A e B, como pode-se observar na Figura 5. O sistema A foi combinado por uma agitação helicoidal e uma do tipo âncora, convencionais. Já o sistema B foi desenvolvido para a análise, e combinava movimentos de rotação e giração. Os melhores resultados foram obtidos com a agitação B, com 82 segundos para atingir de 90% de homogeneidade, 26 segundos mais rápido que o sistema A. Este desempenho foi obtido, pois o movimento de rotação pressionava o fluido entre a parede do tanque e a hélice, aumentando o cisalhamento do fluido. Ao mesmo tempo, o movimento de giração renovava o fluido depositado nas hélices e impedia a formação de caminhos preferenciais que dificultam a homogeneização da mistura.

Figura 5 - Sistemas de Agitação A (esquerda) e B (direita)

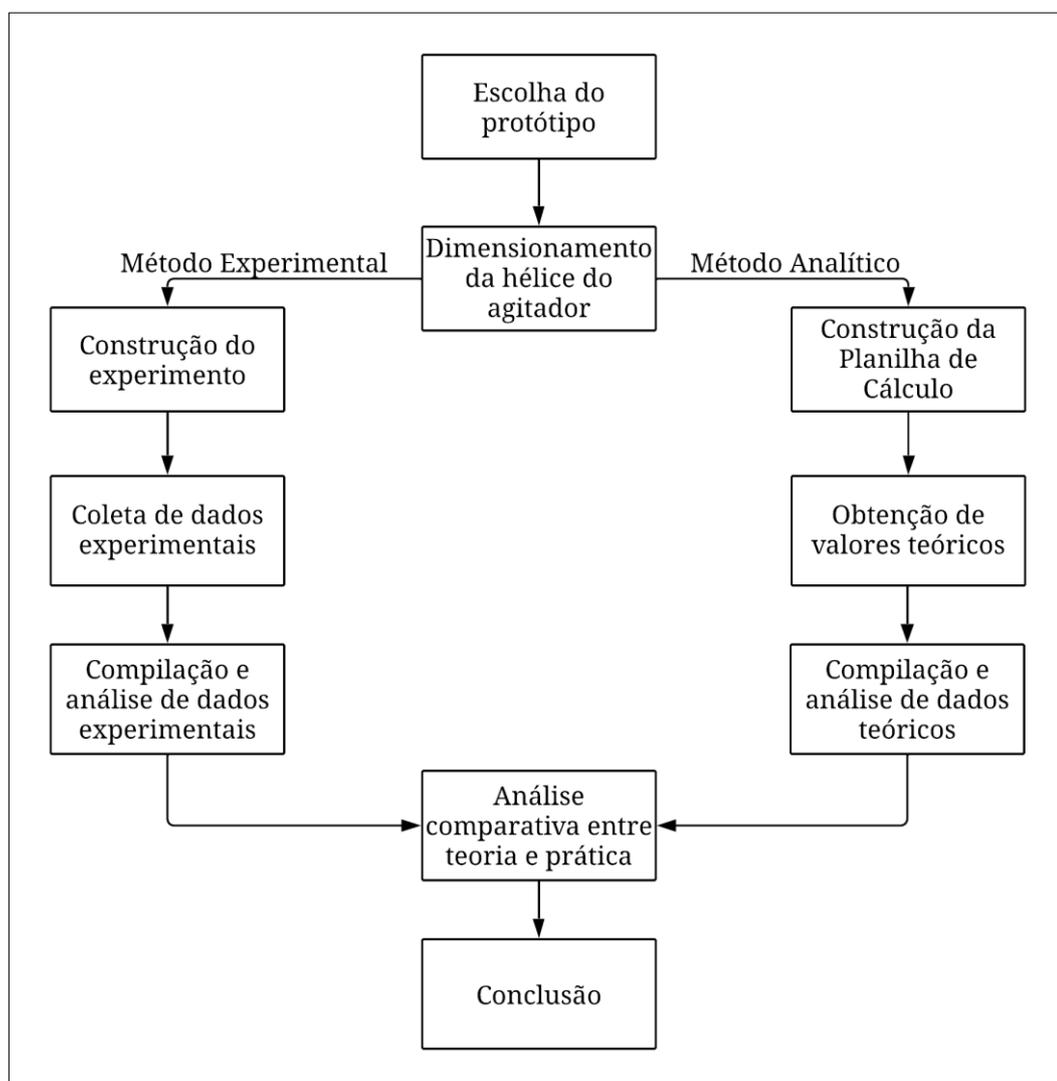


Fonte: DELAPLACE et al. (2004)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A sequência de etapas seguidas para a obtenção dos resultados é apresentada na Figura 6. Nela, o fluxograma tem como ponto de partida a escolha do protótipo a ser estudado e que servirá como fonte para os dados de entrada dos cálculos teóricos. A etapa seguinte é o dimensionamento da hélice do misturador, possibilitando a construção da mesma e o equacionamento necessário para obtenção do coeficiente de convecção forçada. Com a conclusão destas duas etapas iniciais, foram desenvolvidas duas frentes de trabalho distintas, uma focada no experimento e a outra no desenvolvimento da planilha eletrônica para os cálculos teóricos.

Figura 6 - Fluxograma de etapas desenvolvidas



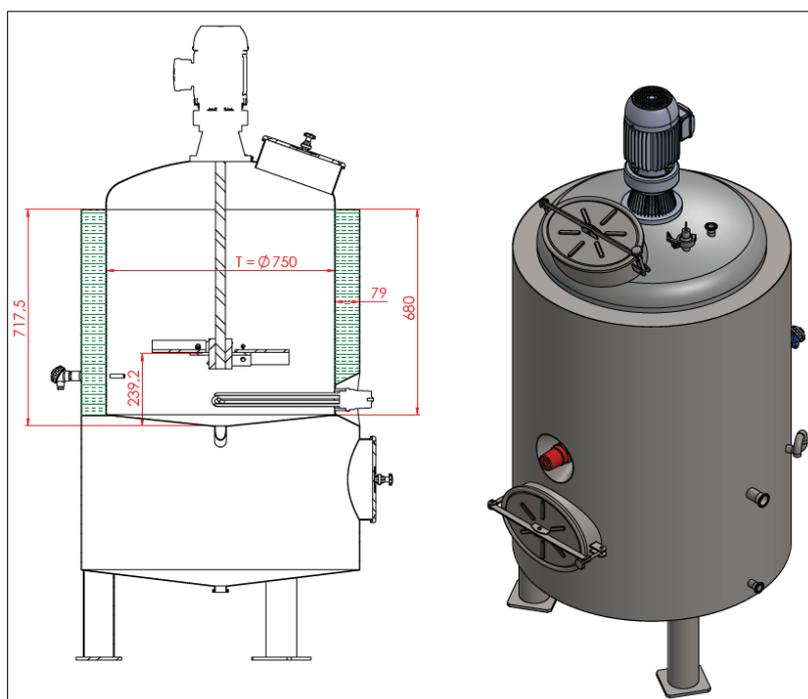
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O objeto de estudo deste trabalho é um tanque de aço inox produzido pela empresa Água Inox no ano de 2018. Originalmente, este tanque foi concebido para fazer parte de uma das etapas do processo de elaboração de cerveja, porém ele será adaptado para possuir as características relevantes à proposta de análise.

