

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BEATRIZ GONÇALVES DE OLIVEIRA

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM TROCADOR DE CALOR DE
TANQUE AGITADO

MANAUS

2019

BEATRIZ GONÇALVES DE OLIVEIRA

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM TROCADOR DE CALOR DE
TANQUE AGITADO**

**Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Química da
Escola Superior de Tecnologia da
Universidade do Estado do Amazonas, para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.**

Orientador: Profa. Dra. Regina Yanako Moriya

Coorientador: Prof. Dr. Bayardo Dupotey Ribas

MANAUS

2019

BEATRIZ GONÇALVES DE OLIVEIRA

**COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM TROCADOR DE CALOR DE
TANQUE AGITADO**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação
em Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do
Amazonas**

Banca Examinadora:

.....
Profa. Dra. Regina Yanako Moriya – Orientador

.....
Prof. Dr. Bayardo Andres Dupotey Ribas – Coorientador

.....
Prof. Msc. Fagner Alves Gomes

.....
Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva – UEA

Conceito:

Manaus, 06 de Dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, sem Ele nada seria possível.

Dedico também à meus pais, Edmilson e Lucionora, por todas as batalhas travadas para me apoiar que culminaram neste momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que esteve sempre ao meu lado durante esses cinco longos anos de graduação, me ajudando nos momentos difíceis e me abençoando nas conquistas.

Agradeço a meus pais, Edmilson e Lucionora, que são minha base e exemplos de moral e ética. Agradeço por estarem sempre ao meu lado durante todos os anos de minha vida e por sempre buscarem o que é melhor para mim, sem eles não estaria aqui. Agradeço a meu irmão, Bruno, por todo o incentivo e ajuda durante este período.

Agradeço também a meu melhor amigo e namorado, Paulo Henrique, por todo apoio ofertado durante minha graduação, por me ajudar a estudar e realizar meus experimentos.

Agradeço a todos os meus tios, tias, avôs e avós que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu crescimento e aprendizado.

Agradeço a meus queridos orientadores, prof. Bayardo Dupotey Ribas e profa. Regina Yanako Moriya, por toda a paciência, compreensão e ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho e durante a minha graduação.

Agradeço a todos os professores da Universidade do Estado do Amazonas que fizeram parte da minha graduação e contribuíram para o meu ensino, bem como todos os professores do curso de Engenharia Química, que me acompanharam durante estes anos.

Agradeço, em especial, aos professores Clairon Pinheiro, por todo o suporte oferecido na Coordenação de Engenharia Química; Dania Del Toro, por toda a ajuda oferecida durante o curso e por todos os momentos bons; Jefferson Luiz Grangeiro por todos os ensinamentos, compreensão e conselhos e Cláudia Cândida Silva, por toda a sua paciência e parceria no início de minha graduação.

Agradeço também às amigas que fiz no curso de Engenharia Química e que carrego até hoje, em especial aos meus amigos Lucas Alves, Gillane Rosas, Leandro Marçal, Rodrigo Duarte e Vitória Lopes.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a meus chefes, dona Aldeir Aguiar, Sr. Alessandro Pierri e Thiago Oliveira, por todas as oportunidades e conselhos oferecidos e por todas a compreensão e parceria nos momentos em que precisei me ausentar para me dedicar a faculdade.

RESUMO

O constante avanço tecnológico da era atual impulsiona a otimização dos processos industriais diversos. Assim, o estudo dos fenômenos de transporte é cada vez mais abordado e aprofundado, uma vez que estes estão presentes, em geral, em todos os segmentos industriais. Os três mecanismos de transporte são: transferência de momento, calor e massa. Comumente, os três aparecem combinados nos processos industriais. Nos processos de troca térmica entre dois fluidos, geralmente se leva em conta os mecanismos de condução, convecção e radiação, avaliando-se a contribuição de cada um desses para o sistema. Nas análises dos trocadores de calor, avaliam-se o coeficiente global de transferência de calor (U) e o coeficiente convectivo de transferência de calor, ou coeficiente de película (h). Através do coeficiente global de transferência de calor, pode-se avaliar a contribuição dos mecanismos envolvidos no processo de transferência de calor. Além disso, com a determinação do coeficiente de película, pode-se obter a quantidade de calor transferida entre uma superfície e um fluido, ou vice-versa. Assim, com estes parâmetros pode-se determinar a taxa de transferência de calor. Logo, o problema científico deste trabalho refere-se à influência exercida no comportamento do coeficiente global de transferência de calor (U) e do coeficiente de película (h) por meio da operação de trocadores de calor em condições dinâmicas. Para isso foram feitos 11 experimentos em um trocador de calor de tanque agitado com camisa, considerando-se parâmetros como velocidade de agitação e temperaturas dos fluidos. Foram determinados os valores dos coeficientes de transferência de calor, global e convectivo, e analisado para avaliar quais as melhores condições para serem realizados experimentos didáticos. Concluiu-se que os parâmetros de velocidade de agitação e temperatura de entrada do fluido quente influenciam diretamente nas perdas de calor para o meio e nos cálculos das quantidades de calor.

Palavras-chave: Transferência de calor, trocadores de calor, tanque agitado, tanque encamisado, coeficiente global de transferência de calor, coeficiente convectivo de transferência de calor, coeficiente de película, velocidade de agitação.

ABSTRACT

The constant technological advancement of the current era drives the optimization of various industrial processes. Thus, the study of transport phenomena is increasingly approached and deepened, since they are generally present in all industrial segments. The three transport mechanisms are: momentum transfer, heat and mass. Commonly, all three appear combined in industrial processes. In the processes of thermal exchange between two fluids, the conduction, convection and radiation mechanisms are generally taken into account, evaluating the contribution of each of these to the system. In heat exchanger analyzes, the overall heat transfer coefficient (U) and the convective heat transfer coefficient, or film coefficient (h), are evaluated. Through the global heat transfer coefficient, one can evaluate the contribution of the mechanisms involved in the heat transfer process. In addition, by determining the film coefficient, the amount of heat transferred between a surface and a fluid can be obtained, or vice versa. Thus, with these parameters one can determine the heat transfer rate. Therefore, the scientific problem of this work refers to the influence exerted on the behavior of the global heat transfer coefficient (U) and the film coefficient (h) through the operation of heat exchangers under dynamic conditions. For this, 11 experiments were performed in a jacket-stirred tank heat exchanger, considering parameters such as stirring speed and fluid temperatures. The values of global and convective heat transfer coefficients were determined and analyzed to evaluate the best conditions for conducting didactic experiments. It was concluded that the parameters of stirring velocity and inlet temperature of the hot fluid directly influence the heat losses to the medium and the heat quantity calculations.

Key words: Heat transfer, heat exchangers, agitated tank, jacketed tank, global heat transfer coefficient, convective heat transfer coefficient, film coefficient, stirring speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escoamento paralelo em trocador de calor bitubular.....	12
Figura 2 - Escoamento contracorrente em trocador de calor bitubular.	12
Figura 3 - Escoamento cruzado em trocadores de calor tubulares com e sem aleta.....	13
Figura 4- Esquema de um trocador de calor casco e tubo operando em escoamento paralelo.	14
Figura 5 - Principais tipos de agitadores.	15
Figura 6 - Tipos de mecanismos para troca de calor em tanques agitados. (a) Camisa. (b) Serpentina. (c) Chicanas.	16
Figura 7 - Metodologia de desenvolvimento do projeto.....	22
Figura 8 - Instalação experimental do trocador de calor encamisado com agitação.	24
Figura 9 - Diagrama de blocos do desenvolvimento do experimento	25
Figura 10 - Procedimento de cálculos das quantidades de calor fornecida e recebida, perda de calor e coeficiente global.....	27
Figura 11 - Cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor.	28
Figura 12 - Experimento 7 - Variação das temperaturas em função do tempo.	32
Figura 13 - Experimento 8 - Variação das temperaturas em função do tempo.	32
Figura 14 - Experimento 11 - Variação das temperaturas em função do tempo.	32
Figura 15 - Quantidade de calor perdida em função da temperatura de entrada do fluido quente para os experimentos 1, 2 e 3.....	35
Figura 16 - Quantidade de calor perdida em função da temperatura de entrada do fluido quente para os experimentos 4 e 5.....	36
Figura 17 - Variação do coeficiente convectivo interno de transferência de calor em função de Reynolds.	37
Figura 18 - Variação do coeficiente convectivo de transferência de calor externo em função de Reynolds.	38
Figura 19 - Variação do coeficiente global de transferência de calor em função de Reynolds.	38
Figura 20 – Experimento 1 - Variação das temperaturas em função do tempo.....	44
Figura 21 - Experimento 2 - Variação das temperaturas em função do tempo.	44
Figura 22 - Experimento 3 - Variação das temperaturas em função do tempo.	45
Figura 23 - Experimento 4 - Variação das temperaturas em função do tempo.	45
Figura 24 - Experimento 5 - Variação das temperaturas em função do tempo.	46
Figura 25 - Experimento 6 - Variação das temperaturas em função do tempo.	46

Figura 26 - Experimento 9 - Variação das temperaturas em função do tempo.	47
Figura 27 - Experimento 10 - Variação das temperaturas em função do tempo.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de incrustação para diferentes fluidos.	18
Tabela 2 - Constantes para estimar os coeficientes peliculares.	19
Tabela 3 - Matriz de planejamento experimental.	26
Tabela 4 - Parâmetros fixos para cálculos dos coeficientes convectivos de transferência de calor.	28
Tabela 5 - Dados coletados para o Experimento 4.	28
Tabela 6 - Propriedades do fluido à temperatura média.	29
Tabela 7 - Médias dos resultados obtidos experimentalmente.	31
Tabela 8 - Perdas de calor do sistema para o meio.	33
Tabela 9 - Resultados obtidos para os coeficientes de transferência de calor.	34
Tabela 10 - Resultados obtidos para Reynolds e para os coeficientes de transferência de calor.	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A_s	Área da superfície, m^2
A_i	Área interna do tanque, m^2
A_o	Área externa do tanque, m^2
B_i	Número de Biot, adimensional
C_p	Calor específico, $KJ/kg.K$
D_a	Diâmetro do agitador, m
D_i	Diâmetro interno do tanque, m
D_t	Diâmetro do externo tanque, m
h	Coefficiente de película, $W.m^{-2}.K^{-1}$
h_i	Coefficiente de película interno, $W.m^{-2}.K^{-1}$
h_o	Coefficiente de película externo, $W.m^{-2}.K^{-1}$
k	Condutividade térmica, $W.m^{-1}.K^{-1}$
L	Comprimento característico do tanque, m
N	Velocidade de agitação, rpm
Nu	Número adimensional de Nusselt
Pr	Número adimensional de Prandtl
Q	Fluxo de transferência de calor, $W.m^{-2}$
q_r	Fluxo de calor irradiado, W
R_d	Fator de incrustação, $m^2/K.W$
Re	Número adimensional de Reynolds
t	Tempo, s
T_∞	Temperatura do fluido, K
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturer's Association
T_s	Temperatura da superfície, K
U	Coefficiente global de transferência de calor, $W.m^{-2}.K^{-1}$
U_d	Coefficiente global de transferência de calor sujo, $W.m^{-2}.K^{-1}$
V	Volume, m^3
ΔT	Varição de temperatura, K
ρ	Densidade do fluido, $kg.m^{-3}$
μ	Viscosidade do fluido, Pa.s
μ_w	Viscosidade do fluido à temperatura da parede, Pa.s

σ Constante de Stefan-Boltzmann, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIA.....	8
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	9
2.2.1 Condução.....	9
2.2.2 Convecção.....	10
2.2.3 Radiação	10
2.3 TROCADORES DE CALOR.....	11
2.3.1 Trocador de Calor de Tanque Agitado	14
2.4 REGIMES DE ESCOAMENTO	16
2.4.1 Coeficiente Global de Transferência de Calor.....	17
2.4.2 Coeficiente de Película	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
3.2 AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	23
3.3 DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.3.1 Materiais e Instalação Experimental	23
3.3.2 Procedimento Experimental	24
3.4 DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	26
3.4.1 Resolução De Cálculo Para O Experimento 4.....	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 EXPERIMENTOS EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO E ESTACIONÁRIO E FLUXO CONTÍNUO DAS CORRENTES QUENTE E FRIA	31
4.2 DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DE CALOR E PERDAS DE CALOR.....	33
4.3 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	34
4.4 ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR	35

4.4.1 Variação Das Perdas De Calor Em Função Da Temperatura De Entrada Do Fluido Quente.....	35
4.4.2 Variação Dos Coeficientes De Transferência De Calor Em Função Do Número De Reynolds	36
5 CONCLUSÕES.....	40
6 PERSPECTIVAS.....	41
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE	44
APÊNDICE A – Experimentos 1, 2 e 3.....	44
APÊNDICE B – Experimentos 4 e 5.....	45
APÊNDICE C – Experimento 6.....	46
APÊNDICE D – Experimento 9.....	47
APÊNDICE E – Experimento 10	47

1 INTRODUÇÃO

O constante avanço tecnológico da era atual impulsiona a otimização dos processos industriais diversos. Assim, o estudo dos fenômenos de transporte é cada vez mais abordado e aprofundado, uma vez que estes estão presentes, em geral, em todos os segmentos industriais. Os três mecanismos de transporte são: transferência de momento, calor e massa. Comumente, os três aparecem combinados nos processos industriais. (INCROPERA et al., 2008)

Em grande parte das indústrias químicas, alimentícia e farmacêutica, o fenômeno de transferência de calor desempenha um importante papel, uma vez que o mesmo irá influenciar em diversos fatores do processo industrial, desde o uso de outros equipamentos, até o produto final em si. (ARFELLI, 2009)

Em geral, a troca de calor nas indústrias ocorre entre dois fluidos, com o intuito de aquecer e/ou resfriar determinada substância. Para o aperfeiçoamento do processo de transferência de calor, utilizam-se os trocadores de calor. Estes são dispositivos que auxiliam o transporte de calor entre dois fluidos à diferentes temperaturas. (ÇENGEL; GHAJAR, 2012)

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), são diversas as aplicações dos trocadores de calor, desde sistemas de aquecimento e resfriamento domésticos até processos químicos e produção de grande potência em usinas.

