

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

**ELY MATHEUS FONTENELE DIAS**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TROCADOR DE CALOR**

MANAUS - AM

2021

**ELY MATHEUS FONTENELE DIAS**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TROCADOR DE CALOR**

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: Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva

MANAUS – AM

2021

**ELY MATHEUS FONTENELE DIAS**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TROCADOR DE CALOR**

**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:**

*Jefferson Luiz G. Silva*

**Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva – Orientador**

*Franz Bebert Ferreira*

**Profa. Dr. Franz Bebert Ferreira – UFAM**

*Kiki Pinheiro Melo Braga*

**Profa. Dra. Kiki Pinheiro Melo Braga – UEA**

**Conceito: 8,25**

**Manaus, 13 de Dezembro de 2021.**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus e a todos aqueles  
que ajudaram a concluí-lo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pelo dom da vida, por me proporcionar esta oportunidade de chegar aonde cheguei e por Ele ser o principal em minha vida.

Quero agradecer a minha família, em primeiro lugar a minha mãe, Ana Fontenele, por sempre acreditar em mim, mesmo quando pensei em desistir e achei que não entregaria a este trabalho.

Ao meu irmão Aldenilson Júnior por todo apoio que ele me deu e por dedicar horas do seu tempo me ajudando a calcular as tabelas imensas presentes neste trabalho, pois sem a sua ajuda não terminaria.

Agradecer ao meu tio Francisco Fontenele por todo apoio me dado e a Faísca por ser a gata mais linda do mundo por me fazer relaxar com sua fofura quando estava tenso.

Agradecer a minha namorada Rebeka Silva por toda ajuda e companheirismo prestado enquanto escrevia esse trabalho e por noites acordadas me ajudando a corrigir meu trabalho.

Quero agradecer ao meu orientador Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro por ter aceitado me orientar e ter me ajudado com sua orientação e motivação e sempre acreditar que eu iria conseguir terminar este trabalho e sou muito grato a ele por ter concluído mais essa etapa.

Quero agradecer a professora Dra. Kiki Pinheiro Melo por ter aceitado fazer parte da minha banca tanto de TCC I quanto de TCC II, e as suas correções foram muito úteis para este trabalho.

Quero agradecer ao Prof. Welisson Araújo que em vida fez parte da banca de TCC I dando sugestões úteis para a realização deste trabalho.

Quero agradecer também a todos os professores do curso de engenharia química que participaram da minha formação acadêmica e por serem aqueles que me deram conhecimento nesta área.

Quero agradecer ao Prof Dr. Franz Bebert por fazer parte da banca de TCC II deste trabalho e não somente, mas por ter me ajudado em minha formação e ter compartilhado o seu conhecimento comigo.

Quero agradecer a minha amiga Bianca Lorena por ter sido minha dupla todos esses anos de faculdade, compartilhando de exercícios, trabalhos e horas de estudos para as provas, por ter sido uma companheira e claro, ajudado a concluir este trabalho com seu apoio.

Quero agradecer aos meus amigos José William, Nataly Anne, Alisson Oliveira e Matheus Batista por acreditarem em mim e dar apoio, proporcionando momentos de descontração e relaxamento para mim, por me fazerem rir e por serem amigos de verdade que Deus me deu.

Por fim, quero agradecer aos meus pastores Marivaldo e Gracilene Pontes, que são como segundos pais para mim, por sempre acreditarem e me apoiarem, principalmente espiritualmente para vencer essa batalha.

Meus agradecimentos a todos que tiveram uma participação neste trabalho.

## RESUMO

Trocadores de calores são equipamentos muito usuais no dia a dia do ser humano seja em escala residencial como na utilização de ar-condicionados, geladeiras ou até nos veículos utilizados pelos mesmos, ou em escala laboratorial para que alunos entendam o seu funcionamento, ou mesmo em escala industrial para produção de produtos utilizados pelas pessoas. Como o próprio nome diz os trocadores de calor tem função de transferir calor de um fluido com uma temperatura alta para um fluido de temperatura mais baixa, esta transferência pode ocorrer por meio de três tipos de mecanismos: condução, convecção ou radiação. Por se tratar de um equipamento muito usual necessita-se que o mesmo desempenhe corretamente a sua função, ou seja, que tenha uma alta eficiência, pois a falta dela pode acarretar custos altos de operação, não qualidade de um produto ou até ocasionar riscos a vida humana. Tendo em vista isto este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência do trocador do laboratório de engenharia química da Universidade do Estado do Amazonas, realizar a manutenção no equipamento, assim como analisar o comportamento do mesmo nas configurações de escoamento concorrente e contracorrente. Para isso foi feita a limpeza e verificação do equipamento para que o mesmo tenha condições adequadas para a realização de experimentos. Os experimentos ocorreram nas configurações concorrente e contracorrente, onde para cada vazão as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio a cada 2 minutos por 14 minutos. A partir destes valores foi calculado as taxas de transferência de calor, coeficiente global de transferência de calor, eficiência e número de unidades de transferência tanto pela equação geral dos trocadores de calor como através dos números adimensionais Reynolds, Prandtl e Nusselt que levam em conta o escoamento adotado pelo sistema. Os valores do coeficiente geral de transferência de calor apresentaram-se acima dos valores propostos na literatura, já eficiência não apresentou resultados tão bons quanto o esperado. Portanto, neste trabalho foi possível realizar a análise da eficiência do equipamento, apesar dos resultados, assim como a realização da manutenção do mesmo.