5.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

A Água Inox possui em seu parque fabril diversos tanques construídos ao longo dos anos que não foram comercializados e hoje fazem parte do acervo da empresa, ofertados à um preço mais atrativo para os clientes. Dentre todas as opções, o tanque a seguir foi o escolhido como protótipo, pois ele já possuía as principais características relevantes para o estudo, tais como isolamento térmico, pequeno porte, agitação vertical e sistema elétrico para medição de temperatura. Os ajustes necessários para a sua finalização eram a instalação do sistema de aquecimento e construção da hélice ideal para à aplicação proposta. A Figura 7 apresenta o projeto deste equipamento desenvolvido em software de modelamento 3D (medidas em milímetros).

Figura 7 - Projeto 3D do protótipo de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Fabricado totalmente em aço inoxidável AISI304 com 2,5 mm de espessura, o reservatório possui um diâmetro interno de 750 mm e uma altura cilíndrica de 680 mm. O tampo superior é composto por um domo torisférico ASME 10%, enquanto na parte inferior um tampo cônico com inclinação de 6 graus. Envolvendo o corpo interno, temos uma camada de 79 mm de poliuretano injetado, agindo como isolante térmico. Externamente, o tanque é revestido com uma camada de 2,0 mm de aço inoxidável. Estas características são ilustradas na Figura 8 e geram um equipamento com capacidade de armazenamento útil de 307 litros, aproximadamente.

Figura 8 – Protótipo de estudo finalizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

5.1.1 Sistema de Agitação

O sistema de agitação instalado originalmente tinha como objetivo a homogeneização do mosto da cerveja, garantindo a mistura da solução heterogênea presente na etapa de fabricação em que o tanque seria empregado. Desta forma, fez-se necessário a construção de um novo agitador, cujo modelo e demais características construtivas tenham como finalidade impulsionar a troca térmica do sistema. Porém, buscando diminuir os gastos financeiros na

construção do protótipo, foi estabelecido que o conjunto acionador motor-redutor original seria mantido, cujas principais características são apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6 - Dados do conjunto motor-redutor

Característica	Valores Numéricos
Potência do motor	0,75 kW
Frequência nominal	60 Hz
Rotação nominal	1680 rpm
Redução	1:39
Rotação de saída	43 rpm

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Conforme discorrido anteriormente, os impelidores de fluxo axial são os recomendados para troca térmica em fluidos pouco viscosos. Assim sendo, o modelo escolhido foi a turbina de pás inclinadas. A partir desta definição, a primeira variável a ser determinada é o diâmetro desta hélice, visto que ela influencia diretamente no cálculo do número de Reynolds, conforme apresentado na Equação 8.

Segundo Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), o diâmetro do impelidor é definido pela relação diâmetro da hélice/diâmetro do tanque, facilitando assim a sua concepção o que possibilita uma proporção construtiva para um eventual aumento escalar. Para os impelidores de fluxo axial, a razão varia de 0,4 até 0,6. Buscando obter o maior coeficiente convectivo possível dentro das variáveis apresentadas, a razão D/τ escolhida foi a maior, 0,6. Assim, o diâmetro da hélice ficou definido pela Equação 13:

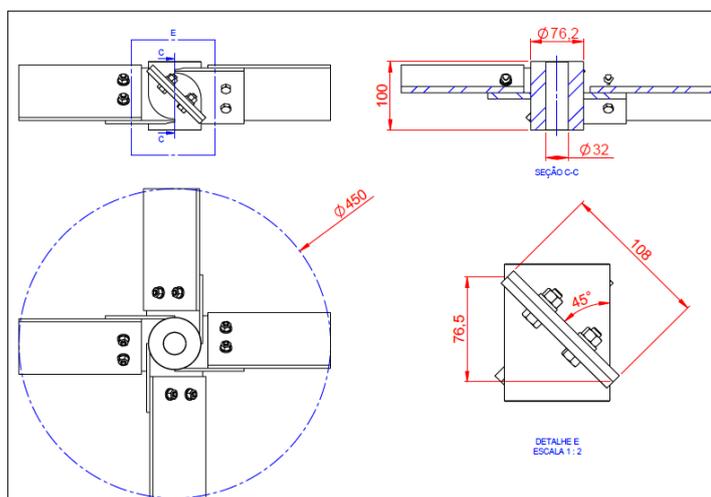
$$\frac{D}{\tau} = 0,6 \therefore D = 750 \times 0,6 = 450mm \quad (13)$$

Com o diâmetro da hélice definido, outras variáveis podem ser definidas, pois estão relacionadas diretamente com o tamanho da hélice. Exemplo disso é o caso da altura vertical da pá do impelidor (L), paralela ao eixo de rotação. Ela é uma variável geométrica presente na Equação 14 e também tem influência no número de Nusselt. Para impelidores de fluxo axial com quatro pás inclinadas, a relação entre a altura paralela padrão (L_s) e o diâmetro do tanque é de 0,17 (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004). Desta forma, a hélice construída seguiu a altura recomendada pela literatura, calculada conforme Equação 14:

$$\frac{L_s}{D} = 0,17 \therefore L_s = L = 450 \times 0,17 = 76,5\text{mm} \quad (14)$$

Segundo Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), não se faz necessário o uso de múltiplos impelidores quando a relação altura de produto / diâmetro do tanque (H/τ) for menor do que 1,2, conforme medidas apresentadas anteriormente na Figura 7 (medidas em milímetros). A Figura 9 e a Figura 10 ilustram, respectivamente, o projeto e a execução da hélice de acordo com as definições discutidas anteriormente. Vale ressaltar que o material utilizado na construção foi o AISI 304, o mesmo material que o tanque foi concebido.