Existem diversos modelos de trocadores de calor. A classificação destes dispositivos é feita, usualmente, considerando-se a configuração do mesmo e o regime de escoamento no qual ele será operado. (INCROPERA et al., 2008)

A seleção do trocador adequado a ser utilizado no processo, bem como o projeto do mesmo, irá depender de diversos fatores, como a taxa de transferência de calor, o custo, potência de bombeamento, dimensão, materiais e outros. (ÇENGEL; GHAJAR, 2012)

Nos processos de troca térmica entre dois fluidos, geralmente se leva em conta os mecanismos de condução, convecção e radiação, avaliando-se a contribuição de cada um desses para o sistema. Nas análises dos trocadores de calor, avaliam-se o coeficiente global de transferência de calor (U) e o coeficiente convectivo de transferência de calor, ou coeficiente de película (h). (INCROPERA et al., 2008)

Através do coeficiente global de transferência de calor, pode-se avaliar a contribuição dos mecanismos envolvidos no processo de transferência de calor. Além disso, com a determinação do coeficiente de película, pode-se obter a quantidade de calor transferida entre uma superfície e um fluido, ou vice-versa. Com estes parâmetros pode-se determinar a taxa de transferência de calor. (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

Assim, evidencia-se a importância dos coeficientes de transferência de calor, global e de película, nos processos industriais. Logo, torna-se necessário a avaliação dos trocadores de calor em condições dinâmicas, a fim de determinar o comportamento dos coeficientes de transferência de calor em diferentes sistemas.

Logo, o problema científico abordado neste trabalho refere-se à influência exercida no comportamento do coeficiente global de transferência de calor (U) e do coeficiente de película (h) por meio da operação de trocadores de calor em condições dinâmicas.

Assim, com base em pesquisas e experimentos anteriores, tem-se como hipótese que os coeficientes de transferência de calor (global e de película) variam de acordo com as condições de operação dos trocadores de calor em diferentes regimes de escoamento.

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento de um trocador de calor de tanque agitado em regime estacionário, visando determinar quais as melhores condições para a realização de experiências laboratoriais didáticas.

Como objetivos específicos, têm-se:

1. Determinar as perdas de calor na instalação de acordo com as mudanças de temperatura do fluido quente e variação da velocidade de agitação.
2. Determinar quais as variáveis que tem maior influência nos valores dos coeficientes de transferência de calor através da análise do comportamento do trocador de calor por meio de gráficos;
3. Verificar o tipo de arranjo dos fluxos do trocador usado nos experimentos através da análise do comportamento das temperaturas coletadas em função do tempo;
4. Determinar a extensão do tempo necessário para atingir o estado estacionário na instalação experimental;
5. Determinar o coeficiente global de transferência de calor (U) e os coeficiente convectivos de transferência de calor (h_i e h_o) para avaliar o comportamento do trocador de calor nos experimentos realizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIA

Os fenômenos de transportes são fundamentais para o entendimento de diversos processos em inúmeras áreas, como engenharia, agricultura, meteorologia, biologia, farmácia e outras. No âmbito da engenharia, os fenômenos de transportes constituem um de seus pilares em razão de suas importantes aplicações, pois permitem a otimização dos processos de fabricação e produção. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004)

Segundo Roma (2006), os fenômenos de transportes tratam da movimentação de uma grandeza física de um ponto a outro no espaço. Ao todo, são três fenômenos: transporte de quantidade de movimento, transporte de energia térmica e transporte de massa. O primeiro avalia a dinâmica dos fluidos, o segundo trata-se da transferência de calor e, o último, aborda a transferência de massa de diversas espécies químicas. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004)

As aplicações destes fenômenos são inúmeras, nos ramos da engenharia podem-se citar as aplicações no conforto térmico em edificações na Engenharia Civil; o estudo da difusão de poluentes no ar, água e solo na Engenharia Ambiental; cálculos de dissipação de potência na Engenharia Elétrica; processos de usinagem, tratamento térmico e cálculo de máquinas hidráulicas na Engenharia Mecânica; otimização dos processos produtivos e transporte de fluidos na Engenharia de Produção; na Engenharia Química, os fenômenos de transportes constituem a base das operações unitárias, sendo aplicados nas indústrias farmacêutica, alimentícia, entre outras. (ROMA, 2006)

Com o constante avanço da tecnologia, incluindo suas mudanças rápidas e difusas, somado à evolução dos fenômenos de transportes, continuam a surgir novas áreas de aplicações para estes, tais como a biotecnologia, nanotecnologia, microeletrônica, indústria de polímeros e outras. (KREITH; BOHN, 2003; BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004)

Em geral, os fenômenos de transferência ocorrem simultaneamente em processos industriais, agrícolas, biológicos e meteorológicos. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004). Entre os três, o transporte de energia é fundamental na efetivação de novos produtos nas áreas de tecnologia da informação, biotecnologia e farmacologia. (INCROPERA et al., 2008)

Nas grandes indústrias, um dos principais problemas relacionados à transferência de calor é determinar a taxa de transferência de calor em um determinado gradiente de temperatura, uma vez que esta influi no custo, viabilidade e tamanho do equipamento

necessário para transferir a quantidade de calor desejada. Para isso, é necessário que se faça uma profunda análise sobre a transferência de calor. (KREITH; BOHN, 2003)

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Long e Sayma (2009), pode-se definir energia como a capacidade de uma substância realizar trabalho. Assim, de acordo com Incropera et al. (2008), a transferência de calor é a energia térmica em trânsito em virtude de uma diferença de temperaturas no espaço. Logo, sempre que houver um gradiente de temperatura em um sistema haverá transferência de calor. (KREITH; BOHN, 2003)

De acordo com a literatura (INCROPERA et al., 2008), existem três mecanismos ou modos distintos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Para Bird, Stewart e Lightfoot (2004), há ainda o mecanismo difusivo de energia, que ocorre em misturas que estejam se interdifundindo.

2.2.1 Condução

A condução está relacionada com o transporte molecular de energia, uma vez que este mecanismo ocorre em razão das atividades atômicas e moleculares. Ou seja, a condução pode ser definida como o transporte de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas, em virtude de suas interações intermoleculares. Pode-se dizer ainda que a transferência de calor por condução irá ocorrer sempre que houver um gradiente de temperatura em um meio sólido ou fluido. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004; INCROPERA et al., 2008; LONG; SAYMA, 2009)

Para determinar a taxa de transferência de calor através do mecanismo da condução utiliza-se a Lei de Fourier. Desenvolvida por Joseph Fourier e publicada em seu livro *Theórie Analytique de la Chaleur* em 1822, a lei empírica diz que “o fluxo de calor, resultante da condução térmica, é proporcional à magnitude do gradiente de temperatura e oposto a ele em sinal”. (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2008). A lei é representada pela Equação 1:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Em que:

q (W/m²): é o fluxo de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência e proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx .

k (W.m⁻¹.K⁻¹): constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica.

A condutividade térmica depende do tipo de material do meio. O sinal negativo advém da segunda lei da termodinâmica, que diz que o calor deve fluir do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. (KREITH; BOHN, 2003; INCROPERA et al., 2008)

2.2.2 Convecção

A convecção ocorre quando existe o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a temperaturas diferentes. Ela abrange outros dois mecanismos: a convecção natural e a convecção forçada. A diferença entre estes se dá em virtude do tipo de movimento do fluido. Este, por sua vez, é resultado da soma dos movimentos moleculares e macroscópico do fluido. Quando o fluido se move em razão de uma diferença de densidade entre as moléculas, o mecanismo é então chamado de convecção natural. Entretanto, quando este movimento é provocado por uma diferença de pressão gerada por uma bomba ou ventoinha, o mecanismo é então chamado de convecção forçada. (KREITH; BOHN, 2003; INCROPERA et al., 2008)

Independente do mecanismo, a equação geral para determinar a taxa de transferência de calor é dada pela Lei do Resfriamento de Newton, representada pela Equação 2:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Em que:

q (W/m^2): fluxo de calor por convecção. Este é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície, T_s , e o fluido, T_∞ .

h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$): coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente de película, depende das condições da camada limite. (INCROPERA et al., 2008)

Além disso, este coeficiente apresenta dependência com algumas propriedades do fluido, o que o torna uma função de diversas variáveis, dificultando o seu cálculo analítico. Assim, para casos em que o nível de complexidade é alto, o coeficiente de película é determinado experimentalmente ou, ainda, com o auxílio de métodos numéricos. (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

2.2.3 Radiação

Diferentemente dos mecanismos de condução e convecção, a radiação térmica é um mecanismo eletromagnético em que o transporte de energia ocorre com a velocidade da luz

em regiões do espaço desprovidas de matéria. Ou seja, a transferência de calor ocorre através de fótons ou ondas eletromagnéticas. Esse transporte é atribuído a alterações nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004; INCROPERA et al., 2008)

De modo simplificado, o fluxo de calor emitido por um radiador perfeito (corpo negro) pode ser representado pela equação a baixo:

$$q_r = \sigma A_s T_s^4 \quad (3)$$

Em que:

q_r (W): taxa de calor irradiado.

A_s (m²): área da superfície.

T_s^4 : temperatura da superfície.

σ : constante adimensional de Stefan-Boltzmann, que possui o valor de $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴).

A constante de Stefan-Boltzmann é nomeada em razão dos cientistas J. Stefan e L. Boltzmann. O primeiro foi o responsável por descobrir a equação acima experimentalmente, em 1879. O segundo fez a dedução teórica da equação, em 1884. (KREITH; BOHN, 2003)

2.3 TROCADORES DE CALOR

A transferência de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas está presente em diversas aplicações da engenharia e em inúmeros processos industriais. Para que essa troca ocorra da maneira mais adequada utiliza-se o equipamento conhecido como trocador de calor. Este é utilizado em aplicações específicas, como o aquecimento de ambientes e o condicionamento de ar. (INCROPERA et al., 2008)

De acordo com Kreith e Bohn (2003), o trocador de calor é um instrumento utilizado para transferir calor de uma substância quente para uma substância fria que, normalmente, são fluidos. Em relação à classificação, pode-se dizer que existem três tipos de trocadores de calor: recuperadores, regeneradores e trocadores de calor de contato direto. (LONG; SAYMA, 2009)

Nos trocadores de calor do tipo recuperadores, os fluidos quente e frio são separados por uma parede e a troca de calor se dá através da combinação dos mecanismos de convecção e condução. Como exemplo deste tipo de equipamento tem-se o trocador de calor de superfície estendida. (KREITH; BOHN, 2003)

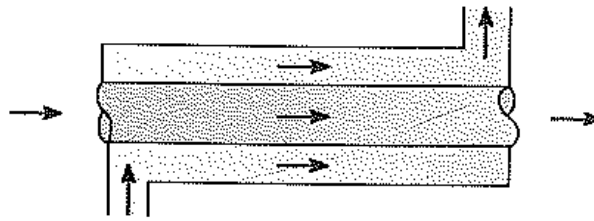
Os regeneradores são trocadores de calor nos quais os fluidos quente e frio escoam alternadamente através de uma matriz (núcleo de trocador de calor). A configuração da matriz pode ser fixa, na qual os fluidos escoam alternadamente em um trocador estacionário; contínua, utilizando-se um arranjo de matrizes; ou rotativa, no qual os fluidos quente e frio são exposto à superfície de uma matriz circular giratória. (KREITH; BOHN, 2003)

Nos trocadores de calor de contato direto, a transferência de calor entre os fluidos quente e frio ocorre através do contato direto entre os mesmos. Como exemplo deste tipo de trocador de calor, têm-se as torres de refrigeração. (KREITH; BOHN, 2003)

Segundo Incropera et al. (2008), pode-se ainda classificar os trocadores de calor de acordo com a configuração de construção e o tipo de escoamento (paralelo, contracorrente ou cruzado). As configurações mais comuns são: trocador de calor casco e tubo, trocador de calor bitubular ou de tubos concêntricos e trocador de calor de tanque agitado.

Em relação ao escoamento, diz-se que o mesmo é paralelo quando ambos os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e saem também pela mesma extremidade, como mostra a Figura 1.

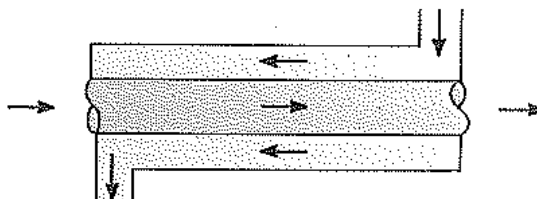
Figura 1 - Escoamento paralelo em trocador de calor bitubular.



Fonte: INCROPERA et al. (2008).

No escoamento contracorrente, os fluidos entram no trocador de calor por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e saem do equipamento também por extremidades opostas, como ilustra a Figura 2.

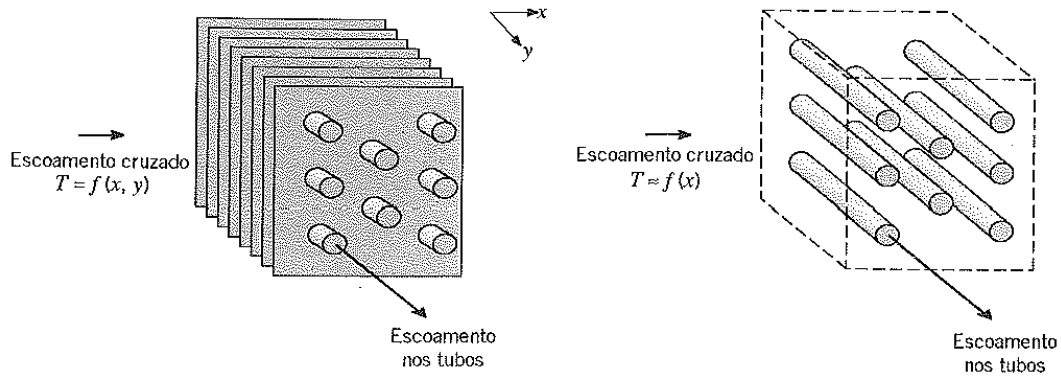
Figura 2 - Escoamento contracorrente em trocador de calor bitubular.



Fonte: INCROPERA et al. (2008).

Por fim, no escoamento cruzado um fluido escoia perpendicularmente ao outro, podendo ser classificado como misturado e não misturado, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Escoamento cruzado em trocadores de calor tubulares com e sem aleta.