Palavras-chave: Eficiência, Trocador de Calor, Manutenção e Coeficiente Global de Transferência de Calor.

## ABSTRACT

Heat exchangers are very common equipment in human daily life, whether on a residential scale such as in the use of air conditioners, refrigerators or even in the vehicles used by them, or on a laboratory scale so that students understand how they work, or even in industrial scale for the production of products used by people. As the name says, heat exchangers have the function of transferring heat from a fluid with a high temperature to a fluid with a lower temperature, this transfer can occur through three types of mechanisms: conduction, convection or radiation. As this is very common equipment, it needs to perform its function correctly, that is, it has high efficiency, as the lack of it can lead to high operating costs, non-quality of a product or even pose risks to human life. For this reason, this work aims to analyze the efficiency of the exchanger in the chemical engineering laboratory of the State University of Amazonas, perform maintenance on the equipment, as well as analyze its behavior in concurrent and countercurrent flow configurations. For this, the cleaning and verification of the equipment was carried out so that it has adequate conditions for carrying out experiments. The experiments took place in concurrent and countercurrent configurations, where for each flow the inlet and outlet temperatures of hot and cold fluids every 2 minutes for 14 minutes. From these values, heat transfer rates, global heat transfer coefficient, efficiency and number of transfer units were calculated both through the general equation of heat exchangers and through the Reynolds, Prandlt and Nusselt dimensionless numbers that take into account the flow adopted by the system. The values of the general heat transfer coefficient were above the values proposed in the literature, whereas efficiency did not present as good results as expected. Therefore, in this work it was possible to carry out the analysis of the efficiency of the equipment, despite the results, as well as its maintenance.

Keywords: Efficiency, Heat Exchanger, Maintenance and Global Heat Transfer Coefficient.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Trocador de Calor em Escala Industrial.....	15
Figura 2: Trocador de Calor em um Sistema de Pasteurização.....	16
Figura 3: Mecanismos de Transferência de Calor.....	18
Figura 4: Mecanismo da Condução.....	20
Figura 5: Mecanismo de Convecção.....	20
Figura 6: Mecanismo de Radiação.....	23
Figura 7: Esquema de Funcionamento de um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos .....	26
Figura 8: Esquema de um Trocador de Calor Configurado em Escoamento Paralelo.....	27
Figura 9: Perfil de Temperatura do Escoamento em Paralelo.....	27
Figura 10: Esquema de um Trocador de Calor Configurado em Escoamento Contracorrente.....	28
Figura 11: Perfil de Temperatura do Escoamento em Contracorrente.....	28
Figura 12: Esquema de Funcionamento de um Trocador de Calor de Casco e Tubos.....	30
Figura 13: Análise de um Trocador de Calor.....	31
Figura 14: Resistência Térmica em um Trocador de Calor.....	34
Figura 15: Esquema de Troca Térmica.....	39
Figura 16: Esquema do Trocador de Calor presente no LEQ.....	40
Figura 17 – Pano de Limpeza Utilizado na Limpeza do Trocador.....	47
Figura 18 – Mangueira Atóxica.....	48
Figura 19 – Tubulação Trocada.....	48
Figura 20 – Situação da Bomba Centrífuga.....	49
Figura 21: Bomba Centrífuga após a limpeza.....	49
Figura 22: Rotâmetro do Fluido Quente marcando 300 L/h.....	50
Figura 23: Rotâmetro do Fluido Quente marcando 500 L/h.....	50
Figura 24: Rotâmetro do Fluido Frio a 300 L/h.....	51
Figura 25: Rotâmetro do Fluido Frio a 500 L/h.....	51

Figura 26: Funcionamento dos Termômetros.....	52
Figura 27: Funcionamento do CLP.....	52
Figura 28: Incrustações Retiradas da Tubulação do Fluido Quente.....	53
Figura 29: Incrustações Retiradas ao Final dos Experimentos da Tubulação do Fluido...	53
Figura 30: Sistema de Troca Térmica Pronto para a Realização dos Experimentos.....	54
Figura 31: Gráfico da Eficiência pela Equação Geral pelo Escoamento Concorrente.....	61
Figura 32: Gráfico da Eficiência pelos Números Adimensionais pelo Escoamento Concorrente.....	62
Figura 33: Gráfico da Eficiência pela Equação Geral pelo Escoamento Contracorrente..	63
Figura 34: Gráfico da Eficiência pelos Números Adimensionais pelo Escoamento Contracorrente.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações da Tubulação.....	41
Tabela 2: Tabela das Médias dos Experimentos Concorrente.....	56
Tabela 3: Tabela das Médias dos Experimentos Contracorrente.....	57
Tabela 4: Tabela de Dados para os Números Adimensionais Concorrente.....	58
Tabela 5: Tabela de Dados para os Números Adimensionais Contracorrente.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$\frac{\partial T}{\partial x}$	Gradiente de Temperatura na direção x
$\dot{m}_{ent}$	Fluxo Mássico de Entrada, Kg/s
$\dot{m}_{sai}$	Fluxo Mássico de Saída, Kg/s
$c_{p,f}$	Capacidade Calorífica a Pressão Constante do Fluido Frio, J/Kg.K
$c_{p,q}$	Capacidade Calorífica a Pressão Constante do Fluido Quente, J/Kg.K
A	Área Superficial, m <sup>2</sup>
A <sub>tr</sub>	Área Transversal, m <sup>2</sup>
c	Calor Específico, J/(Kg.K)
C	Taxa de Capacidade Calorífica, W/m
C <sub>f</sub>	Taxa de Capacidade Calorífica do fluido Frio, W/m
C <sub>min</sub>	Taxa de Capacidade Calorífica Mínima, W/m
C <sub>q</sub>	Taxa de Capacidade Calorífica do fluido Quente, W/m
D <sub>e</sub>	Diâmetro Externo, m
D <sub>h</sub>	Diâmetro Hidráulico, m
D <sub>i</sub>	Diâmetro Interno, m
E	Emissividade, adimensional
EST	Escola Superior de Tecnologia
h <sub>c</sub>	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção, W/m <sup>2</sup> .K
h <sub>f</sub>	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção do Fluido Frio, W/m <sup>2</sup> .K
h <sub>f</sub>	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção do Fluido Quente, W/m <sup>2</sup> .K
k	Condutividade Térmica, W/m.K
k <sub>f</sub>	Condutividade Térmica do Fluido Frio, W/m.K
k <sub>q</sub>	Condutividade Térmica do Fluido Quente, W/m.K
L	Comprimento, m
LEQ	Laboratório de Engenharia Química
MLDT	Média Logarítmica de Temperatura
Nu <sub>D</sub>	Número de Nusselt, adimensional