Figura 9 - Projeto mecânico da hélice



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 10 – Hélice de quatro pás inclinadas construída



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

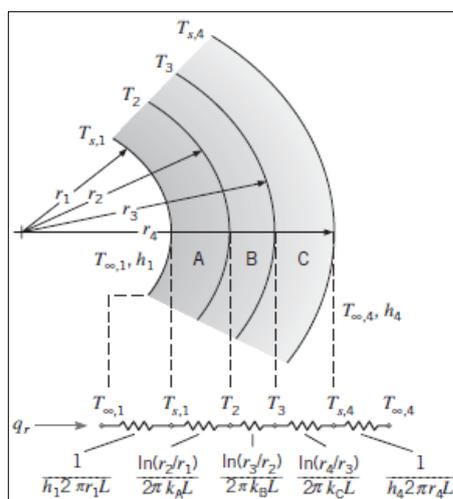
5.2 CÁLCULO ANALÍTICO

A sequência de etapas desenvolvidas para o cálculo analítico busca solucionar a Equação 1 apresentada no referencial teórico, obtenção do valor de energia acumulada, a fim de utilizar seu valor no cálculo do tempo de aquecimento. A energia gerada será proveniente do resistor elétrico instalado no tanque, enquanto a energia que entra no sistema será desconsiderada, pois a temperatura da água durante os experimentos foi sempre maior do que a temperatura do ambiente externo, direcionando o fluxo térmico de dentro para fora.

Por último, a energia emitida pelo sistema será determinada através da aplicação das equações clássicas de transferência de calor no conceito das resistências térmicas. Segundo Incropera, Bergman e Lavine (2019), os circuitos térmicos estão associados com a condução de calor, similarmente a maneira que circuitos elétricos estão associados ao transporte de energia elétrica. Assim sendo, estes circuitos também são compostos por associações em série e em paralelo.

Em um reservatório construído em várias camadas como o que se apresenta neste estudo, as associações em série estão presentes, por exemplo, no fluxo de calor que atravessa todo o corpo cilíndrico, partindo do corpo interno, passando pela camada de material isolante e pelo revestimento, até chegar no ambiente externo, conforme Figura 11. Paralelamente, ocorre o fluxo de calor pelas extremidades do tanque, tanto superior quanto inferior, e este também deve ser levado em consideração no equacionamento.

Figura 11 - Distribuição de temperaturas em uma parede cilíndrica composta



Fonte: INCROPERA; BERGMAN; LAVINE (2019)

Resolver um circuito térmico segue as mesmas etapas de um circuito elétrico, onde as associações são tratadas separadamente para que ao final seja possível obter um valor equivalente para todo o sistema. Conforme já descrito, ao final dos cálculos para cada circuito em série, três associações paralelas serão obtidas, e a resistência equivalente será determinada conforme Equação 15. Ao mesmo tempo, conhecendo a resistência térmica equivalente, é possível mensurar a quantidade de energia emitida pelo sistema, através da Equação 16.

$$\frac{1}{Req_{total}} = \frac{1}{R_{corpo\ cil\underline{ndrico}}} + \frac{1}{R_{tampo\ superior}} + \frac{1}{R_{tampo\ inferior}} \quad (15)$$

$$\dot{E}_{sai} = \frac{\Delta T}{Req_{total}} \quad (16)$$

5.2.1 Metodologia de cálculo considerações

Buscando otimizar os cálculos e construir uma ferramenta para uso futuro, foi desenvolvida uma planilha eletrônica, capaz de calcular todas as equações para a obtenção do tempo de aquecimento. Além disso, como serão calculados analiticamente o tempo de aquecimento para 21,5, 43,0 e 64,5 rpm, esta concepção permite que as variáveis consideradas estejam armazenadas no mesmo banco de dados, evita cálculos repetitivos e reduz erros associados à esta forma de trabalho.

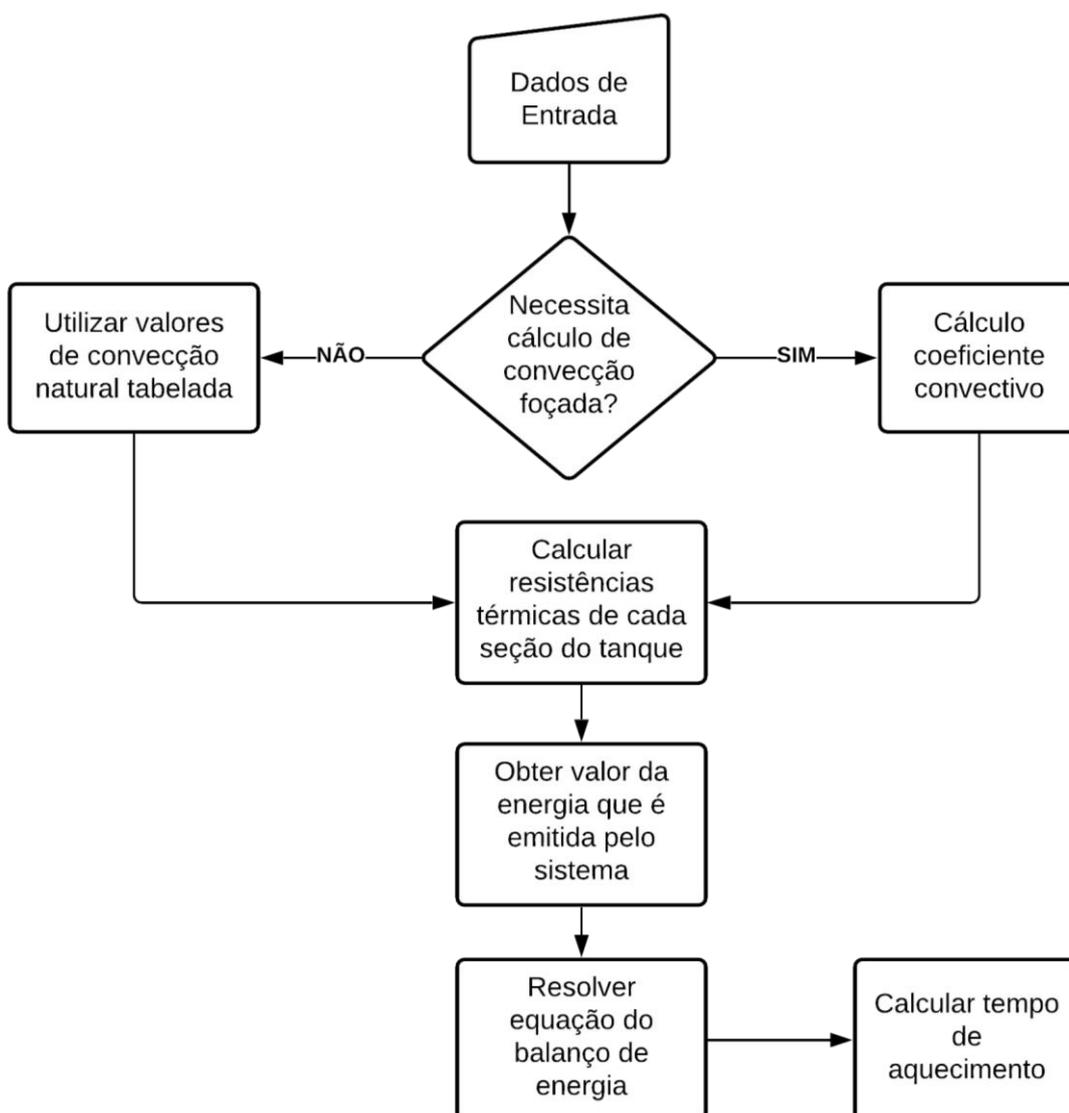
Após solucionar a equação do balanço de energia (Equação 1) para a obtenção da energia acumulada pelo sistema ao longo do tempo para um regime permanente, a planilha calcula o tempo total gasto neste processo. Para tal, fez-se uso da clássica equação da calorimetria dividida pela energia acumulada pelo sistema, conforme Equação 17.