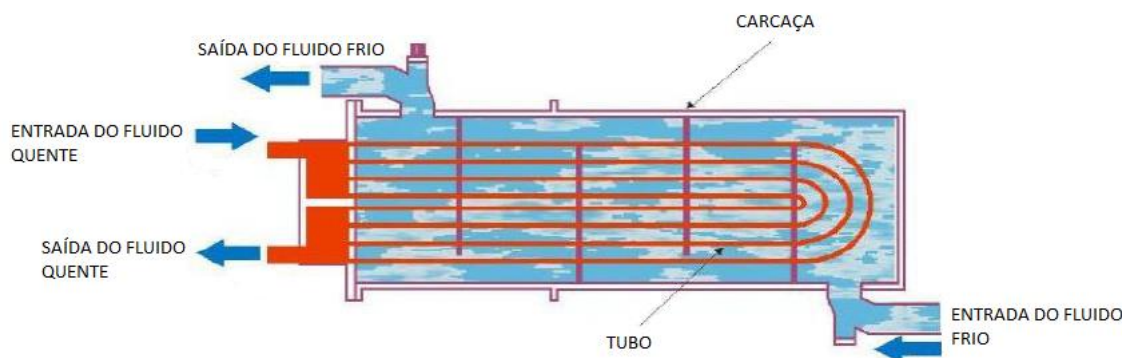


Fonte: INCROPERA et al. (2008).

São diversos os tipos de trocadores de calor utilizados nas indústrias e, dentre esses, destaca-se o trocador de calor casco e tubo. De forma geral, este é constituído por um casco, geralmente cilíndrico, um feixe de tubos e dois cabeçotes, um de entrada e outro de saída. (SOUZA, 2013). O cabeçote de entrada é conectado ao feixe de tubos e tem como função a admissão e/ou descarga dos tubos, enquanto o cabeçote de saída, além de dar acabamento ao casco, serve para retornar e/ou descarregar o fluido dos tubos. (BICCA, 2006)

Assim, neste tipo de equipamento, utilizam-se dois fluidos de trabalho, o primeiro escoia pelo casco, que normalmente é água de refrigeração, e o segundo fluido escoia pelos tubos. Dessa forma, a transferência de calor se dá através das paredes dos tubos (SOUZA, 2013). O feixe de tubos pode ser reto, ou em formato de U, como mostra a Figura 4.

Figura 4- Esquema de um trocador de calor casco e tubo operando em escoamento paralelo.



Fonte: SANCHES (2009).

O amplo uso industrial deste tipo de trocador de calor se dá em virtude da resistência de sua construção, flexibilidade de projeto e adaptação às condições de processo, como por exemplo, a faixa de pressão de operação. (RIBEIRO, 1984). Com o avanço tecnológico, os trocadores de calor casco e tubo passaram por diversas modificações, tornando-se mais versáteis às necessidades industriais. (SANCHES, 2009)

O projeto de um trocador de calor pode ser dividido em duas etapas: projeto térmico e projeto mecânico. No primeiro, procura-se dimensionar e quantificar a transferência de energia térmica e a perda de carga, respectivamente. Além desses, determinam-se outros parâmetros da construção, como diâmetro e comprimento dos tubos, espessura da parede e etc. (SOUZA, 2013)

Uma vez que as propriedades mecânicas exercem influência sobre o desempenho térmico do trocador de calor, a TEMA – *Tubular Exchanger Manufacturer's Association* – padronizou as propriedades geométricas dos trocadores de calor. (SOUZA, 2013; TEMA, 2007; BICCA, 2006)

Outra classe de trocadores de calor de grande importância nos processos industriais são os tanques, que podem ser agitados, encamisados, com serpentina, entre outros. Dentre suas aplicações, destaca-se o seu uso no tratamento térmico em processos químicos, farmacêuticos e alimentícios.

Além disso, a transferência de calor em tanques agitados influencia o projeto de reatores, evaporadores, cristalizadores e misturadores, evidenciando a importância deste equipamento nos processos químicos.

2.3.1 Trocador de Calor de Tanque Agitado

2.3.1.1 Tipos de Tanques

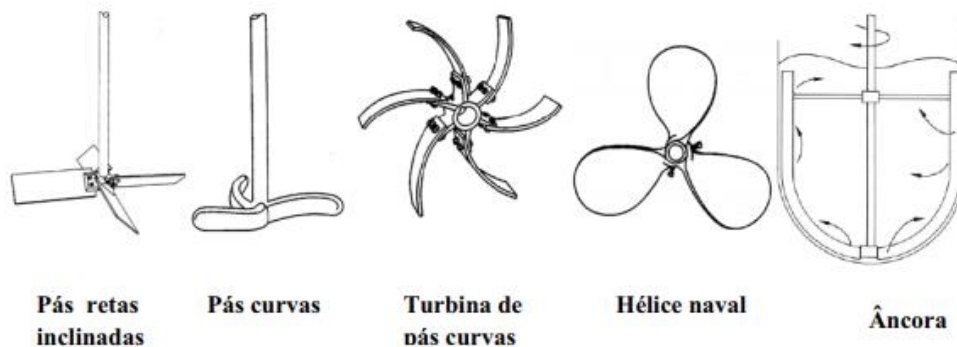
De acordo com Arfelli (2009), pode-se definir tanque como qualquer recipiente capaz de armazenar ou processar um determinado fluido, independente de seu tipo, formato ou dimensão.

Para o projeto de um tanque, geralmente são considerados fatores como tipo, material e tempo, de acordo com a necessidade do produto desejado. O sistema de transferência de calor do tanque agitado não é constituído somente pelo mesmo, mas também por outras ferramentas que, agregadas ao tanque, otimizam a troca de calor. (ARFELLI, 2009). Dentre estes, os impelidores e/ou agitadores desempenham importantes funções no processo de transferência de energia térmica.

2.3.1.2 Tipos de Agitadores

Existem diversos tipos de agitadores, a escolha do mesmo irá depender de parâmetros específicos do projeto, como viscosidade do fluido e estado físico dos reagentes e produtos. A Figura 5 ilustra os principais tipos de agitadores.

Figura 5 - Principais tipos de agitadores.



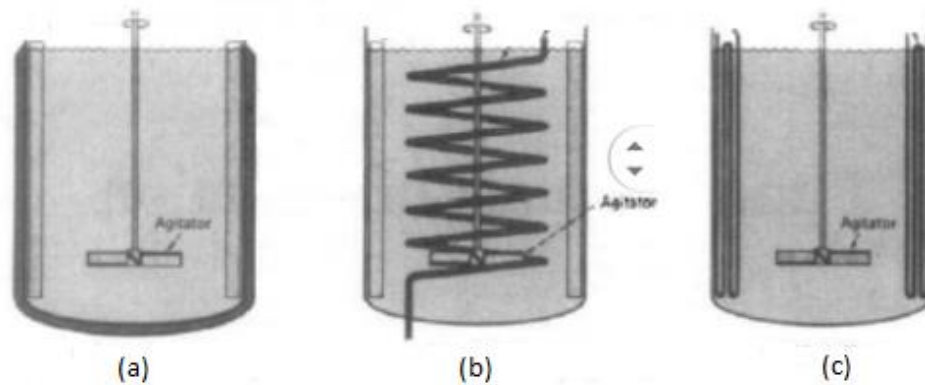
Fonte: ARFELLI (2009)

Usualmente, os agitadores do tipo pás inclinadas servem para a maioria das substâncias, uma vez que os mesmos possuem uma ação suave. Enquanto os agitadores tipo âncora são preferidos para processos com líquidos mais viscosos. Os agitadores, em geral, possuem a função de otimizar a transferência de calor e reduzir a formação de depósitos. (ARFELLI, 2009)

Além dos dispositivos já citados, existem outras ferramentas que são responsáveis pelo fornecimento de energia térmica ao tanque e, conseqüentemente, fazem parte do sistema de transferência de calor. Entre esses, têm-se as camisas, serpentinas, chicanas e placas. Em

adição, as chicanas e defletores possuem também a função de promover maior ação de mistura e evitar a formação de redemoinhos. (INNOCENTINI, 2015)

Figura 6 - Tipos de mecanismos para troca de calor em tanques agitados. (a) Camisa. (b) Serpentina. (c) Chicanas.



Fonte: INNOCENTINI (2015).

2.4 REGIMES DE ESCOAMENTO

A maior parte dos estudos de fenômenos de transporte envolve o movimento de fluidos. Tal processo é conhecido como escoamento. Assim, define-se escoamento como o processo de movimentação das moléculas de um fluido, umas em relação às outras e nos limites impostos ao escoamento. (ROMA, 2006)

Para descrever os escoamentos, utilizam-se parâmetros físicos, os quais são avaliados ao longo do espaço e do tempo. A classificação do escoamento é definida a partir do comportamento desses parâmetros físicos. (ROMA, 2006)

Dentre os principais parâmetros avaliados, destaca-se a velocidade, que é responsável por mensurar a alteração da posição de um elemento do fluido em função do tempo. É importante ressaltar que, em um fluido, cada partícula ou molécula tem ou pode ter velocidade diferente. (POTTER; WIGGERT, 2011)

Dessa forma, a velocidade torna-se um importante parâmetro de estudo nos escoamentos, uma vez que um fluido é composto por moléculas ou elementos quase independentes, que são unidos por uma força de atração, mas ao serem submetidos ao escoamento sofrem deformação. (POTTER; WIGGERT, 2011)

Logo, os elementos não mantêm suas formas geométricas iniciais e, com o tempo, diferentes partes do elemento são submetidas a diferentes velocidades. Tal característica faz necessário acompanhar a velocidade em diferentes pontos do escoamento, a fim de obter uma avaliação do seu comportamento como um todo. (POTTER; WIGGERT, 2011)

Além da velocidade, avalia-se o comportamento das moléculas do fluido, que tendem a adotar um padrão de movimentos, definindo a estrutura interna do escoamento. Assim, o escoamento pode ser laminar ou turbulento. (ROMA, 2006)

Em adição, o comportamento espaço-temporal do escoamento também é avaliado. Logo, os escoamentos podem ser permanentes ou não-permanentes. (ROMA, 2006)

2.4.1 Coeficiente Global de Transferência de Calor

O coeficiente global de transferência de calor (U) sistematiza as diferentes resistências térmicas equivalentes existentes num processo de troca de calor entre duas correntes de fluidos. O mesmo pode ser determinado pelas Equações 4 e 5:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (4)$$

Em que:

U é o coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

h_i e h_o são os coeficientes peliculares ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$).

$$q = U \cdot A_s \cdot \Delta T \quad (5)$$

Em que:

q é a quantidade de calor cedida ao fluido (W);

U é o coeficiente global de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);

A_s é a área de transferência de calor (m^2);

ΔT é a variação da temperatura (K)

Uma das principais barreiras para a troca térmica é a incrustação. A incrustação é um fenômeno que engloba a formação, fixação e transporte de depósitos que interferem diretamente nos processos de transferência de calor. Logo, faz-se necessário calcular o coeficiente global de transferência de calor “sujo” (U_d), que avalia o impacto da incrustação que o fluido causa no equipamento através do fator de incrustação (R_d). (MAURICE; STEWART, 2014)

Este fator é um valor constante dependente do fluido e das condições do mesmo. A Tabela 1 apresenta fatores de incrustação típicos:

Tabela 1 - Fatores de incrustação para diferentes fluidos.

Fluido	Rd (m ² .K ⁻¹ .KW ⁻¹)
Água	0,18-0,35
Água salgada	0,18-0,35
Água rio	0,35-0,53
Óleo	0,36
Solventes orgânicos	0,36

Fonte: TEMA (2007).

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor sujo utiliza-se a equação 6, de acordo com Incropera et al. (2008):

$$U_d = \frac{1}{R_d + \frac{1}{U}} \quad (6)$$

Em que:

U_d é o coeficiente global de transferência de calor sujo (W/m².K);

R_d é o fator de incrustação para a água (m².K⁻¹.KW⁻¹);

U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m².K).

2.4.2 Coeficiente de Película

O coeficiente de película ou coeficiente de transferência de calor por convecção, h , é um parâmetro essencial para obter a quantidade de calor transferida de uma superfície para um fluido e vice-versa. Logo, a determinação de h está diretamente relacionada com a taxa de transferência de calor. (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

O cálculo de h depende de algumas propriedades do fluido, como viscosidade, condutividade térmica, entre outros. Assim, existe uma dificuldade para calcular esta variável, uma vez que a mesma depende de diversos fatores. (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

2.4.2.1 Coeficiente de Película em Regime Estacionário

Para calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor, ou coeficiente de película (h) utiliza-se a Equação 7 (OLIVEIRA, 2012):

$$\frac{hD_t}{k} = a \left(\frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \right)^b \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^m \quad (7)$$

Em que:

h é o coeficiente de película (W/m².K);

D_t é o diâmetro do tanque (m);

k é a condutividade térmica do fluido (W/m.K);

D_a é o diâmetro do agitador (m);

N é a velocidade de agitação (rpm);

ρ é a densidade do fluido (kg/m³);

C_p é a calor específico do fluido (J/kg.K);

μ é a viscosidade do fluido (Pa.s).

Todas as propriedades são avaliadas na temperatura do seio do fluido, com exceção de μ_w , que é calculada na temperatura da parede. Os valores de a e b são dependentes dos elementos de agitação utilizados na instalação, expostos na Tabela 2:

Tabela 2 - Constantes para estimar os coeficientes peliculares.

Tipo de Agitador/ Chicanas	a	b	m	Re (min-max)
Pá / Sem	0,36	2/3	0,21	300 - 3×10 ⁵
Turbina / Sem	0,54	2/3	0,14	30 - 3×10 ⁵
Turbina / Com	0,74	2/3	0,14	500 - 3×10 ⁵
Âncora / Sem	1,00	1/2	0,18	10 - 300
	0,36	2/3	0,18	300 - 3×10 ⁴

Fonte: OLIVEIRA (2012).

2.4.2.2 Coeficiente de Película em Regime Transiente

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor em regime transiente, h , pode-se usar o Método da Capacitância Global, em que se considera desprezível o gradiente de temperatura no interior do sólido, nas três dimensões x , y e z , variando somente com o tempo. (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

Considera-se o seguinte balanço de energia:

$$-h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

Em que:

h é o coeficiente de película (W/m²K);

A_s é a área da superfície (m²);

T_s é a temperatura da superfície (K);

T_∞ é a temperatura do fluido (K);

ρ é densidade do fluido (kg/m³);

V é o volume do trocador utilizado (m³);

C_p é o calor específico do fluido (J/kg.K);

t é o tempo necessário para se atingir o estado transiente (s).

Tem-se que:

$$\theta = T_s - T_\infty \quad (9)$$

$$\theta_i = T_{si} - T_\infty \quad (10)$$

Logo:

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_s - T_\infty}{T_{si} - T_\infty} = \exp \left[- \left(\frac{h \cdot A_s}{\rho \cdot V \cdot c} \right) \cdot t \right] \quad (11)$$

Em que T_{si} é a temperatura no tempo zero.