NUT	Número de Transferência de Calor, adimensional
P	Perímetro Molhado, m
Pr	Número de Prandtl, adimensional
q	Taxa de Transferência de calor, W
q''	Fluxo Térmico, W/m <sup>2</sup>
q <sub>f</sub>	Taxa de Transferência de Calor do fluido Frio, W
q <sub>máx</sub>	Taxa de Calor Máximo, W
q <sub>q</sub>	Taxa de Transferência de Calor do fluido Quente, W
q <sub>rad</sub>	Taxa de radiação, W
q <sub>rad,máx</sub>	Taxa Máxima de Radiação, W
Re	Número de Reynolds, adimensional
R <sub>total</sub>	Resistencia Térmica Total, K/W
SI	Sistema Internacional
T <sub>∞</sub>	Temperatura do Fluido, K
T <sub>air</sub>	Temperatura da superfície maior delimitando a menor, K
T <sub>f</sub>	Temperatura do Fluido Frio, K
T <sub>f, entrada</sub>	Temperatura de Entrada do Fluido Frio, K
T <sub>f, saída</sub>	Temperatura de Saída do Fluido Frio, K
T <sub>f,1</sub>	Temperatura do Fluido Frio na Zona 1, K
T <sub>f,2</sub>	Temperatura do Fluido Frio na Zona 2, K
T <sub>m</sub>	Temperatura Média, K
T <sub>q</sub>	Temperatura do Fluido Quente, K
T <sub>q, entrada</sub>	Temperatura de Entrada do Fluido Quente, K
T <sub>q, saída</sub>	Temperatura de Saída do Fluido Quente, K
T <sub>q,1</sub>	Temperatura do Fluido Quente na Zona 1, K
T <sub>q,2</sub>	Temperatura do Fluido Quente na Zona 2, K
T <sub>s</sub>	Temperatura da Superfície, K
T <sub>viz</sub>	Temperatura da Vizinhança, K
U	Coefficiente Global de Transferência de Calor, W/m <sup>2</sup> .K
UEA	Universidade do Estado do Amazonas
v	Velocidade, m/s
V	Vazão Volumétrica, m <sup>3</sup> /s; L/h
V <sub>e</sub>	Volume Específico, m <sup>3</sup> /Kg

$V_{e,f}$	Volume Específico do Fluido Frio, $m^3/Kg$
$V_{e,q}$	Volume Específico do Fluido Quente, $m^3/Kg$
$V_f$	Vazão Volumétrica do Fluido Frio, $m^3/s$ ; L/h
$V_{m,f}$	Vazão Mássica do Fluido Frio, Kg/s
$V_{m,q}$	Vazão Mássica do Fluido Quente, Kg/s
$V_q$	Vazão Volumétrica do Fluido Quente, $m^3/s$ ; L/h
$x$	Distância na Direção $x$ , m
$\alpha$	Reflexividade, adimensional
$\delta$	Absortividade, adimensional
$\Delta T$	Varição de Temperatura, $^{\circ}C$
$\Delta T_{,1}$	Varição de Temperatura na Zona 1 do Trocador de Calor, $^{\circ}C$
$\Delta T_{,2}$	Varição de Temperatura na Zona 2 do Trocador de Calor, $^{\circ}C$
$\varepsilon$	Eficiência de Transferência de Calor, adimensional
$\mu$	Viscosidade Cinemática, Kg/s.m
$\rho$	Densidade, $kg/m^3$
$\sigma$	Coefficiente de Stefan – Boltzmann, $W/m^2.K^4$
$\tau$	Transmissividade, adimensional

## SÚMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	18
<b>2.1.1 Condução.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2 Convecção.....</b>	<b>20</b>
2.1.2.1 Convecção Natural .....	21
2.1.2.2 Convecção Forçada.....	22
<b>2.1.3 Radiação.....</b>	<b>22</b>
2.2 TROCADORES DE CALOR .....	24
<b>2.2.1 Tubos Concêntricos.....</b>	<b>25</b>
2.2.1.1 Escoamento Paralelo.....	26
2.2.1.2 Escoamento Contracorrente.....	28
<b>2.2.2 Casco e Tubo.....</b>	<b>29</b>
2.3 ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR.....	30
<b>2.3.1 Balanço de Massa e Energia.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.2 Método da Média Logarítmica.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3 Coeficiente Global de Transferência de Calor.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.4 Cálculo da Área do Trocador de Calor.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.5 Método de Eficiência <math>\epsilon</math>-NUT.....</b>	<b>37</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
3.1 SISTEMA DE TROCA TÉRMICA.....	39
<b>3.1.1 Trocador de Calor de Tubos Concêntricos.....</b>	<b>40</b>
3.2 LIMPEZA E VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	41
3.3 FUNCIONAMENTO E REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	42
3.4 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	43
<b>3.4.1 Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor.....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.2 Cálculo da Eficiência e Número de Transferência de Calor.....</b>	<b>45</b>
3.5 ATUALIZAÇÃO DO ROTEIRO DE PRÁTICA.....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
4.1 LIMPEZA E VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	47
4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	54
<b>4.2.1 Análise do Coeficiente Global de Transferência de Calor.....</b>	<b>60</b>