$$t = \frac{m \cdot Cp \cdot \Delta T}{\dot{E}_{acum}} \quad (17)$$

Por se tratar de um cálculo com equações para o regime permanente, algumas considerações foram feitas a fim de delimitar o problema. Uma delas foi a desconsideração da troca de calor por radiação devido à dificuldade na extração de valores para cálculo. Além disso, foram consideradas em cálculo as propriedades termodinâmicas na temperatura de 300 K, definições estas que tendem a ampliar o percentual de erro da metodologia de cálculo proposta.

O memorial de cálculo desenvolvido segue o fluxo apresentado na Figura 12. Os dados de entrada consistem nas propriedades físicas do reservatório, do fluido armazenado e do ambiente em que o tanque está inserido. Se a situação proposta requer o valor do coeficiente de convecção forçada, faz-se necessário seu cálculo através do equacionamento apresentado anteriormente, porém, caso seja uma situação envolvendo apenas convecção natural, utiliza-se valores extraídos da literatura. Concluídas as etapas iniciais, tem-se todas as variáveis necessárias para o cálculo das resistências térmicas de cada seção do tanque que, posteriormente, serão relacionadas em uma resistência equivalente global. Com a resistência equivalente, é possível resolver a Equação 1 e mensurar a quantidade de Energia acumulada pelo sistema que, por sua vez, possibilita o cálculo do tempo de aquecimento.

Figura 12 - Fluxograma do memorial de cálculo



5.3 CONSTRUÇÃO DO EXPERIMENTO

Conforme abordado anteriormente, o equipamento selecionado precisou de pequenos ajustes para possibilitar a execução do estudo. O ambiente que o experimento foi desenvolvido era o setor de manutenção da Águia Inox. O mesmo foi escolhido, pois possuía todas as características relevantes ao processo de montagem e execução do estudo, como fonte de energia elétrica, espaço disponível, fonte de água abundante, baixo ruído, ferramentas para corte e solda, ferramentas para montagem, instrumentos de medição e facilidade de acesso.

A primeira etapa realizada foi a instalação de uma luva com conexão rosca BSP de 2”, que possibilitaria a instalação da fonte de energia térmica, um resistor elétrico com 10 kW de potência, como mostrado na Figura 13. Para tal, fez-se o corte da chapa de revestimento com um disco de corte, seguindo de remoção manual do isolamento térmico e abertura do furo central para colocação da conexão, com uso de uma serra copo. O método de soldagem empregado foi o TIG, com posterior limpeza da solda através de gel decapante seguido de polimento mecânico.

Figura 13 – Conexão com rosca (esquerda) e resistor elétrico (direita)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A partir do momento que todos os componentes mecânicos estavam finalizados, realizou-se a montagem dos itens no reservatório. Foi possível manter o eixo original do sistema de agitação, realizando-se apenas a substituição da hélice. A Figura 14 permite visualizar o sistema de agitação central com a hélice instalada, o resistor elétrico acoplado e, na parte superior da imagem, a haste do instrumento de medição de temperatura, localizada próxima ao fundo do tanque.

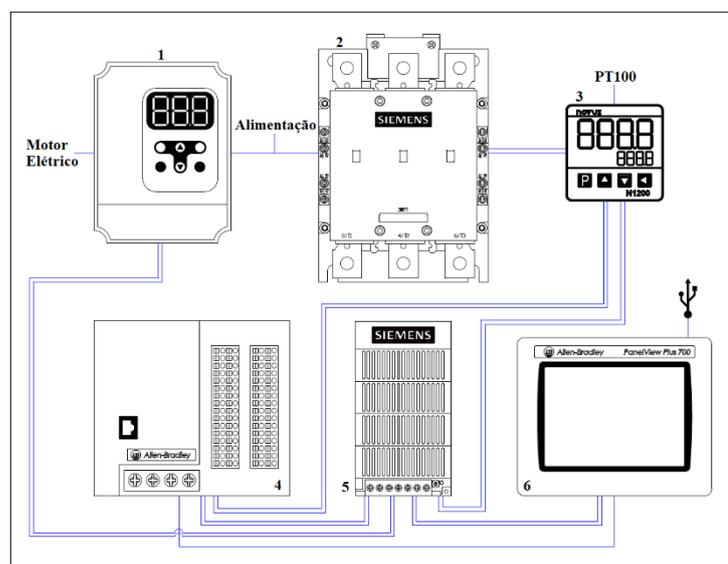
Figura 14 - Vista interna do reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Tendo finalizado a construção mecânica, as atenções foram voltadas para a construção de um painel elétrico capaz de acionar todos os componentes e extrair os dados necessários para a análise proposta. A automação ficou responsável por acionar o motor elétrico do agitador, ligar o resistor e extrair os dados do sensor de temperatura PT100 instalado originalmente no tanque. O esquema elétrico é apresentado na Figura 15, enquanto na Figura 16 é possível visualizar a construção real do equipamento.

Figura 15 - Esquematização painel elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 16 - Painel elétrico construído para o experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os componentes numerados na Figura 15 são comumente utilizados pela Água Inox para a construção de sistemas de automação. As marcas selecionadas foram consequência da disponibilidade dos itens no estoque da empresa. O nome e a função de cada componente estão descritos na Tabela 7:

Tabela 7 - Descritivo dos itens presentes no painel elétrico

Item	Nome	Função
1	Inversor de frequência	Definir a velocidade de rotação do motor elétrico
2	Contator	Acionamento do resistor elétrico
3	Controlador	Definir e controlar a temperatura do fluido
4	CLP	Processamento e controle de dados obtidos pelo PT100
5	Fonte	Converter 220VCA para 24VCC
6	IHM	Exibição e armazenamento de dados em arquivo .CSV

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

5.3.1 Princípio de Funcionamento e Melhorias

O sistema de funcionamento foi desenvolvido para ser, ao mesmo tempo, prático para uso e preciso na coleta de dados. Para tal, a automação descrita anteriormente coletava em intervalos de um minuto, a temperatura da água armazenada no tanque. Desta forma, é possível construir as curvas de aquecimento para cada uma das situações propostas, dentro de um mesmo

delta de temperatura de 55°C (25°C até 80°C). Além disso, o painel era energizado por uma tomada padrão trifásica 220V, bastando acoplá-la para ligar todo o sistema.