O método da capacitância global é o método mais simples e pode ser utilizado na solução de problemas transientes de aquecimento e de resfriamento. Assim, é importante observar a validade do método, ou seja, em que condições o método pode ser utilizado. De acordo com X, pode-se afirmar que o método é válido quando obedecer a seguinte relação: (MIRANDA JÚNIOR; GONÇALVES, 2016)

$$Bi = \frac{h \cdot L}{k} < 0,1 \quad (12)$$

Em que:

Bi é o número de Biot;

k é a condutividade térmica (W/m.K);

L é o comprimento característico (m), definido na Eq. 13.

$$L = \frac{V}{A_s} \quad (13)$$

Se o número de Biot for menor que 0,1; quer dizer que o erro associado ao uso deste método é desprezível.

3 MATERIAL E MÉTODOS

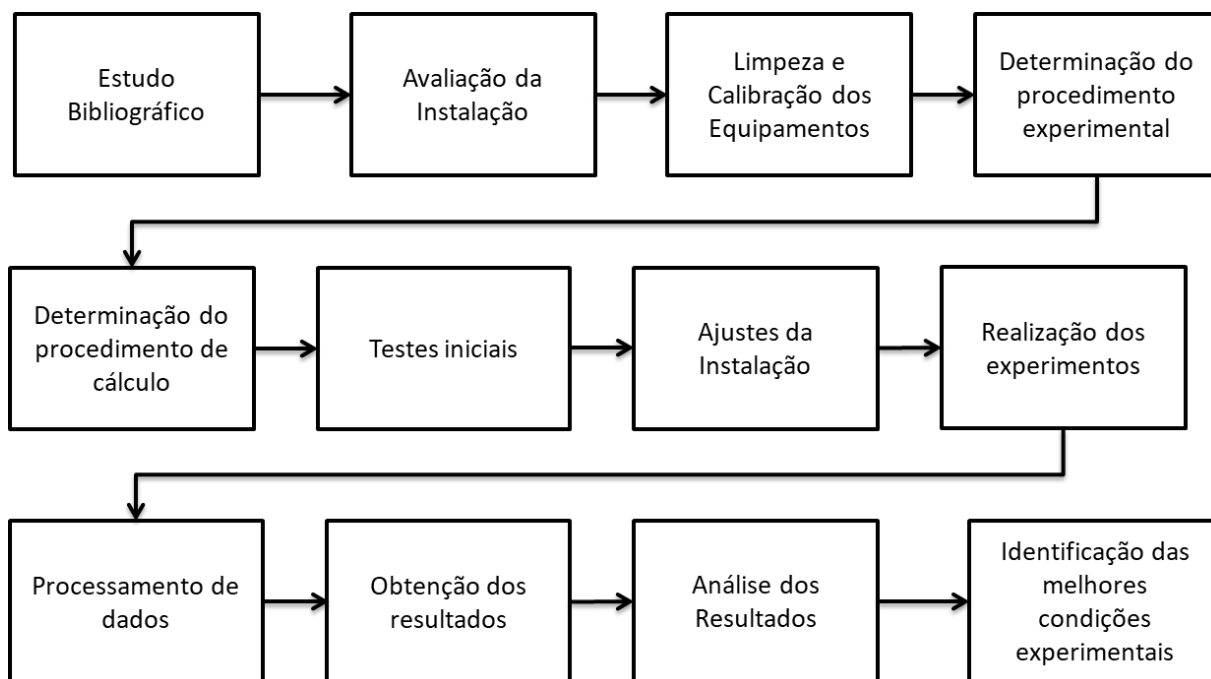
Foram realizados experimentos de transferência de calor, iniciando em condições não estacionárias até que se atingisse o estado estacionário, e fluxo contínuo no trocador de calor de tanque agitado mecanicamente e encamisado, localizado no contêiner 02 do Laboratório de Engenharia Química da Escola Superior de Tecnologia (EST/UEA), com o intuito de analisar o comportamento do trocador de calor através da determinação das variações dos coeficientes de troca de calor em estado estacionário e não estacionário.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Com o objetivo de obter os melhores resultados nas aulas práticas a serem realizadas pelos alunos do curso de Engenharia Química nesta instalação, com o propósito de analisar o coeficiente global de transferência de calor (U) e os coeficientes de película de transferência de calor (h_i e h_o) através do aquecimento da água, foram realizados experimentos utilizando-se um trocador de calor do tipo tanque agitado com camisa. Foram avaliados fatores como tempo, variação de temperatura, vazão volumétrica e velocidade de agitação.

Assim, adotou-se o a metodologia ilustrada pelo diagrama de blocos na Figura 7.

Figura 7 - Metodologia de desenvolvimento do projeto.



Fonte: Própria (2019).

3.2 AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Inicialmente foi realizada uma avaliação em toda a instalação do contêiner 02 do Laboratório de Engenharia Química, com o intuito de obter melhores resultados para as práticas laboratoriais. Após, realizaram-se os ajustes necessários no sistema de transferência de calor para adequação aos objetivos propostos, tais como:

1. Calibração dos termômetros utilizados;
2. Revisão e calibração dos rotâmetros medidores do fluxo de água quente e fria;
3. Validação da velocidade de rotação do agitador;
4. Revisão das bombas centrífugas para retirar o óxido de ferro acumulado.

3.3 DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após avaliação da instalação foi, então, determinado o procedimento experimental e as condições de operação.

3.3.1 Materiais e Instalação Experimental

Os materiais utilizados neste experimento já se encontravam disponíveis no Laboratório de Engenharia Química e faziam parte de uma instalação antiga, montada no ano de 2012, com exceção dos termômetros que foram substituídos.

3.3.1.1 Descrição da instalação experimental:

Abaixo estão listados os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos:

- 03 Termômetros digitais de sonda;
- 01 Termômetro digital tipo espeto;
- 01 Tanque termoestatizado para armazenamento da água quente;
- 01 Tanque de armazenamento de água fria;
- 01 Trocador de calor de tanque agitado com camisa;
- 02 Bombas centrífugas SHX-HOBBY;
- 02 Rotâmetros.

O sistema consistiu de um reservatório (1) no qual se colocou a água que foi aquecida. Esta foi para o tanque de aquecimento (2), que foi agitado no seu interior por um sistema de motor-reductor (3) controlado, que girou a uma velocidade desejada. Para controlar a vazão de água na camisa utilizou-se um rotâmetro (4). A água quente foi bombeada a partir

de um tanque de aquecimento para a camisa com o auxílio de uma bomba (5). Na saída da camisa, a água retornou ao mesmo tanque para manter sua temperatura no valor desejado. (MORIYA, 2012)

Figura 8 - Instalação experimental do trocador de calor encamisado com agitação.



Fonte: Própria (2019).

3.3.2 Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi adaptado de aulas práticas aplicadas na disciplina de Operações Unitárias 2, ministrada no curso de Engenharia Química da Escola Superior de Tecnologia da UEA, pela professora Regina Yanako Moriya.

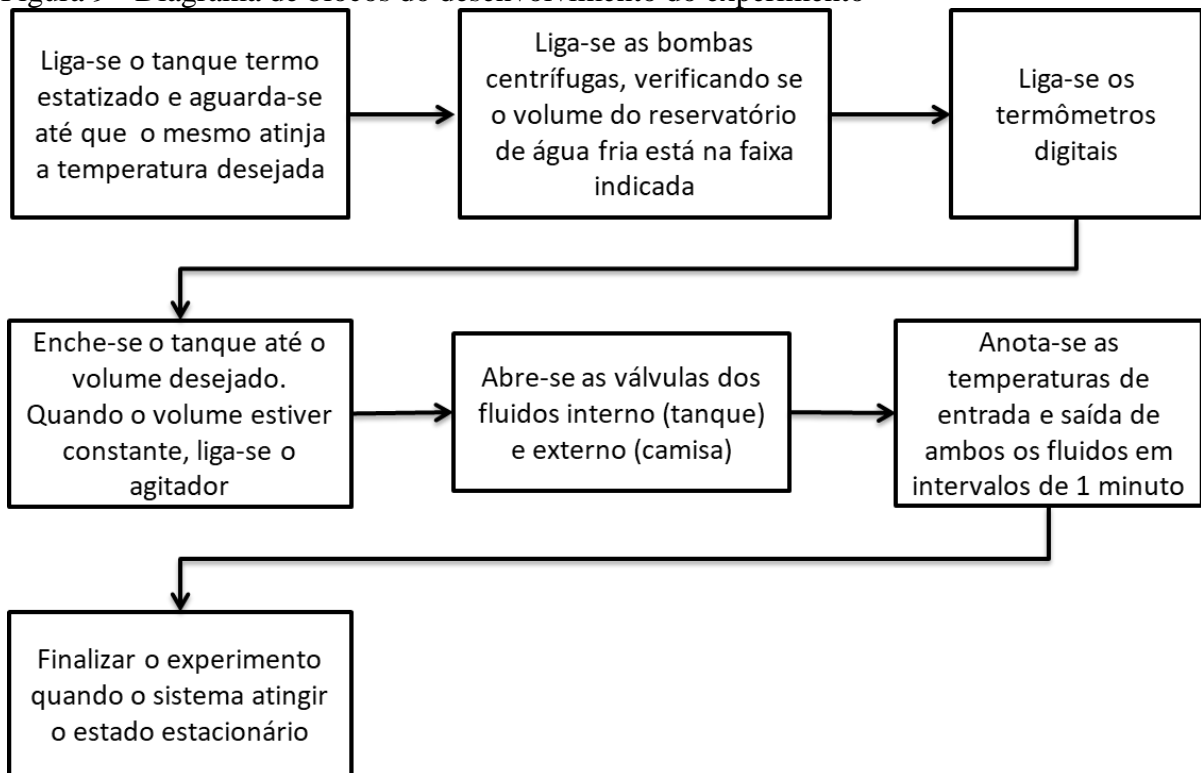
O experimento consistiu na coleta de temperaturas de entrada e saída do fluido da camisa (água quente) e temperaturas de entrada e saída do fluido do tanque (água fria). As temperaturas foram tomadas em intervalos de 1 minuto até que o sistema atingisse o estado estacionário, o que aconteceu gradualmente a medida em que as diferenças de temperaturas

das correntes do fluido frio e do fluido quente mantiveram-se constantes ao longo do tempo. A partir dos dados coletados calculou-se:

1. Quantidade de calor fornecida pelo fluido da camisa;
2. Quantidade de calor recebida pelo fluido do tanque;
3. Perdas de calor para o meio ambiente;
4. Coeficiente global de transferência de calor experimental;
5. Coeficiente convectivo de transferência de calor interno;
6. Coeficiente convectivo de transferência de calor externo.

A Figura 9 representa os passos seguidos para a realização do experimento:

Figura 9 - Diagrama de blocos do desenvolvimento do experimento



Fonte: Própria (2019).

Para a realização dos experimentos foram consideradas três variáveis de análise: vazão do fluido da camisa, vazão do fluido do tanque e velocidade de agitação. Para comparação com a literatura, decidiu-se manter o fluxo do fluido do tanque (fluido frio) constante em todos os experimentos.

A Tabela 3 apresenta a matriz de planejamento experimental, considerando o total de 11 experimentos.

Tabela 3 - Matriz de planejamento experimental.

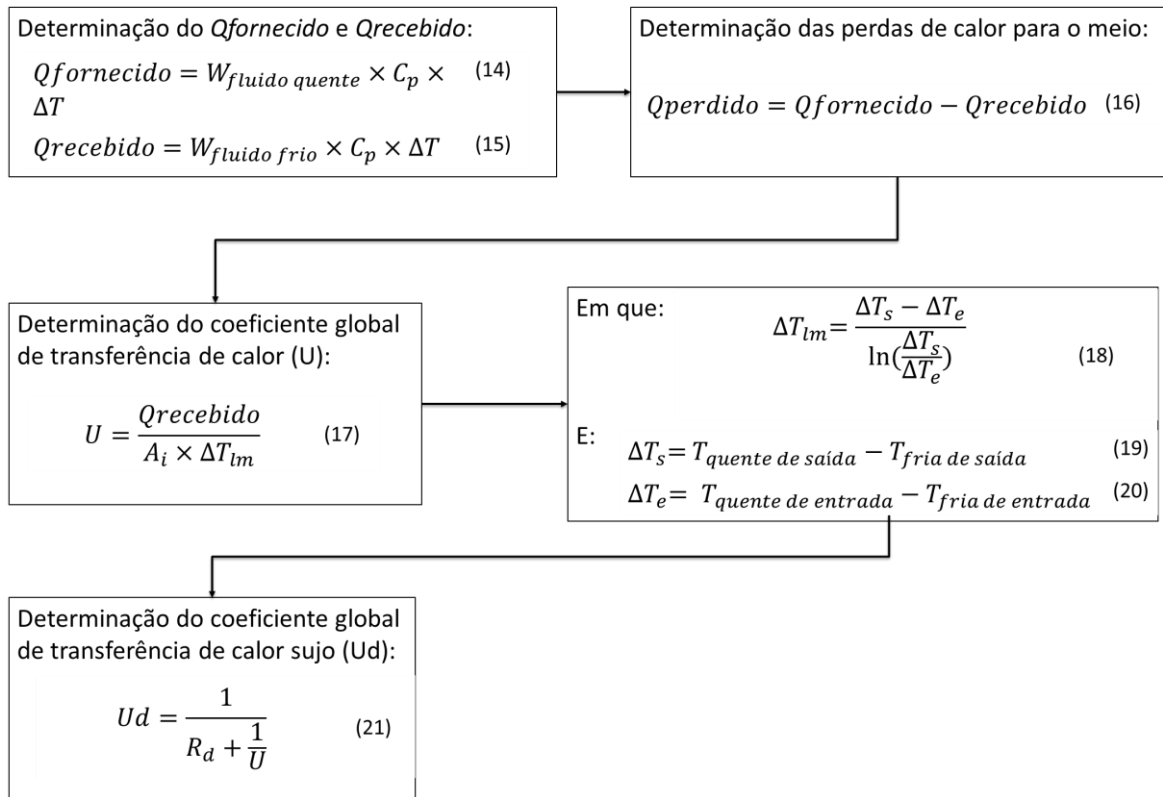
Experimento	Fluxo Fluido Frio (L/h)	Fluxo Fluido Quente (L/h)	Velocidade de Agitação (rpm)
1	200	200	60
2	200	200	60
3	200	200	60
4	200	150	100
5	200	150	100
6	200	125	100
7	200	125	100
8	200	125	0
9	200	125	0
10	200	150	60
11	200	150	60

Fonte: Própria (2019).