<b>4.2.2 Análise da Eficiência pelo Método <math>\epsilon</math>-NUT</b> .....	61
<b>4.3 ATUALIZAÇÃO DO ROTEIRO DE PRÁTICA</b> .....	64
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	65
<b>6. PERSPECTIVAS</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68
<b>APÊNDICE</b> .....	72
<b>ANEXOS</b> .....	94

## 1. INTRODUÇÃO

Trocador de calor é um equipamento muito usual cuja função é, como o próprio nome já diz, trocar calor de um fluido frio para um fluido quente. A sua configuração é feita de acordo com as necessidades do processo, e isso vai desde a escolha do tipo de trocador (de placas, tubos concêntricos e casco e tubo) até o tipo de escoamento em que ele irá operar (paralelo, contracorrente ou cruzado), como mostra a figura 1. Outro ponto muito importante neste equipamento é a temperatura de operação, na qual deve estar bem definida, a fim de que seja calculado as propriedades físicas dos fluidos, além comprimento e a área de troca térmica. Uma análise econômica também é feita com o intuito de saber se a operação do equipamento será viável. (KREITH, 2012; PERRY, 2008)

Figura 1: Trocador de Calor em Escala Industrial



Fonte: MECÂNICA INDUSTRIAL (2021)

Por ser um equipamento muito usual, o trocador está presente no dia a dia das pessoas, um exemplo disso é o processo de climatização por meio de um ar-condicionado, onde dentro do seu sistema friogênico possui duas seções onde um fluido refrigerante (fluido com uma alta capacidade de trocar calor) passa por dentro. Um evaporador, na qual o fluido recebe calor e muda seu estado físico de líquido para gasoso e um condensador por onde o fluido é comprimido, onde novamente há a mudança de fase do fluido, com isso o equipamento realiza a climatização do ambiente. (SANTOS, 2017)

Mas um trocador de calor não é utilizado somente em âmbito residencial, mas principalmente em âmbito industrial, como mostra a figura 2, é usado em processos que necessitam que um fluido seja aquecido ou resfriado. Por exemplo na indústria de alimentos, principalmente nas indústrias de leite e suco integral, onde necessita-se do processo de pasteurização. Estes equipamentos são muito úteis, pois aquecem o produto

e rapidamente os resfriam, com isso matando microrganismos indesejados ao ser humano. (McCABE, 1993; PEREIRA *et al*, 2018)

Figura 2: Trocador de Calor em um Sistema de Pasteurização



Fonte: DIRECT INDUSTRY (2021)

Nota-se que a funcionalidade de um equipamento desses é de suma importância, pois o mesmo deve trabalhar com uma grande eficiência, para isso, deve ser realizada uma inspeção minuciosa e rotineiramente, a fim de identificar pontos de corrosão, vazamentos, incrustações entre outros problemas que levem o equipamento a perder a sua eficiência. (GANGHIS, 2018)

A limpeza deste tipo de dispositivo pode ocorrer através de uma ação mecânica, por meio de uma escova e água, ou também por meio de soluções químicas, onde produtos químicos passam por dentro do equipamento retirando as crostas presentes no mesmo. (GANGHIS, 2018)

Note que a manutenção incorreta do equipamento acarreta ao mal funcionamento do mesmo, perdendo sua função principal que é retirar calor de um fluido quente e transferir para um fluido frio. Então se uma máquina dessas não for eficiente na sua incumbência, isto pode acarretar a perdas significativas de matérias-primas, custos altos de operação e a não qualidade de um produto trazendo riscos até a vida humana, pois é utilizado na área alimentícia. (GADERNAL; SGUARIO, 2016)

Portanto, constata-se que a falta de eficiência de um equipamento dessa magnitude pode trazer dados imprecisos, desde a realização de um experimento em laboratório ou na análise do mesmo em escala industrial. Logo verificar sua eficiência é de extrema importância para um processo.

Assim sendo, este trabalho refere-se a análise da eficiência de um trocador de calor de tubos concêntricos em escala laboratorial do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Escola Superior de Tecnologia (EST) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA).

O objetivo geral deste trabalho consiste em se determinar e analisar a eficiência, pelo método  $\varepsilon$ -NUT, do trocador de calor de tubos concêntricos do Laboratório de Engenharia Química da Escola Superior de Tecnologia, por meio dos escoamentos em paralelo e em contracorrente. Os objetivos específicos são:

- i. Calcular a quantidade de troca de calor do sistema para diferentes vazões e escoamentos.
- ii. Calcular e analisar o coeficiente global de transferência de calor.
- iii. Analisar o dimensionamento do trocador de calor conforme os escoamentos em série e em paralelo (analisar o funcionamento e manutenção do equipamento).
- iv. Atualizar o roteiro de prática.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nesta seção será apresentada a revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho de conclusão de curso e nela será abordado todo referencial teórico necessário para o entendimento do mesmo. Serão abordados conceitos sobre trocas de calor e seus mecanismos, números adimensionais, coeficiente de transferência de calor, tipos de trocadores de calor, além dos tipos de análises.