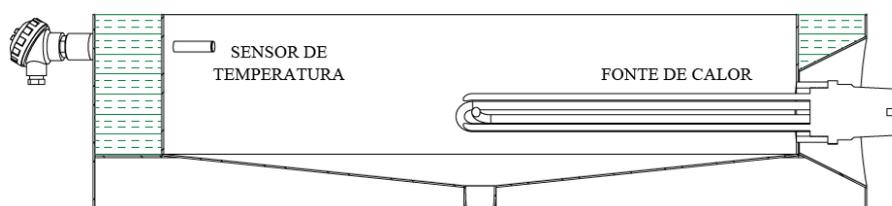
A água de rede abastecida tinha seu volume controlado através da altura de líquido, predeterminada em 680 mm (limite da altura cilíndrica do reservatório), por meio de uma régua graduada. Obviamente que esta forma de controle possui uma imprecisão natural que impacta diretamente nos resultados a serem obtidos. Com o propósito de minimizar estas e outras possíveis interferências, foi estabelecido que os testes se ocorreriam em duplicata, e o valor final de tempo para análise será dado através da média dos resultados dentro do mesmo intervalo de temperatura.

O valor da temperatura da água era coletado pelo sensor tipo PT100 instalado na parte inferior do tanque. O sinal elétrico era enviado para o CLP que, por sua vez, exibia na IHM os dados instantâneos de temperatura. O modelo de IHM permitia que os dados de temperatura extraídos fossem salvos a cada minuto, juntamente com o respectivo tempo, em um arquivo de extensão .csv em um pendrive.

Paralelamente, os demais componentes do painel elétrico permitiam a regulação das variáveis que influenciariam no tempo de aquecimento. O inversor de frequência era o componente responsável por aumentar ou diminuir a rotação do motor, através da regulação da frequência dentro da faixa 30 Hz até 90 Hz. Já o contator e o controlador trabalhavam de forma conjunta. Enquanto no controlador era possível definir a temperatura “final” desejada na água, o contator acionava o resistor elétrico até atingir a temperatura definida no controlador.

Durante os testes iniciais do experimento ficou claro que uma alteração deveria ser feita a fim de melhorar a acuracidade dos resultados. O sensor de temperatura estava originalmente instalado no fundo do tanque (Figura 17), próximo ao resistor elétrico, e esta região tende a ganhar energia mais rápido que em pontos mais afastados da fonte de calor. Assim, o sensor indicaria erroneamente que a temperatura desejada havia sido atingida, mesmo que na parte superior a temperatura seria menor.

Figura 17 - Posição original do sensor de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para avaliar corretamente o tempo de aquecimento de água, deseja-se que toda a massa contida no reservatório atinja a temperatura desejada, logo, mudou-se a posição do sensor para o tampo superior do tanque, no ponto mais afastado da fonte de calor. Entretanto, ao invés de simplesmente reposicionar o PT100 original, optou-se por instalar um novo sensor na parte superior, cujo modelo era de haste flexível, conforme Figura 18.

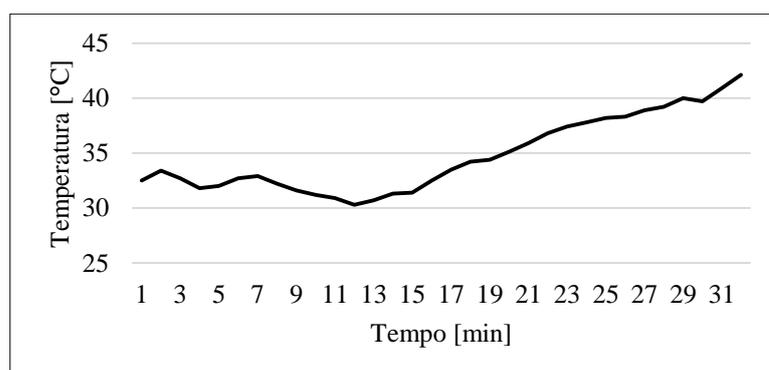
Figura 18 - Sensor flexível superior



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Todavia, o método escolhido para instalação do novo sensor solucionou problema anterior, mas gerou outro. Como o sensor estava solto e em contato direto com a água, o mesmo se movimentava devido ao vórtice formado pela agitação, e em determinados momentos perdia o contato com o fluido. Assim, os resultados obtidos possuíam pouca linearidade, conforme apresentado na Figura 19.

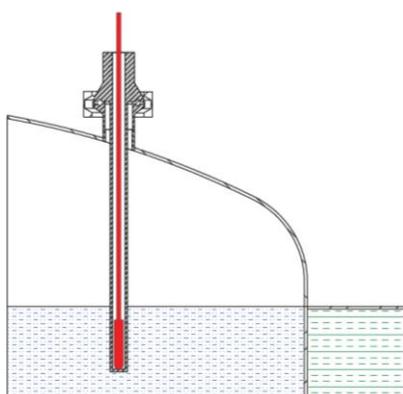
Figura 19 - Erro de leitura com sensor de temperatura instalado na parte superior do tanque



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Novamente tendo como agente norteador da tomada de decisão a correta extração dos dados para análise, foi construído um poço seco acoplado em um dos bocais superiores existentes no tanque. Este acessório é muito utilizado na caldeiraria convencional como bocal para instrumentação, pois ele evita um contato direto entre sensor e fluido, protegendo o componente elétrico e evitando que o vórtice gerado cause interferência na leitura do PT100. A Figura 20 ilustra a forma construtiva deste elemento, enquanto a Figura 21 apresenta a construção e instalação do mesmo no protótipo experimental.

Figura 20 - Poço seco para instalação de sensor



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 21 – Construção (esquerda) e instalação (direita) do poço seco



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Através da realização de novos testes para validação, a instalação do poço seco se mostrou eficaz para solucionar o problema da variação da medida de temperatura. Os resultados finais obtidos podem ser observados na seção de Resultados e Discussão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados encontrados nos estudos realizados, teóricos e práticos. Além disso, serão discorridos comentários relevantes aos valores encontrados, apresentando possíveis causas e indicando algumas melhorias para estudos futuros.