3.4 DETERMINAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Para os cálculos das quantidades de calor fornecida e recebida, bem como os coeficientes de película e o coeficiente global seguiu-se o procedimento enunciado abaixo, nas Figuras 10 e 11, respectivamente, de acordo com a metodologia proposta em Çengel e Ghajar (2012). Para as propriedades físico-químicas da água, utilizou-se os dados da literatura, disponíveis em Kreith e Bohn (2003), Incropera et al. (2008), Foust et al. (2012).

Figura 10 - Procedimento de cálculos das quantidades de calor fornecida e recebida, perda de calor e coeficiente global.



Fonte: Própria (2019).

Em que:

U é o coeficiente global de transferência de calor ($W.m^{-2}.K^{-1}$);

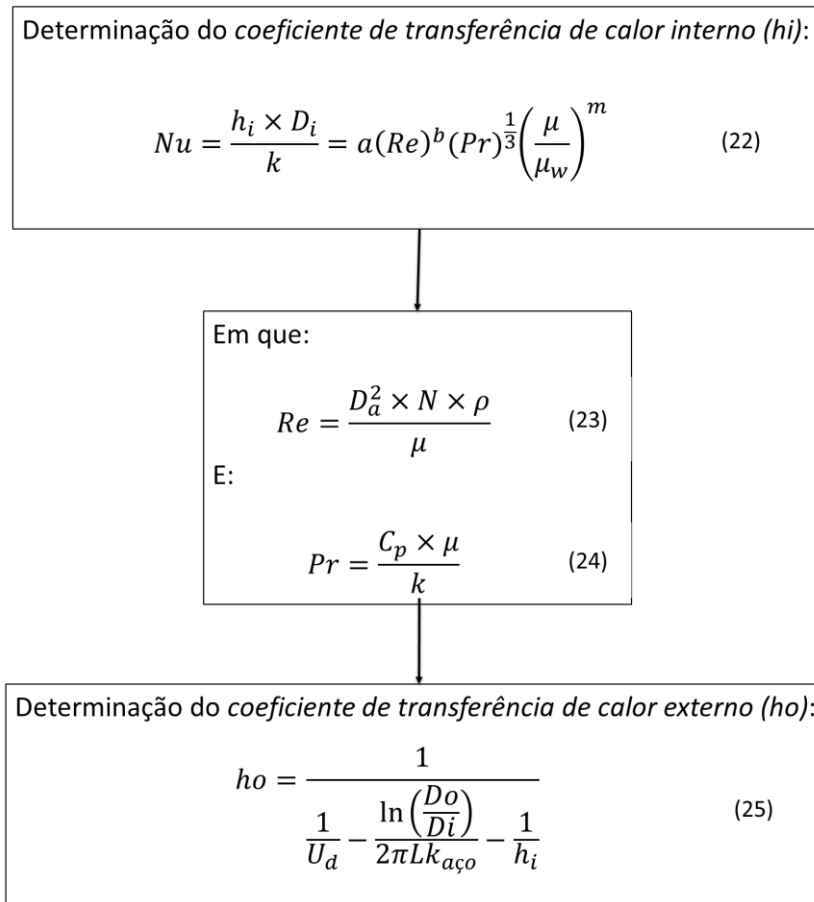
U_d é o coeficiente global de transferência de calor sujo ($W.m^{-2}.K^{-1}$);

R_d é o fator de inscrução ($m^2/K.W$);

ΔT_s é a variação das temperaturas de saída dos fluidos quente e frio ($^{\circ}C$);

ΔT_e é a variação das temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio ($^{\circ}C$);

Figura 11 - Cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor.



Fonte: Própria (2019).

A Tabela 4 apresenta os valores para os parâmetros constantes, obtidos através de medições e dados da literatura. (INCROPERA et.al, 2008)

Tabela 4 - Parâmetros fixos para cálculos dos coeficientes convectivos de transferência de calor.

D_a (m)	D_i (m)	D_t (m)	k_{aço} (W/m.K)	N (rps)	L (m)
0,197	0,390	0,393	52	1,667	0,375

3.4.1 Resolução De Cálculo Para O Experimento 4

Abaixo está ilustrado o procedimento de cálculo para o experimento 4:

Tabela 5 - Dados coletados para o Experimento 4.

Tempo (min)	T_{qe} (°C)	T_{qs} (°C)	T_{fe} (°C)	T_{fs} (°C)
58	54,6	48,8	32,9	38,4
59	54,7	48,8	33,0	38,8
60	54,7	48,7	32,9	38,6

Fonte: Própria (2019).

Passo 1: Calcular temperatura médias dos fluidos quente (T_{mq}) e frio (T_{mf}):

$$T_{mq} = \frac{T_{qe} + T_{qs}}{2} \quad 26$$

$$T_{mf} = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \quad 27$$

Para os dados de temperatura coletados no tempo de 60 minutos, tem-se:

$$T_{mq} = \frac{54,7 + 48,7}{2} = 51,7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 28$$

$$T_{mf} = \frac{32,9 + 38,6}{2} = 35,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 29$$

A Tabela abaixo enuncia as propriedades do fluido (água) às temperaturas médias:

Tabela 6 - Propriedades do fluido à temperatura média

	W (kg/s)	ρ (kg/m³)	Cp (KJ/kg.K)	μ (kg/m.s)	k (W/m.K)
Fluido quente	0,0415	994,96	4,2558	0,0012	0,6251
Fluido frio	0,0416	997,41	4,2159	-	-

Fonte: Çengel e Ghajar, 2012.

Passo 2: Cálculo das diferenças de temperatura para os fluidos quente (ΔT_q) e frio (ΔT_f):

$$\Delta T_q = 54,7 - 48,7 = 6,00 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 30$$

$$\Delta T_f = 38,6 - 32,9 = 5,70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 31$$

Passo 3: Cálculo do calor fornecido pelo fluido quente e calor recebido pelo fluido frio (W):

$$Q_{fornecido} = 0,0415 \times 4,2558 \times 6,00 = 1058,96 \text{ W} \quad 32$$

$$Q_{recebido} = 0,0416 \times 4,2159 \times 5,70 = 998,69 \text{ W} \quad 33$$

Passo 4: Cálculo das perdas de calor para o meio.

$$Q_{perdido} = 1058,96 - 998,69 = 59,91 \text{ W} \quad 34$$

Passo 5: Cálculo da diferença logarítmica de temperaturas:

$$\Delta T_{lm} = \frac{10,1 - 21,8}{\ln\left(\frac{10,1}{21,8}\right)} = 15,20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 35$$

Passo 6: Cálculo do coeficiente global de calor e coeficiente global de calor sujo:

$$U = \left(\frac{998,69}{0,5843 \times 15,20} \right) * 1000 = 112,39 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 36$$

$$Ud = \frac{1}{0,00018 + \frac{1}{112,39}} = 110,16 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 37$$

Passo 7: Cálculo de Reynolds e Prandtl:

$$Pr = \frac{4,2559 \times 0,0012}{0,6251} = 8,40 \quad 38$$

$$Re = \frac{(0,197)^2 \times (1,667) \times 994,96}{0,0012} = 52301,78 \quad 39$$

Passo 8: Cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor:

Para condições estacionárias considera-se que a relação (μ/μ_w) é bem próxima de 1. De acordo com a Tabela 2, para o valor de Reynolds encontrado, os coeficientes a , b e m são 0,36, 2/3 e 0,21, respectivamente

$$hi = \frac{0,6251}{0,390} \left[0,36(52301,78)^{2/3} (8,40)^{\frac{1}{3}} (1)^{0,21} \right] = 1640,42 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 40$$

$$ho = \frac{1}{\frac{1}{110,16} - \frac{\ln\left(\frac{0,393}{0,390}\right)}{2 \times \pi \times 0,375 \times 52} - \frac{1}{1640,42}} = 118,97 \text{ W/m}^2\text{K} \quad 41$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTOS EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO E ESTACIONÁRIO E FLUXO CONTÍNUO DAS CORRENTES QUENTE E FRIA

Os experimentos foram conduzidos até que se alcançasse o estado estacionário. Para isso, foram feitas medições da temperatura de entrada do fluido da camisa (T_{qe}), temperatura de saída do fluido da camisa (T_{qs}), temperatura de entrada do fluido do tanque (T_{fe}) e temperatura de saída do fluido do tanque (T_{fs}), em intervalos de 1 minuto. O sistema estava operando em fluxo contínuo em ambas as correntes.

Com os dados obtidos, tirou-se as médias das 3 últimas temperaturas coletadas para cada fluido, com o sistema operando em estado estacionário, como mostra a Tabela 7:

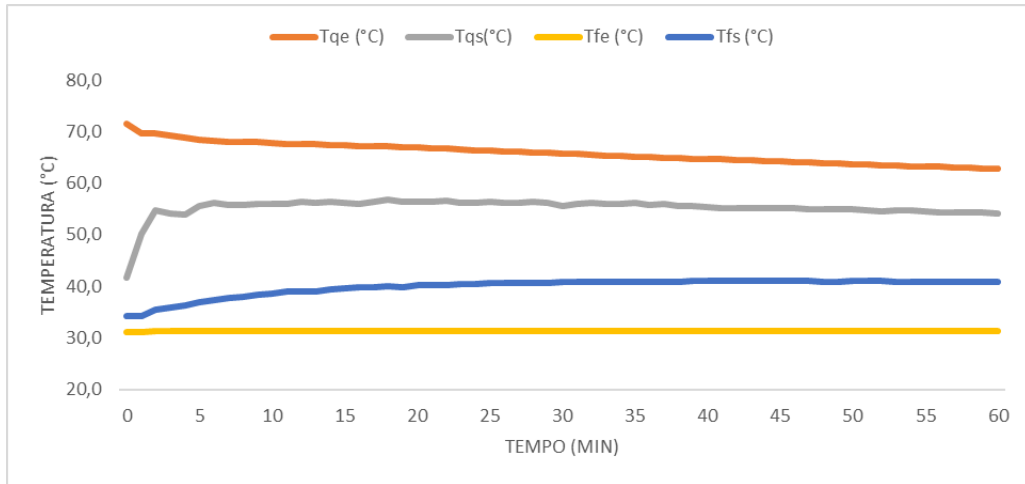
Tabela 7 - Médias dos resultados obtidos experimentalmente.

Experimento	T_{qe} (°C)	T_{qs} (°C)	T_{fe} (°C)	T_{fs} (°C)
1	51,1	45,9	30,5	35,3
2	47,2	43,8	33,1	36,2
3	66,4	57,9	31,7	39,8
4	54,7	48,8	32,9	38,6
5	58,2	51,2	33,8	40,5
6	66,8	56,8	31,6	41,0
7	62,9	54,2	31,3	39,6
8	66,9	58,4	30,2	37,3
9	60,3	53,9	32,1	37,3
10	56,2	49,3	31,8	38,2
11	68,3	59,5	32,8	41,1

Fonte: Própria (2019).

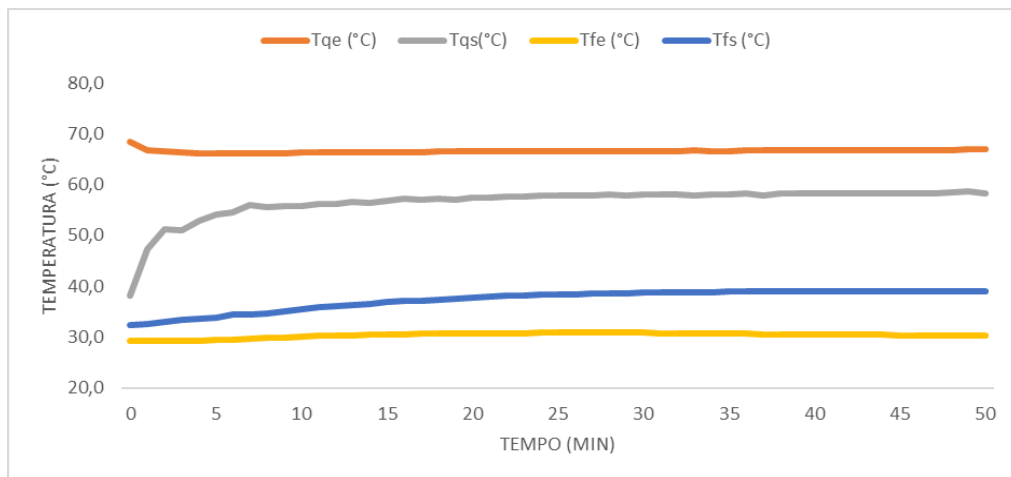
Com os dados obtidos e com o intuito de verificar o alcance do estado estacionário para cada experimento, confeccionou-se os gráficos ilustrados nas Figuras 12, 13 e 14, referentes ao comportamento das temperaturas ao longo do tempo.

Figura 12 - Experimento 7 - Variação das temperaturas em função do tempo.



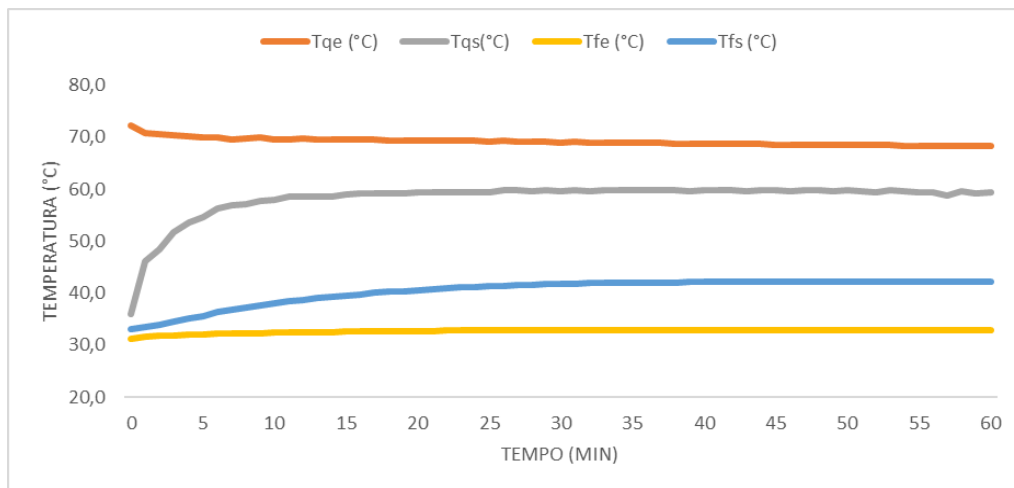
Fonte: Própria (2019).