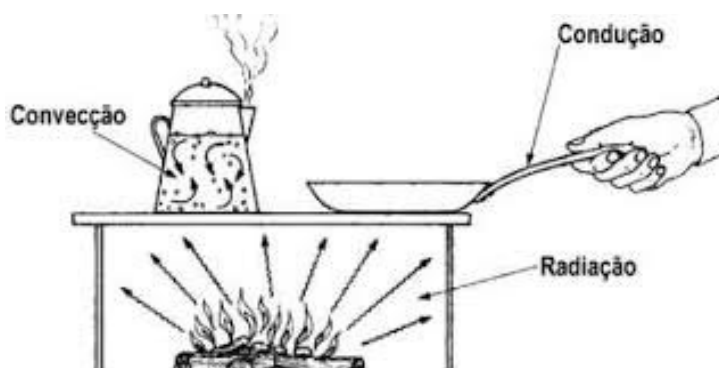
### 2.1 MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor é definido como o transporte de energia térmica na forma de calor, através da diferença de temperatura no espaço. Portanto, ela é a ciência que estuda as taxas de troca de calor. (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2014)

Essas taxas de trocas de calor são dadas pelo princípio da conservação energia, na qual consiste na primeira lei da termodinâmica, que diz que a energia não pode ser criada ou destruída, mas ela pode mudar a sua forma, ou seja, neste processo em que há diferença de temperatura, o fluido quente tende a transferir calor para o fluido mais frio. (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2013)

Então faz-se necessário a utilização de mecanismos para que ocorra essa troca. As literaturas sobre esse tema englobam três meios de transferência: A condução, que está relacionada a um gradiente de temperatura em um meio sólido, a convecção, que consiste na troca através de um fluido em movimento, e radiação, que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas, como mostra a figura 3. (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2013; KREITH 2012)

Figura 3: Mecanismos de Transferência de Calor.



Fonte: FÍSICA UFPR (2021)

### 2.1.1 Condução

O mecanismo de condução consiste na transferência de calor no nível microscópico, ou seja, pelo movimento dos seus átomos, então, quanto mais movimento, mais colisões e conseqüentemente mais calor. Tomando um sólido como exemplo, em que sua temperatura não é uniforme, a zona em que está com temperatura mais alta tende a transferir calor para a zona com temperatura mais baixa, por meio dos átomos e moléculas do sólido até que o campo de temperatura seja uniforme. (COELHO, 2016; KREITH 2012; SCHIMIDT, 2018)

Para representar este princípio utilizam-se modelos matemáticos de equações diferenciais parciais, e a lei que rege este preceito é a Lei de Fourier, que consiste na utilização de gradiente de temperatura para representar tanto a quantidade de calor como o fluxo de calor no de estudo. (COELHO, 2016; KREITH 2012)

A equação da condução pode ser dada através de modelos matemáticos de equações diferenciais parciais, e a mesma é regida pela Lei de Fourier, que consiste na utilização de um gradiente de temperatura, como mostram as equações 1 e 2. (COELHO, 2016; KREITH 2012)

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$q'' = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

A equação 1 mostra taxa a de transferência de calor, que possui unidade no SI de J/s ou W, a condutividade térmica, que é uma propriedade física que representa a capacidade de um objeto conduzir calor, sua unidade no SI é W/m.K, multiplicado pela área de troca de calor em m<sup>2</sup>, multiplicado pelo gradiente de temperatura, que é a deriva parcial da Temperatura, em Kelvin (K) pela derivada parcial de x, que representa a direção em que ocorre o processo, em metros (m). O sinal negativo simboliza que o calor é transferido na direção da zona de menor temperatura. (COELHO, 2016; INCROPERA, 2013)

Já a equação 2, representa a equação de Fourier ou a de fluxo térmico por condução, na qual é uma grandeza direcional e vetorial. Isso implica que o fluxo não é dependente da área de transferência de calor, mas sim da direção em que ocorre o fluxo, como mostra a figura 4. (INCROPERA, 2013)

Figura 4: Mecanismo da condução

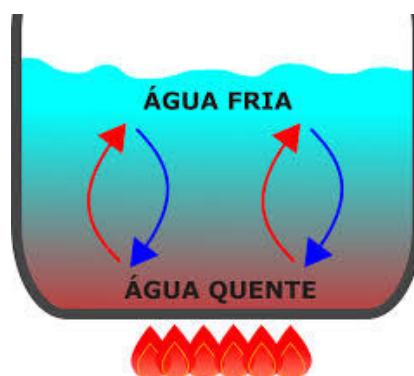


Fonte: BORGES (2019)

### 2.1.2 Convecção

Outro mecanismo de transferência de calor é a convecção que consiste na interação térmica entre uma superfície e um fluido em movimento ou até mesmo entre dois ou mais fluidos em movimento, como mostra a figura 5. (JIJI, 2009).

Figura 5: Mecanismo de Convecção



Fonte: BARREIROS (2018)

Diferente da condução, a convecção ocorre na presença de movimento, ou seja, a troca de calor é dada através do contato entre um fluido quente e um fluido frio em movimento. Para que ocorra a essa transferência é necessário verificar a geometria de troca (coordenadas retangulares, cilíndricas ou esféricas) e as propriedades físicas do fluido como viscosidade cinemática ( $\mu$ ), condutividade térmica ( $k$ ), densidade ( $\rho$ ) e calor específico ( $c$ ). (ÇENGEL, 2012).