6.1 RESULTADOS TEÓRICOS

Os resultados teóricos obtidos através da planilha desenvolvida são apresentados na Tabela 8. Nela, são apresentados os tempos necessários para que o volume de água armazenado no reservatório aumente sua temperatura em $55,1^{\circ}\text{C}$. Este ajuste no delta de temperatura foi considerado pois os valores experimentais a serem confrontados posteriormente possuem o mesmo intervalo de variação de temperatura.

Tabela 8 – Parâmetros teóricos obtidos para as rotações avaliadas neste estudo

Frequência [Hz]	Rotação [rpm]	Re	Nu	h [W/m ² K]	Tempo [min]
0	0	-	-	50	118,5
30	21,5	84615,0	3250,6	2930,3	118,5
60	43,0	169229	5159,9	4651,5	118,5
90	64,5	253844	6761,4	6095,2	118,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os valores calculados para número de Reynolds e, conseqüentemente, Nusselt aumentaram proporcionalmente com o aumento da rotação. Aumentar a velocidade de 21,5 rpm para 64,5 rpm triplicou o valor do Reynolds, refletido no acréscimo do número de Nusselt em 48%, aproximadamente. Através da análise equacionamento proposto no Capítulo 3 deste trabalho é possível justificar este aumento, uma vez que a velocidade de rotação é uma das variáveis presentes no numerador da Equação 8 para cálculo do número de Reynolds e cujo resultado é imputado no cálculo do número de Nusselt (Equação 9).

Sivashanmugam e Mothilal (2017) avaliaram dois tipos distintos de agitação em três fluidos armazenados em um reservatório. Os autores também observaram a influência da rotação nos valores de Reynolds e Nusselt. Na situação proposta para uma agitação do tipo turbina e rotação partindo de 100 até 700 rpm, o número de Reynolds aumentou de 24000 para 160000, enquanto Nusselt apresentou escala de crescimento com valores iniciais de 4500 até

10000. Os autores atribuíram este aumento ao fato da intensidade de mistura aumentar com velocidades mais altas do agitador, elevando assim a turbulência do meio, resultando em maiores valores nos coeficientes de transferência de calor.

Avaliando os três cenários em que a agitação se fez presente, o coeficiente convectivo apresentou crescimento diretamente proporcional ao valor de rotação proposto. Aumentar a rotação de 21,5 rpm para 43,0 rpm proporcionou um incremento de 59% no valor de h , enquanto a variação de 43,0 rpm para 64,5 rpm elevou o coeficiente convectivo em 31% se comparado ao valor anterior. Busca-se a explicação para estes resultados teóricos na Equação 5 apresentada anteriormente, onde o valor de Nusselt é variável direta da equação e do coeficiente convectivo, e seu valor sofre influência direta da velocidade de rotação da hélice de agitação.

Os estudos realizados por Nassar e Mehrotra (2011), também apresentaram aumento do coeficiente convectivo da água armazenada no reservatório estudado com o aumento da velocidade de rotação do impelidor, mesmo que se tratando de um equipamento com características diferentes (diâmetro do tanque, formato e tamanho de hélice, fonte de calor, etc.). Para 250 rpm, o valor de h encontrado foi de 3140 W/m²K, ao passo que em 500 rpm este valor saltou para 4930 W/m²K. Os autores referiram este aumento com o aumento da velocidade de rotação ocorre o aumento da convecção forçada e diminui a resistência térmica do sistema, aumentando a taxa de transferência de calor.

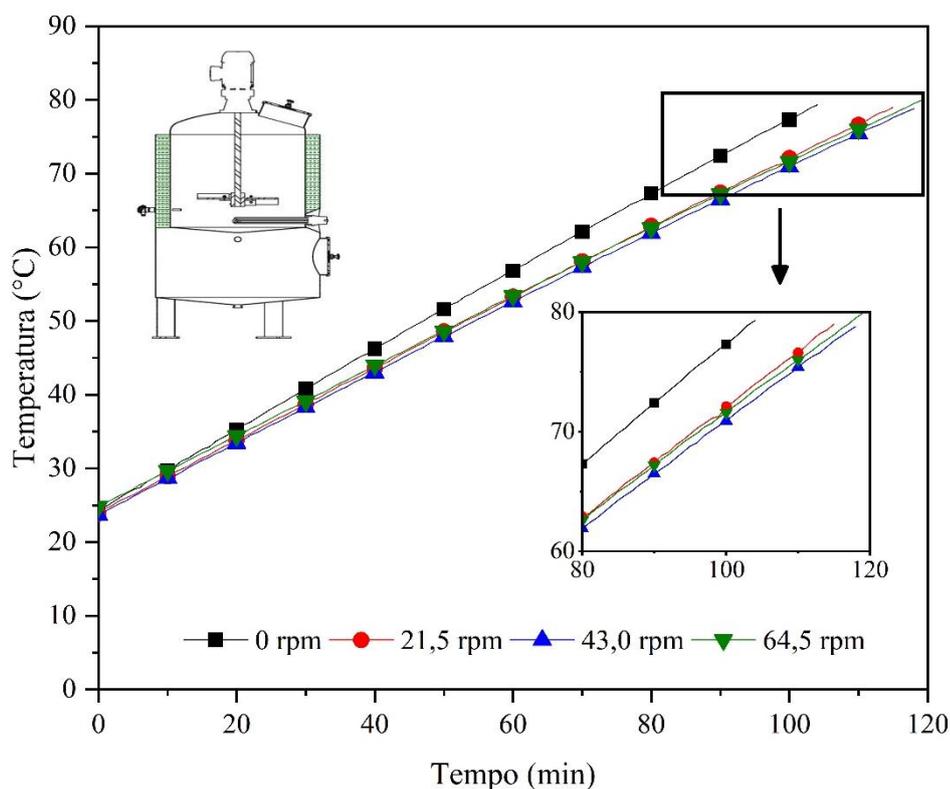
Apesar da metodologia de cálculo escolhida apresentar variação nos coeficientes relevantes para o cálculo do tempo de aquecimento, esta mudança se mostrou pouco relevante no equacionamento geral, não gerando impacto significativos nos tempos calculados para as quatro situações propostas. Em todos os cenários, o valor calculado para o tempo de aquecimento da água armazenada foi de 118,5 minutos. A principal justificativa encontrada para este resultado está nas considerações feitas na metodologia de cálculo que diminuem a sensibilidade do equacionamento, como a utilização de coeficientes tabelados, a desconsideração da radiação térmica no balanço de energia e a aplicação de cálculos de transferência de calor para regime permanente.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através da construção experimental descrita nos Capítulo 5 foi possível extrair, a cada minuto, os valores de temperatura da água em cada uma das situações propostas. A compilação destes valores em uma única planilha de dados permitiu a criação de quatro curvas de aquecimento no mesmo plano cartesiano (Figura 22), o que facilitou a análise comparativa dos

resultados. Como houve pouca variação entre o teste e sua respectiva duplicata, foram selecionados os conjuntos de dados de cada situação que apresentavam valores de temperatura inicial próximos construção das curvas de aquecimento.