Figura 13 - Experimento 8 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

Figura 14 - Experimento 11 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

A partir do comportamento das curvas obtidas (Figuras 12, 13 e 14) pode-se inferir que o trocador de calor está operando em arranjo concorrente, uma vez que as curvas das temperaturas são mais espaçadas no início dos experimentos e vão se afunilando quando chegam ao fim. Comportamento este que difere do arranjo contracorrente, em que as curvas de temperaturas tendem a se cruzar. (HEAY; HESSELGREAVES, 2016)

Observa-se que a obtenção do estado estacionário foi alcançada entre 50 a 60 minutos. Os gráficos referentes aos demais experimentos estão disponíveis nos Apêndices A, B C, D e E. Esses dados de temperatura foram usados como parâmetros para calcular a quantidade de calor fornecida, quantidade de calor recebida, perdas de calor, coeficiente global de transferência de calor e os coeficientes convectivos de transferência de calor.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS QUANTIDADES DE CALOR E PERDAS DE CALOR

As quantidades de calor fornecidas e recebidas foram calculadas de acordo com o procedimento descrito na Seção 3.2, utilizando-se as Equações (14) e (15), respectivamente. As perdas de calor para meio foram calculadas através da diferença entre a quantidade de calor fornecida pelo sistema de aquecimento e a quantidade de calor absorvida pelo fluido frio (fluido do tanque). Os resultados obtidos estão enunciados na Tabela 8:

Tabela 8 - Perdas de calor do sistema para o meio.

Experimento	Qfornecido (W)	Qrecebido (W)	Qperdido (W)	Qperdido (%)
1	1.213,2638	1.112,6313	100,6326	8,29%
2	797,2435	723,9564	73,2871	9,19%
3	2.007,6232	1.884,4578	123,1655	6,13%
4	1.040,9658	992,8554	48,1104	4,62%
5	1.231,5024	1.168,5744	62,9280	5,11%
6	1.471,6090	1.377,5800	94,0289	6,39%
7	1.285,2642	1.211,7490	73,5152	5,72%
8	1.255,3753	1.040,9108	214,4645	17,08%
9	934,5479	758,9977	175,5503	18,78%
10	1.212,2919	1.115,2362	97,0557	8,01%
11	1.579,6034	1.448,9375	130,6659	8,27%

Fonte: Própria (2019).

Através dos resultados mostrados na Tabela 8 observa-se que os resultados encontrados são satisfatórios, apresentando pequenas perdas de calor para o meio, que é natural, uma vez que o sistema não é adiabático e o isolamento do tanque já é antigo.

Além disso, observa-se também que os experimentos com a menor perda de calor foram o 4, com apenas 4,62%, o 5, com 5,11% e o 7, com 5,72%. Por outro lado, os experimentos com as maiores perdas foram o 8 e 9, com 17,08% e 18,78%, respectivamente. O parâmetro que difere nestes experimentos é a velocidade de agitação. Nos experimentos 4, 5 e 7 a velocidade de agitação foi a máxima usada, 100 rpm. Enquanto nos experimentos 8 e 9 o sistema operou sem agitação, ou seja, $N=0$ rpm.

Assim, com estes resultados pode-se perceber a influência da agitação em um sistema de transferência de calor e inferir que, quanto maior a velocidade de agitação, maior a troca térmica, o que é condizente com Çenjel e Ghajar (2012).

Além disso, é importante ressaltar que a velocidade de agitação é diretamente proporcional ao número de Reynolds e, este por sua vez, determina o regime de escoamento dos fluidos, quanto mais turbulento o escoamento, maior será a transferência de calor. (MAURICE; STEWART, 2014)

4.3 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Através dos procedimentos de cálculo descritos na Seção 3.3 obteve-se os resultados enunciados na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultados obtidos para os coeficientes de transferência de calor.

Experimento	U (W/m²K)	U_d (W/m²K)	h_i (W/m²K)	h_o (W/m²K)
1	126,4612	123,6463	1.187,2011	139,2251
2	117,8068	115,3605	1.218,8820	128,4438
3	126,2427	123,4376	1.043,5789	141,2345
4	111,6355	109,4347	1.631,8495	118,1761
5	120,0168	117,4787	1.596,5632	127,8241
6	97,4027	95,7244	1.485,1108	102,9788
7	94,0523	92,4862	1.532,8307	99,0360
8	63,2101	62,4989	0,0000	0,0000
9	59,3253	58,6985	0,0000	0,0000
10	112,7394	110,4970	1.154,0126	123,1394
11	95,2628	93,6564	1.034,7629	103,6475

Fonte: Própria (2019).

Através dos resultados obtidos pode-se inferir que os coeficientes globais de transferência de calor se mostraram satisfatórios e que as incrustações apresentaram pouca interferência na troca térmica.

Tanto nos coeficientes globais de transferência de calor quanto nos coeficientes convectivos de transferência de calor pode-se, mais uma vez, perceber a influência da agitação no processo de troca térmica. Os menores valores de U e Ud foram para os experimentos 8 e 9, que não possuíam agitação. Da mesma forma, observa-se que os coeficientes de película para estes experimentos foram 0, uma vez que estes dependem do número de Reynolds que, por sua vez, depende da velocidade de agitação.

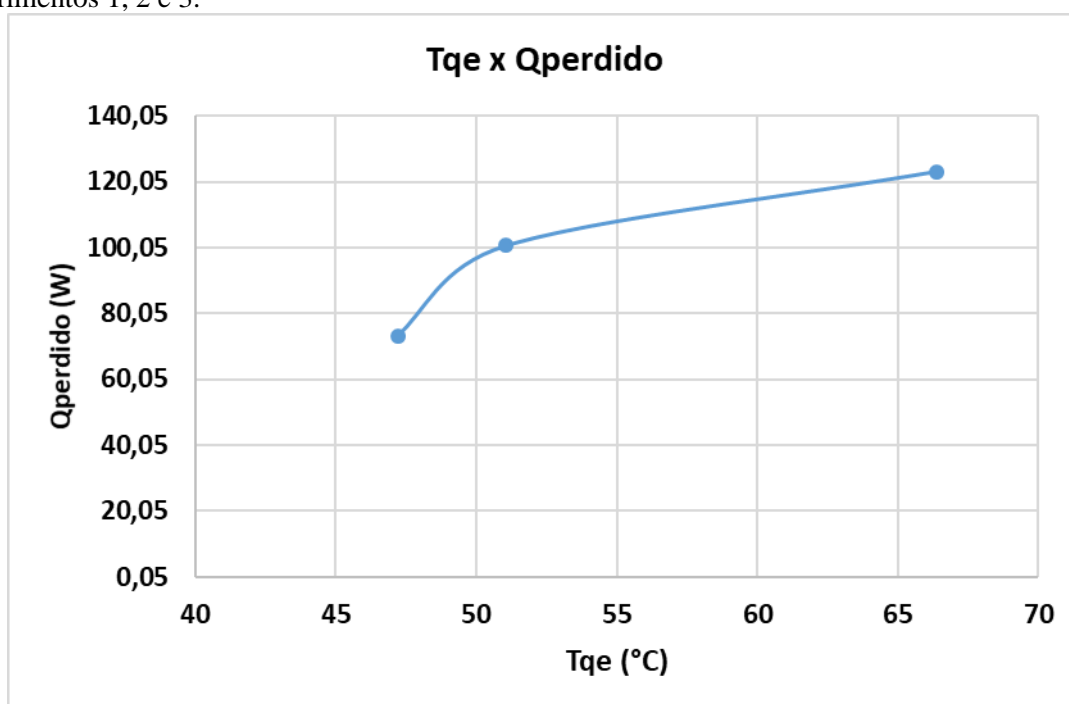
4.4 ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR

A partir dos resultados obtidos foram feitas análises para avaliar o comportamento do trocador de calor e verificar os melhores parâmetros para aulas didáticas no laboratório.

4.4.1 Variação Das Perdas De Calor Em Função Da Temperatura De Entrada Do Fluido Quente

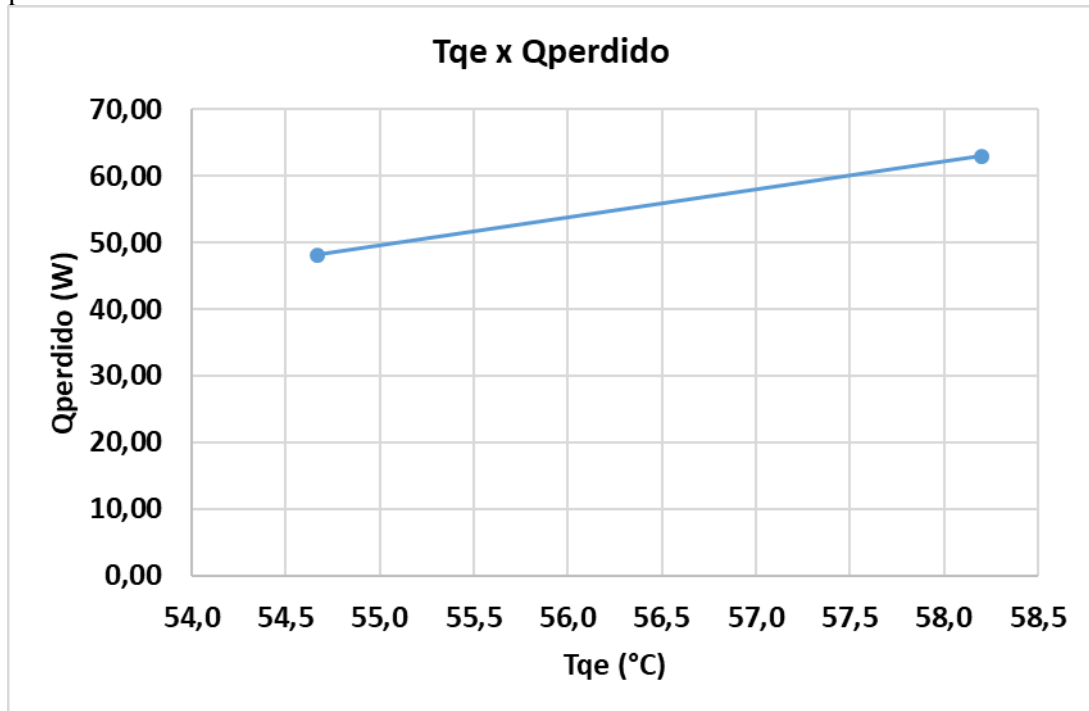
As Figuras 15 e 16 indicam o comportamento do trocador de calor referente as perdas de calor para o meio em função da temperatura de entrada do fluido quente.

Figura 15 - Quantidade de calor perdida em função da temperatura de entrada do fluido quente para os experimentos 1, 2 e 3.



Fonte: Própria (2019).

Figura 16 - Quantidade de calor perdida em função da temperatura de entrada do fluido quente para os experimentos 4 e 5.



Fonte: Própria (2019).

Através deste comportamento pode-se perceber que a quantidade de calor perdido para o meio tende a aumentar em função do aumento de temperatura de entrada do fluido quente. Observa-se que quanto maior a diferença de temperaturas entre as correntes, maior será o calor trocado e, conseqüentemente, maior a perda de calor, uma vez que o sistema não é adiabático e nem isolado em todos os seus pontos.

4.4.2 Variação Dos Coeficientes De Transferência De Calor Em Função Do Número De Reynolds

A Tabela 10 apresenta os dados referentes aos números de Reynolds médios calculados para cada experimento e os respectivos coeficientes de transferência de calor:

Tabela 10 - Resultados obtidos para Reynolds e para os coeficientes de transferência de calor.

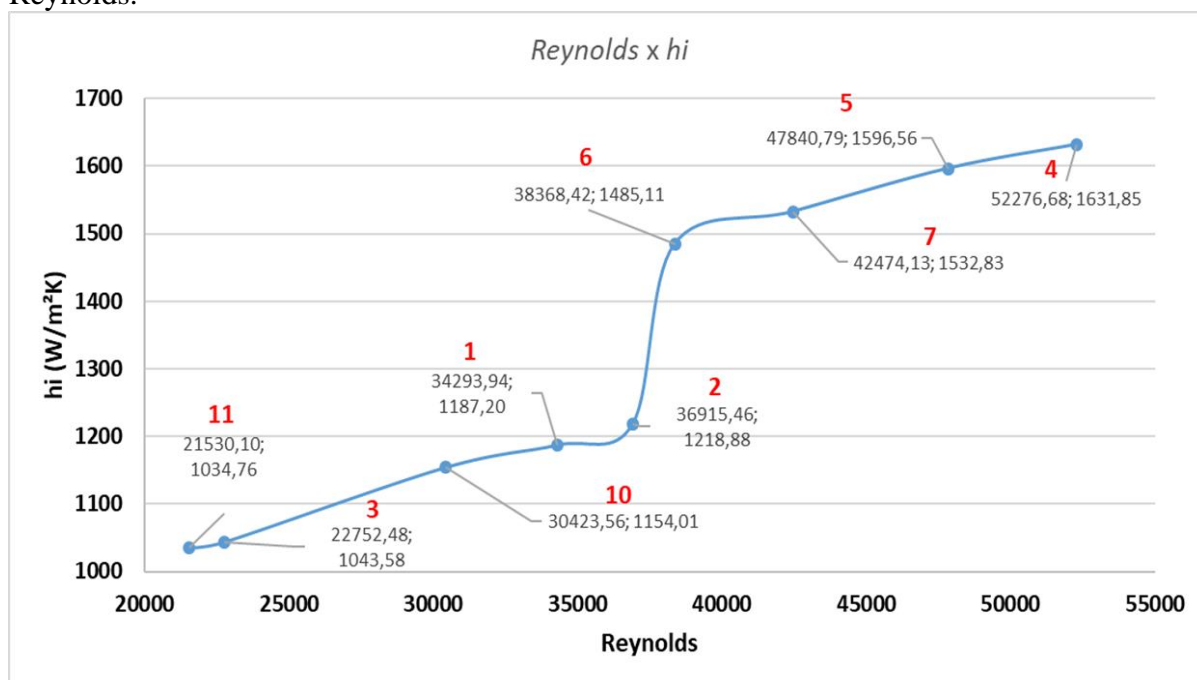
Experimento	Re	hi (W/m ² .K)	ho (W/m ² .K)	Ud (W/m ² .K)
11	21530,10	1034,76	103,6475233	58,69849306
3	22752,48	1043,58	141,2344979	62,4989333
10	30423,56	1154,01	123,1393692	93,65640956
1	34293,94	1187,20	139,2251282	123,4375639
2	36915,46	1218,88	128,4437879	110,496984
6	38368,42	1485,11	102,9788407	123,6462912

7	42474,13	1532,83	99,03599603	115,3605379
5	47840,79	1596,56	127,8240862	95,72435625
4	52276,68	1631,85	118,1761406	92,48618656

Fonte: Própria (2019).