A convecção ocorre principalmente nos líquidos e nos gases e este fenômeno é regido pela Lei de Newton de resfriamento, como mostram as equações (3) e (4). (ÇENGEL, 2012).

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

$$q'' = h_c \cdot (T_s - T_\infty) \quad (4)$$

A equação 3 consiste na equação da quantidade de calor por convecção (J/s ou W) que é igual ao coeficiente de transferência de calor ( $W/m^2.K$ ) multiplicado pela área de troca de calor ( $m^2$ ) e a diferença entre a Temperatura da superfície e Temperatura do fluido (K). Enquanto a equação 4 consiste na equação do fluxo de calor ( $W/m^2$ ) que segue o mesmo princípio da equação 3, porém não depende área da superfície. (ÇENGEL, 2012; JIJ, 2009)

Nota-se que tanto a equação 3 como a 4 dependem de um termo chamado coeficiente de transferência de calor por convecção que é compreendido pela capacidade de troca de calor entre uma superfície e um fluido através de uma área e uma diferença de temperatura. Sua aplicação é fundamental no ramo da engenharia, principalmente no dimensionamento de equipamentos de troca térmica. Apesar da essencialidade do coeficiente, a sua determinação geralmente é complexa, pois requer a utilização de correlações empíricas. (ÇENGEL, 2012; GONÇALVES; JÚNIOR, 2016)

A convecção pode ocorrer de duas formas: Natural ou Forçada.

#### 2.1.2.1 Convecção Natural

A designação de convecção livre ou natural é dada como o processo de movimento macroscópico do fluido, por meio de difusão térmica, ocasionado pela diferença de densidade e temperatura sem a inserção de velocidade, ou seja, não há uma fonte externa que produz velocidade para o sistema. (CAMPOS, 2015; CONNOR, 2019; GHIAASIAAN, 2018)

Esse deslocamento natural entre um fluido quente e um frio é denominado de efeito de flutuabilidade, pois um fluido quente (alta temperatura e baixa densidade) troca calor com um fluido frio (baixa temperatura e alta densidade) gerando isso uma circulação natural das correntes dos fluidos. (FOSTER; RORRER; WELTY, 2017).

Por se tratar de um regime natural (pois não necessita de agente externo) a convecção livre está muito presente nos fenômenos da natureza, como por exemplo no processo de circulação atmosférica, que consiste em uma massa de ar quente em níveis mais baixos da atmosfera se desloca para cima e com isso causando uma variação de temperatura na troposfera (parte mais baixa da atmosfera). Atualmente a convecção livre também é utilizada em processos industriais como em sistemas de resfriamento de reatores nucleares. (CHAVES; DA SILVA; LIMA, 2009; GHIAASIAAN, 2018)

### 2.1.2.2 Convecção Forçada

A convecção pode ocorrer também de modo forçado, diferente da natural, necessita de uma fonte externa gerando velocidade para o sistema, que pode ser uma bomba ou um ventilador. (GEANKOPLIS, 2003; KERN, 1999).

Este processo geralmente ocorre com fluidos em regime turbulento (Número de Reynolds -  $Re > 6000$ ), com um gradiente de velocidade alto, com isso influenciando diretamente no coeficiente de transferência de calor convectivo ( $h_c$ ) e induzindo a circulação forçada entre o fluido quente e o fluido frio. (GEANKOPLIS, 1993; KERN, 1999)

Atualmente a convecção forçada é um dos processos industriais mais utilizados na atualidade pela sua versatilidade, pois o fluxo dos fluidos pode ser dado por meio de placas assim como através de tubos e dutos além disso este método possui um baixo custo de manutenção e execução. Um exemplo em que esta técnica é empregada é no processo de secagem de sementes, entre outros tipos de materiais, mas também pode ser aplicada na produção de lingotes de silício para que os mesmos tenham um grau baixo de impurezas. (ENGELHARDT & ARRIECHE, 2016; NASCIMENTO *et al*, 2017; PERRY, 2008)

### 2.1.3 Radiação

Outro mecanismo de transferência de calor é a radiação, que consiste na energia eletromagnética fluindo no espaço na velocidade da luz, ou seja, ela pode ocorrer sem a presença de um fluido ou sólido, mas através do vácuo. Todas as substâncias acima do zero absoluto (0 K) emitem constantemente radiação, na qual a intensidade desse fluxo depende tanto da natureza quanto da temperatura deste corpo. (COULSON & RICHARDSON, 1999; LIENHARD, 2020; McCABE, 1993)

Um exemplo de como a radiação pode ser notada, é quando uma pessoa está próxima ao fogão ligado e ela consegue “sentir” as ondas de calor proveniente do fogo. Então a radiação segue este princípio de transferir energia através do espaço, de um corpo mais quente para o mais frio, como mostra a figura 6. (McCABE, 1993).