Figura 22 – Curvas de aquecimento da água obtidas através do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 9 apresenta a equação da reta criada para cada caso, bem como o coeficiente de determinação (R^2):

Tabela 9 - Análise de precisão experimental

Frequência [Hz]	Rotação [rpm]	Equação da Reta	R^2
0	0	$Y = 0,531X + 24,22$	0,9997
30	21,5	$Y = 0,493X + 23,85$	0,9999
60	43,0	$Y = 0,469X + 23,71$	0,9997
90	64,5	$Y = 0,465X + 24,77$	0,9998

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

As equações da reta encontradas para todas as situações ficaram muito semelhantes. Além disso, a semelhança na inclinação de todas as retas apresenta a similaridade de ganho de temperatura ao longo do tempo para todos os cenários estudados. Concomitantemente, o valor

de R^2 para os quatro casos ficaram muito próximos da unidade, expressando assim que o modelo linear se ajustou bem a amostragem devido à baixa variância dos dados amostrais coletados.

Os resultados experimentais extraídos estão apresentados na Tabela 10. Foram agrupados os resultados dos tempos de aquecimento para os testes 1 e 2, a média entre estes dois valores e o desvio padrão existente entre a média e os resultados de cada teste para um mesmo intervalo de variação de temperatura.

Tabela 10 - Resultados experimentais obtidos com a variação da velocidade de agitação

Frequência [Hz]	Rotação [rpm]	ΔT [°C]	Teste 1 [min]	Teste 2 [min]	Média [min]	Desvio padrão
0	0	55,1	104	103	103,5	0,5
30	21,5	55,1	115	113	114,0	1,0
60	43,0	55,1	118	116	117,0	1,0
90	64,5	55,1	117	119	118,0	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para a primeira situação, com sistema de agitação desligado, o tempo médio obtido através dos experimentos foi de 103,5 minutos. Percebeu-se pouca variação entre os resultados extraídos no Teste 1 e no Teste 2, com um desvio padrão de 0,5, ou 1 minuto de diferença entre as duas amostras.

Com a agitação em uma velocidade de rotação de 21,5 rpm, o tempo médio obtido foi de 114 minutos. Este valor é, aproximadamente, 10 minutos adicionais ao tempo para a situação anterior, com 21,5 rpm. Baseado na literatura, esta mudança se justifica no aumento do coeficiente convectivo da água, de 50 W/m²K na convecção natural para 2930,3 W/m²K de convecção forçada, causando maior fluxo térmico (perda de calor) do tanque para o ambiente externo.

Para a agitação em 43,0 rpm, o tempo médio obtido foi de 117 minutos. Novamente, observa-se um valor de tempo maior se comparado ao teste sem agitação, com uma diferença por volta de 13 minutos. Entretanto, se comparado ao tempo obtido no teste anterior, não foi possível confirmar que o aumento da velocidade de rotação proposto teve influência no tempo de aquecimento, pois a diferença entre os cenários foi de 3 minutos no tempo médio, equivalente à 2,56%.

Na situação cuja velocidade angular era de 64,5 rpm, o tempo médio obtido foi de 118 minutos. Mais uma vez obteve-se um valor maior no tempo total do experimento para o mesmo intervalo de 55,1°C de temperatura, se comparado a situação original, com um acréscimo de 14 minutos.

Os estudos desenvolvidos por Mahir et al. (2021) também mostraram baixa variação no tempo de aquecimento de água pura na presença de um agitador vertical em duas velocidades de rotação distintas, 165 rpm e 330 rpm. Só foi possível visualizar relevante interferência quando a solução agitada foi substituída por uma mistura heterogênea de água com restos de comida. Os autores designaram esta mudança pois os restos de comida se depositavam sobre a helicoide interna (superfície de aquecimento), prejudicando a transferência de calor quando a mistura não estava homogênea (agitação desligada).

A Tabela 11 apresenta a diferença nos tempos de aquecimento encontrada em alguns trabalhos desenvolvidos com a mesma temática para entender a variação do comportamento térmico de um fluido agitado, quando ocorreu um aumento da velocidade de rotação. Em todos os casos, foram coletados os dados para um intervalo de temperatura de 20°C através dos gráficos por criados por Mahir et al. (2021) e Nassar e Mehrotra (2011).

Tabela 11 - Comparativo entre rotação e tempo de aquecimento em trabalhos correlatos

Experimento	Rotação 1 [rpm]	Tempo 1 [min]	Rotação 2 [rpm]	Tempo 2 [min]
Autor	21,5	44,0	43,0	45,0
Mahir et al.	165	8,30	330	4,20
Nassar e Mehrotra	100	1,10	250	0,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que o aumento da velocidade de rotação dos sistemas de agitação desenvolvidos contribuiu positivamente para o ganho de energia térmica, com exceção dos valores encontrados no presente trabalho. A principal justificativa encontrada é a grande diferença nas velocidades de rotação entre as demais pesquisas e este estudo, mesmo que os equipamentos possuíssem características construtivas diferentes. Acredita-se que a baixa rotação utilizada não causa a mesma influência positiva que os maiores valores apresentaram, atuando apenas como meio impulsionador da perda de energia térmica.

6.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TEORIA E PRÁTICA

Analisou-se comparativamente os resultados teóricos com os valores obtidos na prática para validar ou não a metodologia desenvolvida na planilha. A forma de mensurar esta precisão dos cálculos em relação ao experimento será através do cálculo de erro, em percentual, conforme apresenta a Equação 18. O erro foi calculado para cada uma das situações definidas

e o resultado pode ser observado na Tabela 12, onde foram confrontados os resultados teóricos e práticos. Para os valores de tempo experimentais, foi utilizado o valor médio calculado entre os dois testes realizados.

$$Erro \% = \left(\frac{Tempo\ te\acute{o}rico - Tempo\ experimental}{Tempo\ Te\acute{o}rico} \right) * 100 \quad (18)$$

Tabela 12 – Comparativo entre os tempos obtidos por meio da análise teórica e experimental

Frequência [Hz]	Rotação [rpm]	Tempo teórico [min]	Tempo Experim. médio[min]	Erro [%]
0	0	118,5	103,5	12,7
30	21,5	118,5	114,0	3,80
60	43,0	118,5	117,0	1,30
90	64,5	118,5	118,0	0,50

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para a primeira situação, sem agitação ligada, o erro calculado foi de 12,7%. Este resultado foi considerado satisfatório dadas as condições limitadas da metodologia de cálculo adotada. Além disso, como não foi possível mensurar o coeficiente de convecção natural, optando-se por usar valores usuais da literatura, era esperado que esta escolha causa-se reflexo nos resultados obtidos.