Com os resultados obtidos foram construídos os gráficos seguintes, ilustrados nas Figuras 17, 18 e 19.

Figura 17 - Variação do coeficiente convectivo interno de transferência de calor em função de Reynolds.

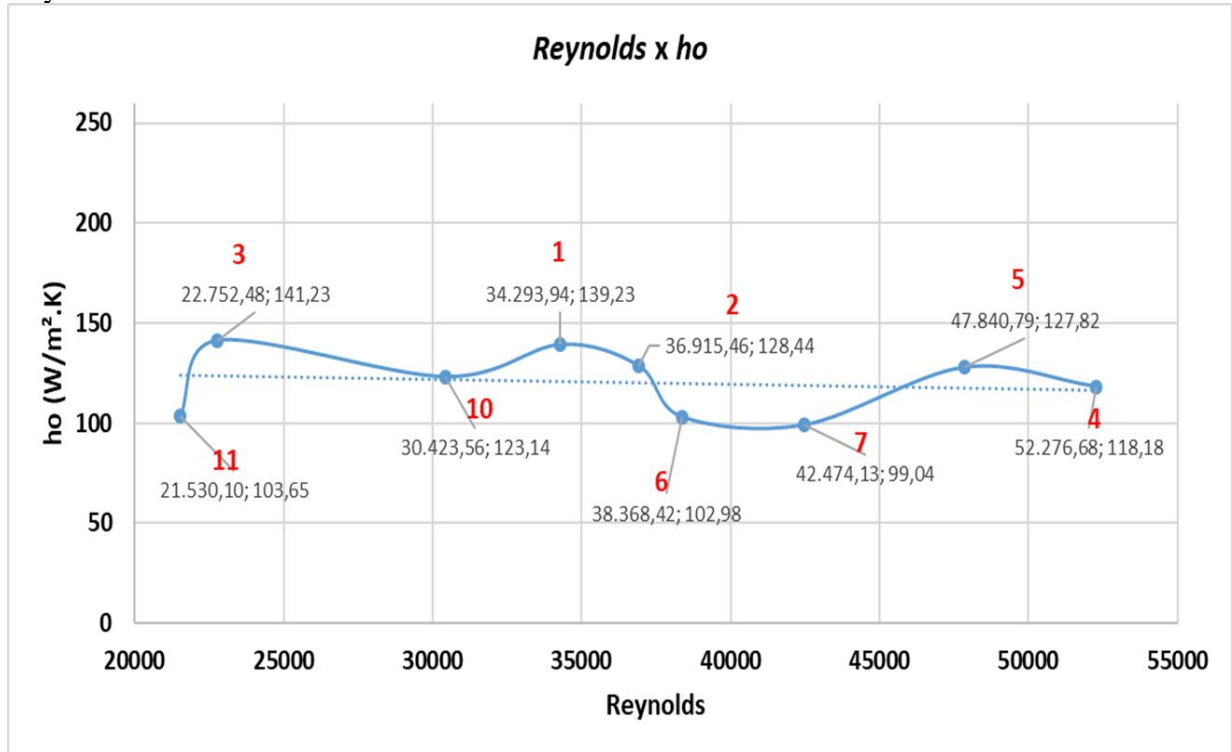


Fonte: Própria (2019).

Através da Figur 17 pode-se observar que o coeficiente convectivo interno de transferência de calor tende a aumentar com o aumento do número de Reynolds, o que pode ser explicado pelo aumento da velocidade de agitação. Os números em vermelho referem-se aos experimentos realizados.

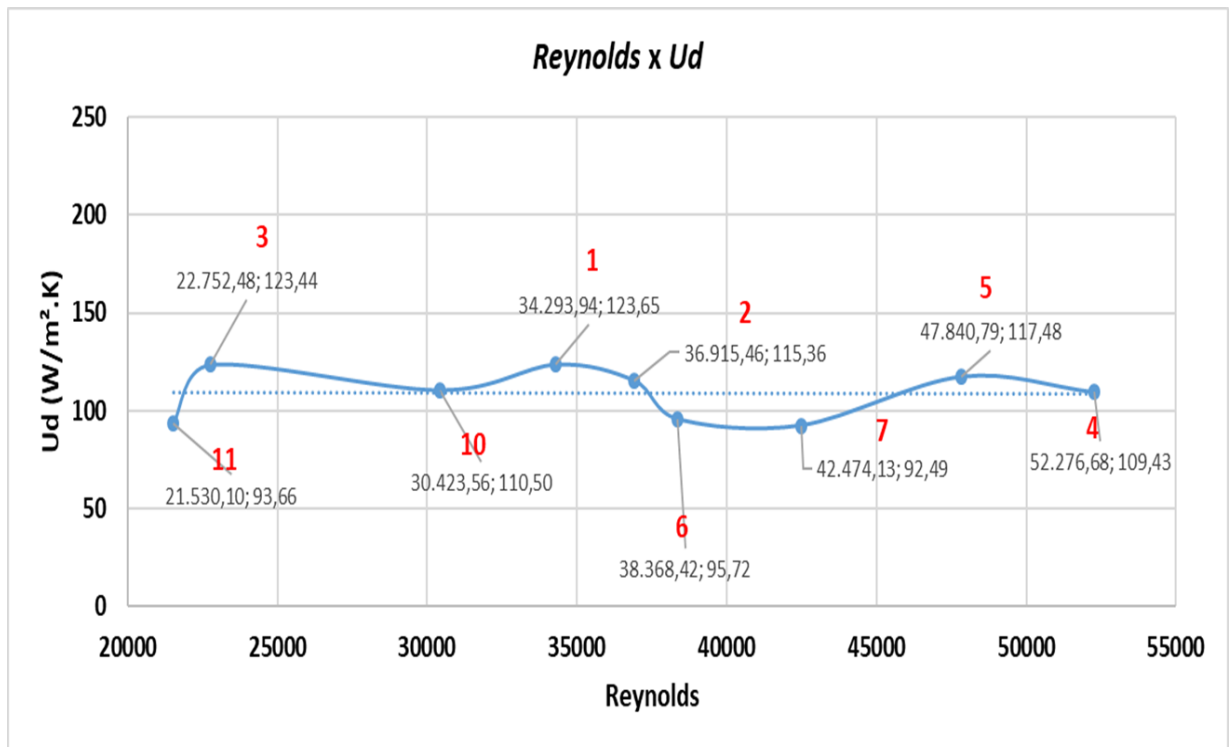
Como já falado anteriormente, o número de Reynolds é diretamente proporcional a velocidade de agitação e, pode-se inferir que quanto maior a velocidade de agitação e maior o número de Reynolds, maior será a quantidade de calor trocada. (KUNDU; COHEN; DOWLING, 2016))

Figura 18 - Variação do coeficiente convectivo de transferência de calor externo em função de Reynolds.



Fonte: Própria (2019).

Figura 19 - Variação do coeficiente global de transferência de calor em função de Reynolds. hesseolivei



Fonte: Própria (2019).

O comportamento do coeficiente convectivo externo de transferência de calor e o do coeficiente global de transferência de calor em função do número de Reynolds mostraram similaridades (Figuras 18 e 19), entretanto apresentaram discrepância em relação ao comportamento do coeficiente convectivo interno de transferência de calor (Figura 17).

Entretanto, a partir da Figura 18, pode-se inferir que os melhores parâmetros para a elaboração de práticas laboratoriais didáticas são a fluxos de entrada do fluido quente a valores baixos a médios e a altas velocidades de agitação. A partir da Figura 19 pode-se perceber que o coeficiente global de transferência de calor é o que apresenta a maior resistência a transferência de calor.

.

5 CONCLUSÕES

Diante do presente trabalho, pode-se concluir que as perdas de calor para o meio são influenciadas diretamente pela temperatura de entrada do fluido quente e pela velocidade de agitação. O comportamento avaliado mostrou que as perdas de calor são maiores quando a temperatura de entrada do fluido quente é maior. Em comparação, as perdas de calor se mostraram menor quando a velocidade de agitação do fluido foi maior.

Logo, inferiu-se que dentre os parâmetros analisados, a velocidade de agitação e a temperatura do fluido quente foram os parâmetros que tiveram maior influência sobre o processo de transferência de calor estudado.

O comportamento do trocador de calor em função da variação das temperaturas coletadas pelo tempo nos permite concluir que o mesmo operava em arranjo concorrente, uma vez que as curvas se aproximavam ao final dos experimentos, porém não chegavam a se cruzar, como é comum em arranjo contracorrente.

Para os experimentos realizados, o tempo para que sistema atingisse o estado estacionário foi de 50 a 60 minutos, de acordo com o comportamento das curvas plotadas, com exceção do experimento 3, em que o estado estacionário foi alcançado em apenas 30 minutos, o que se deu em virtude da elevada temperatura de entrada do fluido quente.

Por fim, calculou-se o coeficiente global de transferência de calor, coeficiente global de transferência de calor “sujo”, coeficiente convectivo interno de transferência de calor e coeficiente convectivo externo de transferência de calor. Todos os resultados obtidos foram satisfatórios e condizentes com a realidade do sistema utilizado.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que as melhores condições para realização de experimentos didáticos no mesmo equipamento são em regime inicialmente não estacionário, até que se alcance o estado estacionário, em fluxo concorrente. Os melhores parâmetros para análise do trocador de calor são: velocidade de agitação, temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio e vazões dos fluidos quente e frio. Logo, conclui-se que todos os objetivos propostos para este experimento foram alcançados.

6 PERSPECTIVAS

O Laboratório de Engenharia Química da Escola Superior de Tecnologia possui diversos equipamento de aplicação em temas de Engenharia Química. Com o intuito de obter melhores resultados, propõe-se:

1. Realizar as práticas laboratoriais considerando o fluxo do fluido frio como variável de análise;
2. Considerar faixas de temperaturas fixas para comparação dos resultados;
3. Realizar experimentos com o volume do fluido do tanque como variável de análise;
4. Acrescentar ao sistema de aquecimento uma segunda resistência para que o aquecimento do água seja melhor, em menor tempo e que possibilite melhorar também a realização das práticas laboratoriais.

REFERÊNCIAS

- ARFELLI, S. L. **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.
- BICCA, G. B. **Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- FOUST, A.S., WENZEL, L. A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. **Princípio das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2012
- HESSELGREAIVES, J. E.; LAW, R.; REAY, D. A. **Compact Heat Exchangers**. Science Direct: 2nd Edition, 2016.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- INNOCENTINI, M. D. M. **Projeto de trocadores de calor em tanques agitados: serpentinas e camisas**. Centro de Ciências Exatas, Naturais e de Tecnologia, Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2015.
- KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- KUNDU, P. K.; COHEN, I. M.; DOWLING, D. R. **Fluid Mechanics**. Science Direct: 6th Edition, 2016.
- LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. **A heat transfer textbook**. 3. ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2008.
- LONG, C.; SAYMA, N. **Heat transfer**. United Kingdom: Bookboon, 2009. Disponível em: <bookboon.com>. Acesso em: 01-02-2019.
- MAURICE, I.; STEWART JR. **Surface Production Operations**. Science Direct: 3rd Edition, 2014.
- MIRANDA JÚNIOR, E. J. P.; GONÇALVES, R. S. Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção. **Revista Ifes Ciência**, Vitória, v. 2, n. 1, 2016.

MORIYA, R. Y. **Experiência n°1: Troca térmica em tanque encamisado com agitação.** Escola Superior de Tecnologia – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2018.

OLIVEIRA, A. M. **Comportamento dinâmico de um trocador de calor de tanque agitado com fluxos contínuos.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2012.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

RIBEIRO, C. M. C. **Comparação de métodos de cálculo termo-hidráulico para trocadores de calor casco e tubo, sem mudança de fase.** 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1984.

ROMA, W. N. L. **Fenômenos de transporte para engenharia.** 2. ed. São Carlos: RiMa, 2006.

SANCHES, L. P. **Estudo comparativo quanto a resistência a corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor.** 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

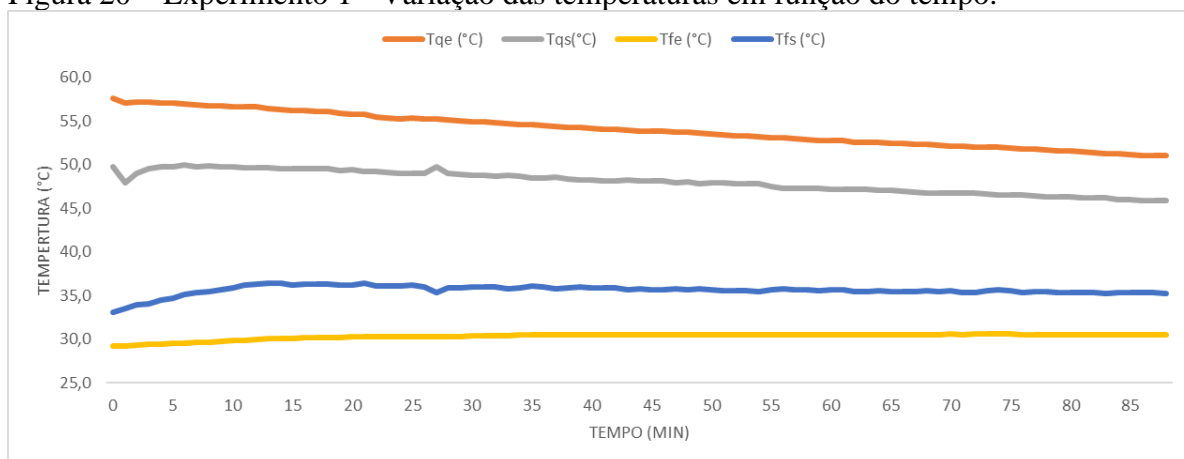
SOUZA, M. S. **Análise térmica de um trocador de calor do tipo casco e tubo para resfriamento do resíduo de uma unidade de destilação atmosférica.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Tubular Exchanger Manufacturers Association (TEMA), **Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association**, 9.ed. TEMA, 2007.