Figura 6: Mecanismo de Radiação



Fonte: GOUVEIA (2011)

Como já abordado neste tópico todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação. A sua propagação, se dá através de um corpo radiante (aquele que emite radiação), e um corpo absorvente (aquele que absorve a radiação), ou também pode ser dado através do intercâmbio de várias superfícies radiantes. Portanto, este mecanismo de transferência de calor só ocorre se puder ser desenhado uma linha reta entre os dois corpos. (LIENHARD, 2020; McCABE, 1993)

Quando um corpo recebe radiação acontecem três coisas: o corpo pode refletir essa radiação, isso é chamado de reflexividade ( $\alpha$ ), assim como pode transmitir, isso é chamado de transmissividade ( $\tau$ ), mas também pode absorver, isso é chamado de absorvidade ( $\delta$ ). A soma desses três fatores deve ser igual a 1, como mostra a equação 5. (COULSON & RICHARDSON, 1999; McCABE, 1993)

$$\alpha + \tau + \delta = 1 \quad (5)$$

Há situações que um objeto absorve perfeitamente toda a radiação a que é exposta e este é denominado de corpo negro. (LIENHARD, 2020)

Tomando o corpo negro como parâmetro, o cálculo da taxa máxima de radiação é dado pela Lei de Stefan – Boltzmann, como mostra a equação 6. (ÇENGEL, 2012).

$$q_{rad,máx} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (6)$$

A equação 6 consiste na equação da taxa máxima de radiação (J/s) que é igual a constante de Stefan – Boltzmann cujo valor é de  $5,67 \times 10^8$  (W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>), multiplicado pela área da superfície (m<sup>2</sup>), multiplicado pela temperatura elevado a quarta potência (K<sup>4</sup>). Existem também substâncias que não se comportam como um corpo negro, então a equação da lei de Stefan – Boltzmann é ajustada com um fator chamado de emissividade (E), que consiste em um valor no intervalo de  $0 \leq E \leq 1$ , que mede quanto aquela

substância se aproxima de um corpo negro. Como mostra a equação 7 da lei de Stefan – Boltzmann. (ÇENGEL, 2012)

$$q_{rad} = \sigma \cdot E \cdot A \cdot T_s^4 \quad (7)$$

A equação 7 se diferencia da equação 6 apenas pela multiplicação da emissividade que é um número adimensional. Então a taxa de radiação será igual a constante de Stefan – Boltzmann ( $W/m^2.K^4$ ), multiplicado pela emissividade (adimensional), multiplicado pela área da superfície ( $m^2$ ), multiplicado pela temperatura elevado a quarta potência ( $K^4$ ). Uma outra situação em que se pode calcular a taxa de radiação é quando uma superfície com uma determinada emissividade e área é delimitada completamente por uma superfície maior, como mostra a equação 8. (ÇENGEL, 2012)

$$q_{rad} = \sigma \cdot E \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{air}^4) \quad (8)$$

A equação 8 se equipara com a equação 7, na qual é diferenciada pela multiplicação da diferença da Temperatura da superfície elevada a quarta potência ( $K^4$ ) e a Temperatura da superfície maior que delimita a menor ( $K^4$ ). (ÇENGEL, 2012)

## 2.2 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são dispositivos responsáveis pela transferência de calor de um fluido quente para um fluido frio, por meio de tubos, de modo que os mesmos não se misturam. Estes equipamentos são amplamente utilizados no dia a dia, seja em ambiente industrial, como no aquecimento ou resfriamento de fluidos em processos químicos ou em usinas de produção de energia, também podem ser aplicados em ambiente residencial, como por exemplo nos eletrodomésticos em geral, aquecedores, ar-condicionados, geladeiras, entre outros. (ÇENGEL, 2012; KREITH, 2012; McCABE 1993).

A troca de calor neste equipamento ocorre por meio da convecção, proveniente dos fluidos, como também da condução do tubo que separa os mesmos. A taxa de transferência de calor é medida através da magnitude da diferença de temperatura, que varia ao longo do trocador. (ÇENGEL, 2012)

O projeto de um trocador de calor tem que visar dois fatores fundamentais: Primeiro ter um bom desempenho em sua função, ou seja, ter uma boa eficiência, segundo

ser economicamente viável, tanto em consumo energético como em utilização de matérias-primas. (KREITH, 2012)

Para o projeto de um trocador de calor deve-se seguir as seguintes etapas. (PERRY, 2008)

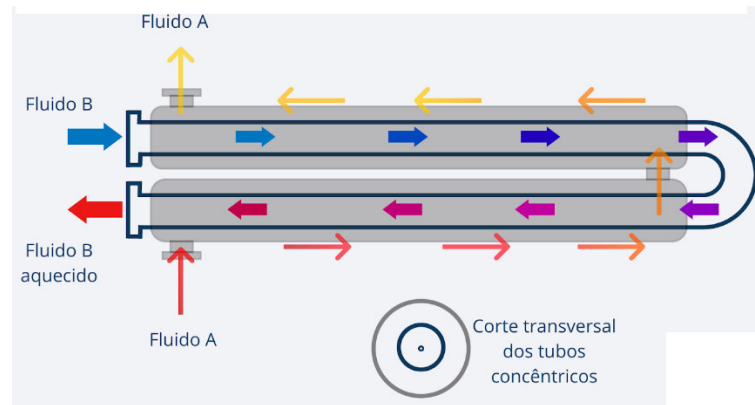
- Ter as condições de processos bem definidas;
- Obter as propriedades físicas ( $\rho$ ,  $\mu$ ,  $k$ ) para a temperatura e pressão de operação;
- Definir o trocador de calor adequado ao processo;
- Estimar preliminarmente o tamanho do trocador;
- Escolher um projeto para avaliação inicial das variáveis;
- Fazer ajustes no projeto inicial até que se chegue as condições adequadas.

Como já mencionado acima, existem vários tipos de trocadores, entretanto nessa revisão bibliográfica será abordado apenas o trocador de tubos concêntricos (bitubular) e o trocador de casco e tubo.