Para 21,5 rpm, o erro foi de 3,8% ou aproximadamente 5 minutos. Como foi possível mensurar o coeficiente convectivo para uma situação de turbulência, naturalmente o resultado teórico tende a convergir com os valores experimentais, o que valida a metodologia utilizada.

Com 43,0 rpm, o tempo médio experimental aumentou em relação aos anteriores e, somado ao fato de que o cálculo teórico apresentou o mesmo valor para todos os cenários em que o agitador se fez presente, o resultado foi um erro ainda menor, com 1,3%. Mais uma vez, a precisão do cálculo teórico está na definição do coeficiente convectivo, o que não foi possível na situação inicial de 0 rpm.

A comparação entre experimento e cálculo analítico para 64,5 rpm foi a que apresentou maior precisão, com um valor de 0,5%, equivalente a 33 segundos. Este resultado somado aos demais já apresentados valida a metodologia de cálculo, baseado no fato de que ela tinha como objetivo ser uma ferramenta adicional no dimensionamento global de um sistema de mistura.

7 CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados pode-se concluir que os objetivos propostos no Capítulo 2 foram atingidos de maneira satisfatória, possibilitando analisar a influência do sistema de agitação no tempo de aquecimento de água de um reservatório, bem como as demais variáveis importantes no processo.

Analicamente, a metodologia de cálculo se mostrou eficiente para prever os acontecimentos práticos, principalmente nas situações em que se fez presente o sistema de agitação. Entretanto, a planilha de cálculo apresentou baixa variação nos cálculos que envolviam apenas convecção natural, com agitador desligado, ponto que apresentou maior erro teórico. Apesar de apresentar resultados teóricos com pouca variação no tempo de aquecimento, os cálculos comprovaram a ação de agente potencializador que o sistema de agitação vertical tem nos coeficientes importantes na transferência de calor, como Reynolds, Nusselt e coeficiente convectivo.

O experimento construído em escala real apresentou se mostrou eficaz para a extração dos valores de temperatura ao longo do tempo, mesmo que a lógica de programação utilizada trouxesse consigo limitações na coleta amostral. As melhorias propostas como forma de minimizar possíveis erros de leitura também desempenharam papel satisfatório durante os testes prévios e os resultados finais.

Os resultados experimentais mostraram que a agitação teve influência negativa no tempo de aquecimento, visto que em todos os cenários de agitação ligada o tempo de aquecimento foi maior se comparado à situação inicial, sem agitador. Vale ressaltar que esta conclusão está baseada única e exclusivamente nos resultados obtidos a partir das características experimentais propostas.

Outros estudos referenciados neste trabalho apontaram para uma influência positiva do agitador, em situações de maior rotação da hélice, com outras fontes de calor e com fluidos diferentes a serem aquecidos. Desta forma, por se tratar de uma análise com muitas variáveis que influenciam neste processo, portanto complexa, as conclusões sobre o sistema de agitação e sua relação com a transferência de calor precisam ser tomadas caso a caso, conforme recomenda a literatura.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos neste estudo sugere-se:

- Utilização de defletores internos aplicados como sistema de quebra-vórtice. Apesar deste acessório não ser uma variável presente na metodologia de cálculo para troca térmica, a literatura observa a utilização destes como boa prática de fabricação para sistemas de agitação tipo 4BP.
- Testar diferentes tipos de hélices em maiores velocidades de rotação.
- Desenvolver uma metodologia de cálculo considerando equações para transferência de calor em regime transiente, uma vez que elas tendem a simular com maior precisão a realidade estudada.
- Incluir no cálculo as equações de troca térmica referentes a radiação.
- Realizar o experimento em ambiente com controle de temperatura e umidade.
- Aumentar a amostragem em cada experimento, com intervalos de medição reduzidos para 30 segundos ou menor. A extração de valores de temperatura a cada minuto dificultou a análise dos dados pois impediu que em algumas situações fosse possível iniciar em 25°C e terminar em 80°C.
- Alterar o fluido de testes para uma solução heterogênea, situação mais comumente encontrado nas aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

ABIA. Faturamento da indústria de alimentos cresce 12,8% em 2020. **ABIA**, São Paulo, 24 fev. 2021. Disponível em: <https://www.abia.org.br/releases/faturamento-da-industria-de-alimentos-cresce-128-em-2020>. Acesso em: 07 de Março de 2021.

ARFELLI, Silvio Luiz (2009). **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor**. Orientador: Prof. Dr. Paulo César Razuk. 2009. 74f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.

ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. McGraw – Hill, 2012.

DELAPLACE, G. et al. Determination of mixing time by colourimetric diagnosis. Application to a new mixing system. **Experiment in Fluids**, n. 36, p. 433-443, dez 2003.

INCROPERA, F.P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 8. ed. LTC, 2019.

JEFFERSON, Luiz Grangeiro da Silva (2019). **Determinação Experimental do Número de potência de Impelidores de pás retas**. Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez. 2019. 165f. Tese de Doutorado (Doutorado em engenharia química) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2019.

MAHIR, M. et al. An Investigation of Heat Transfer Performance in an Agitated Vessel. **Process** **2021**, 9, n.3, 468, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9030468>. Acesso em: 02 de Novembro de 2021.

NASSAR, N. N.; MEHROTRA, A. K. Design of a laboratory experiment on heat transfer in an agitated vessel. **Education for Chemical Engineers**, n. 6, p. 83-89, ago. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2011.06.001>. Acesso em: 04 de Novembro de 2021.

PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A., KRESTA, S.M., **Handbook of industrial mixing: science and practice**. 1 ed. John Wiley & Sons, 2004.

PESQUISA INDUSTRIAL ANUAL – PRODUTO. Brasil: **IBGE** 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pia-produto/quadros/brasil/2018>. Acesso em: 07 de Março de 2021.

SIVASHANMUGAM, P.; MOTHILAL, H. Experimental heat transfer behavior of graphite–water microfluid in a coiled agitated vessel. **Heat Transfer-Asian Research**, n. 47, p. 492-506, mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/htj.21314>. Acesso em: 04 de Novembro de 2021.