APÊNDICE

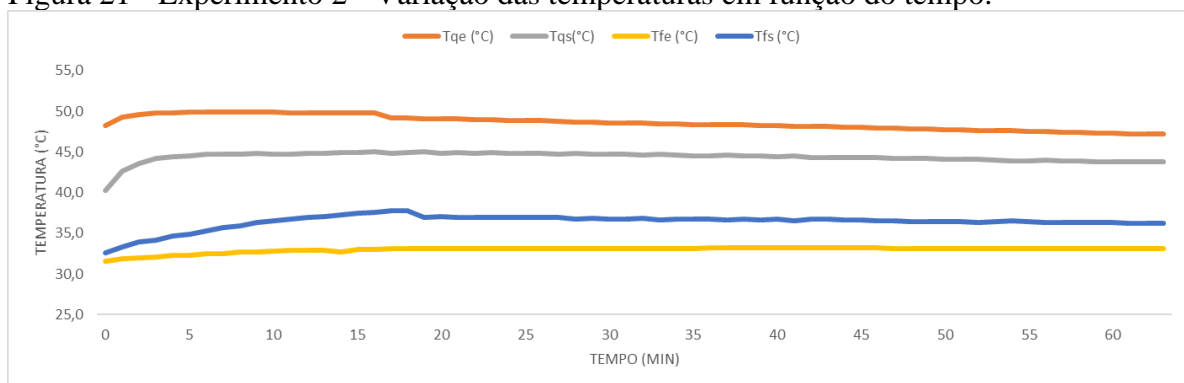
APÊNDICE A – Experimentos 1, 2 e 3

Figura 20 – Experimento 1 - Variação das temperaturas em função do tempo.



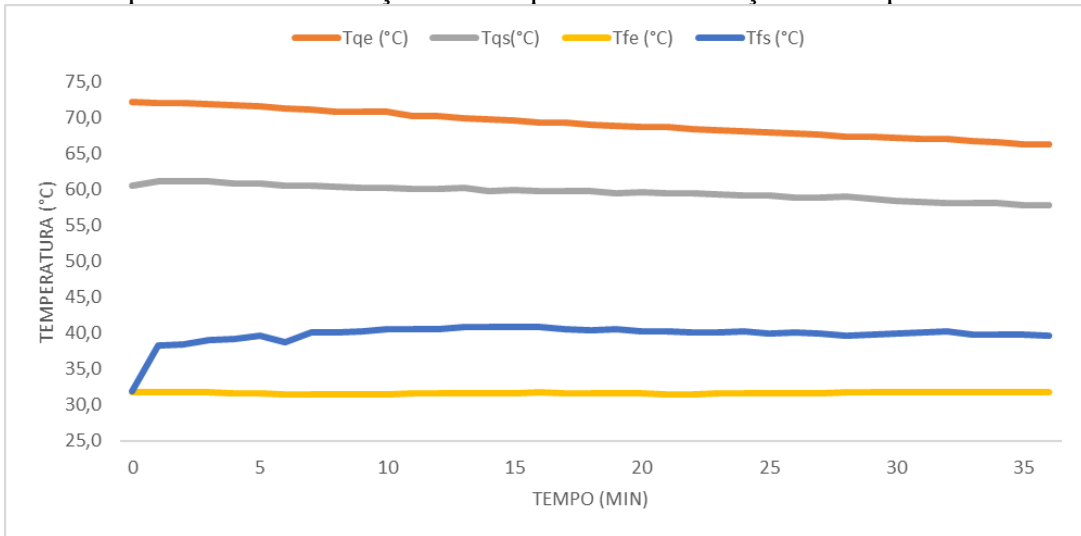
Fonte: Própria (2019).

Figura 21 - Experimento 2 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

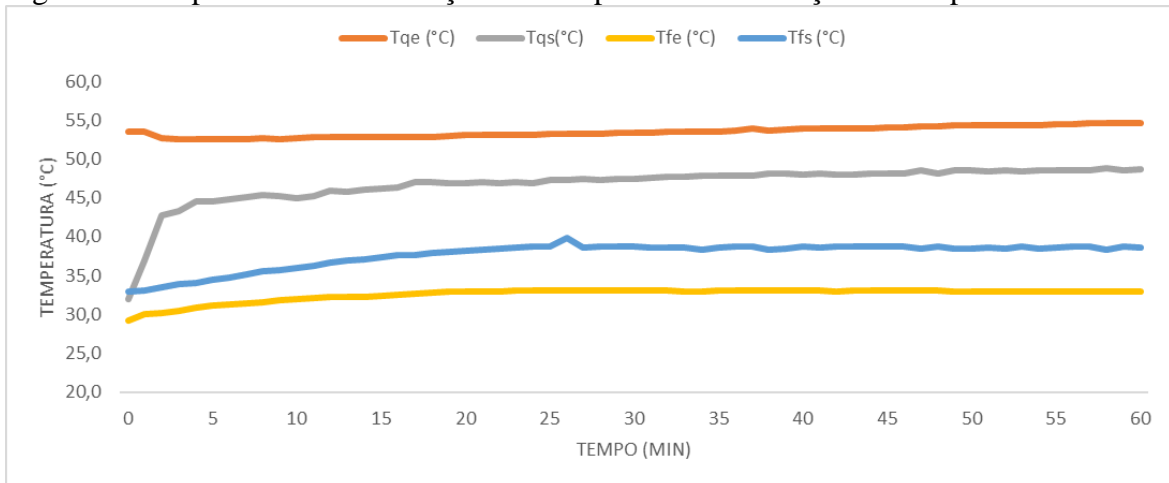
Figura 22 - Experimento 3 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

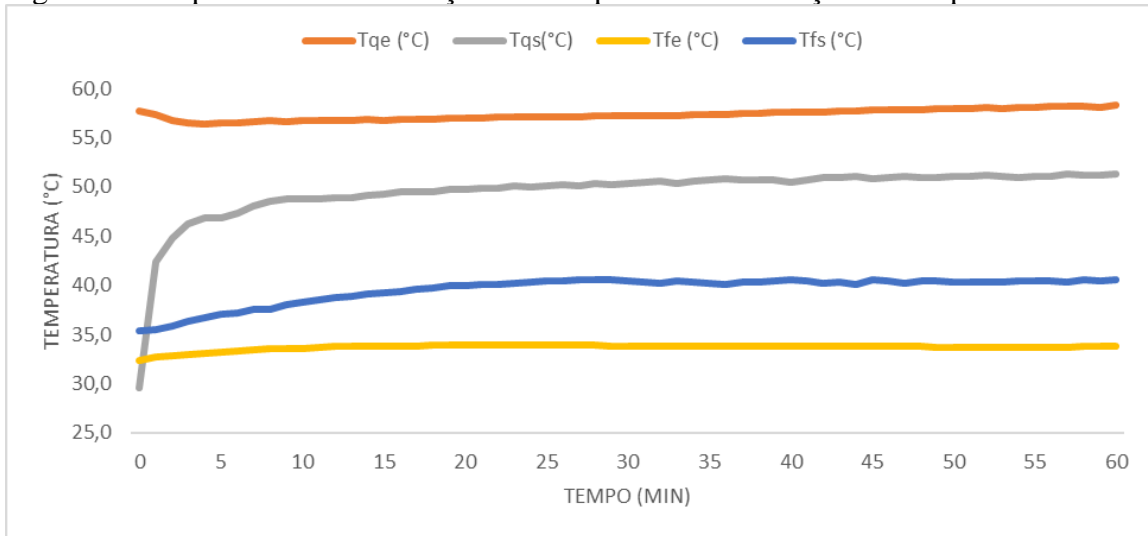
APÊNDICE B – Experimentos 4 e 5

Figura 23 - Experimento 4 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

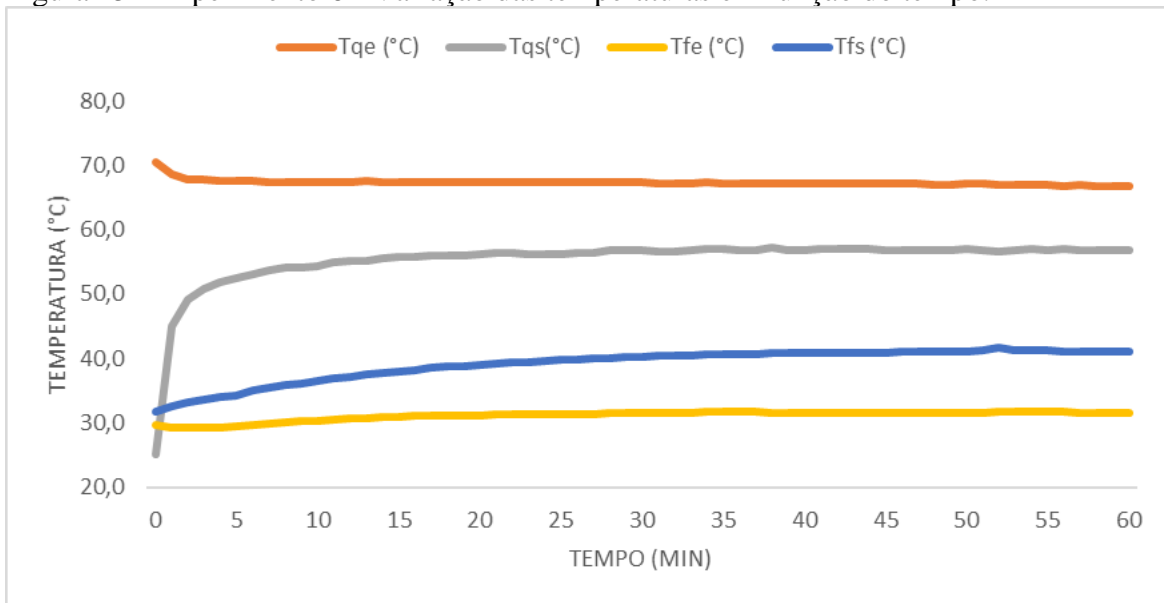
Figura 24 - Experimento 5 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

APÊNDICE C – Experimento 6

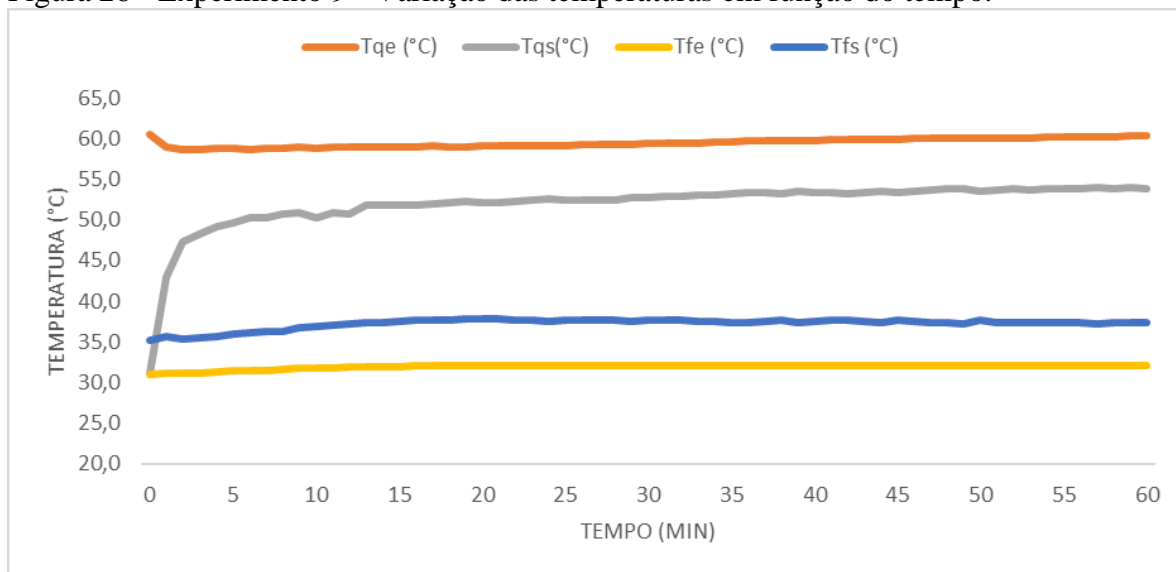
Figura 25 - Experimento 6 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

APÊNDICE D – Experimento 9

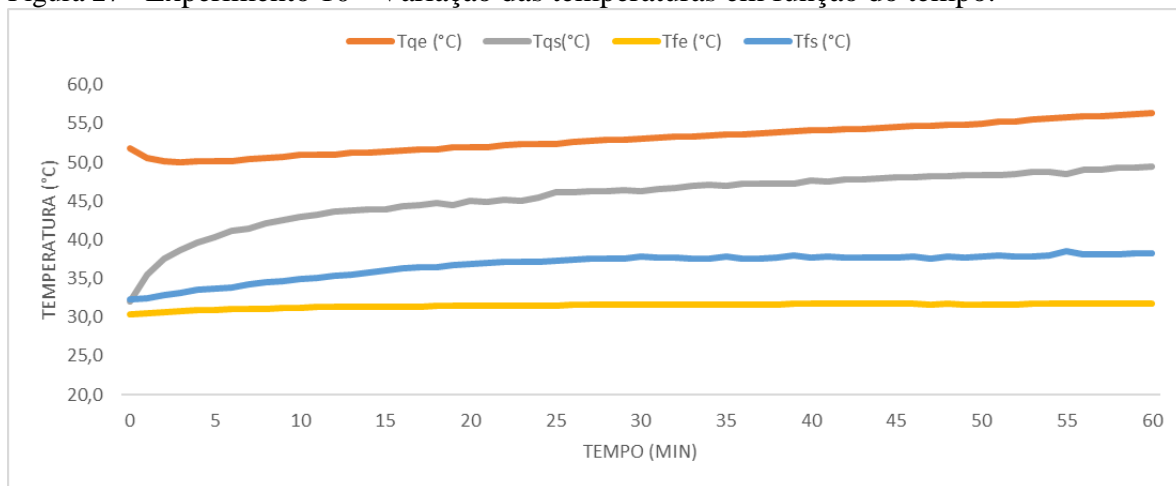
Figura 26 - Experimento 9 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).

APÊNDICE E – Experimento 10

Figura 27 - Experimento 10 - Variação das temperaturas em função do tempo.



Fonte: Própria (2019).