### **2.2.1 Tubos Concêntricos**

Os trocadores de calor de tubos concêntricos ou bitubulares, são equipamentos que possuem um arranjo de dois tubos com diâmetros diferentes, um dentro do outro, onde as correntes fluem pela parte interna do tubo de menor diâmetro e pelo espaço vazio entre os tubos (espaço anular). A figura 7 mostra o esquema de funcionamento de um trocador de calor de tubos concêntricos. (GUT & DE PAIVA, 2019; JÚNIOR, 2014)

Figura 7 – Esquema de Funcionamento de um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos



Fonte: PROPEQ (2020)

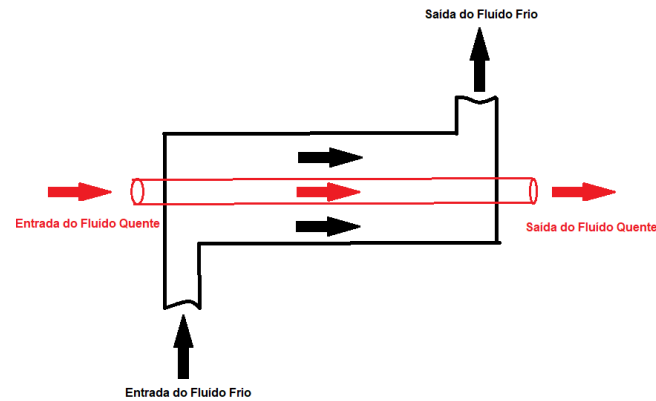
Este equipamento é amplamente utilizado na indústria, pelo fato de ser um dispositivo de baixo custo operacional, além de ser de fácil manuseio e manutenção. A sua aplicação é para fluidos de baixa e média viscosidade, como por exemplo a pasteurização de leite e suco. (FERRÃO, 2012; INCROPERA, 2013)

O trocador de calor bitubular pode ser configurado de duas formas: com ambos os fluidos se movendo no mesmo sentido, sendo chamado como escoamento paralelo, podendo também ser ajustado para que os fluidos se movam em sentidos opostos, sendo chamado de escoamento contracorrente. (INCROPERA, 2013)

#### 2.2.1.1 Escoamento Paralelo

Os trocadores de calor podem ser configurados com o escoamento paralelo, que consiste no fluido quente e o fluido frio escoarem na mesma direção como mostra a figura 8. (INCROPERA, 2013)

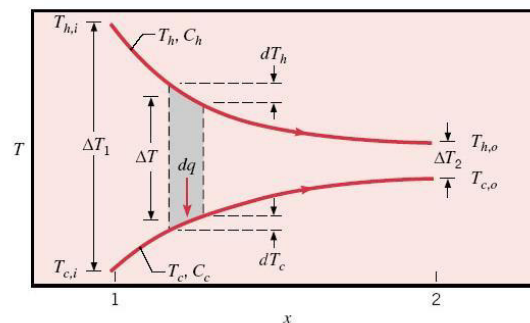
Figura 8: Esquema de um Trocador de Calor Configurado em Escoamento Paralelo



Fonte: Própria

Uma das características deste escoamento, é que ele possui uma limitação termodinâmica, esta limitação compreende que a temperatura de saída do fluido frio não pode ser maior que a do fluido quente. Outra particularidade do equipamento é, que para os fluidos saírem em equilíbrio térmico, a temperatura do fluido quente igual a temperatura do fluido frio, é necessário que o trocador tenha um comprimento infinito. Por fim, outra peculiaridade é sobre o seu perfil de temperatura, onde a diferença desta variação é muito grande e vai diminuindo ao longo do trocador como mostra a figura 9. (GUT & DE PAIVA, 2019; INCROPERA, 2013)

Figura 9: Perfil de Temperatura do Escoamento em Paralelo



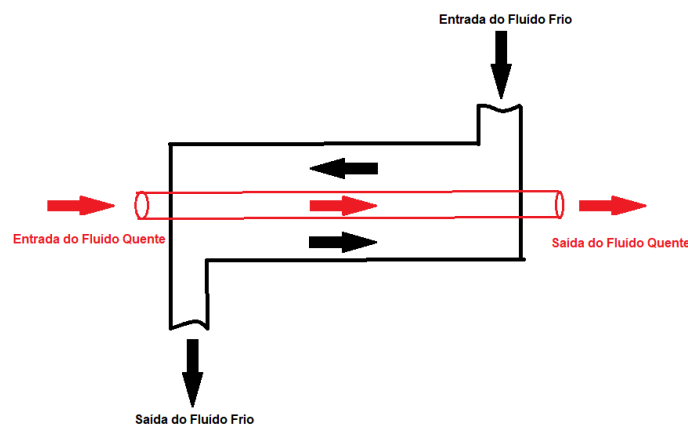
Fonte: INCROPERA (2013)

Portanto, a figura 9 mostra o perfil de temperatura, onde a zona 1 representa por onde os fluidos entram no trocador, logo as temperaturas de entrada para os fluidos quente e frio serão:  $T_{q, entrada} = T_{q,1} (T_{h,i})$  e  $T_{f, entrada} = T_{f,1} (T_{c,i})$ , já a zona 2, representa por onde os fluidos saem do equipamento, as temperaturas de saída para os fluidos quente e frio serão:  $T_{q, saída} = T_{q,2} (T_{h,o})$  e  $T_{f, saída} = T_{f,2} (T_{c,o})$ . (INCROPERA, 2013)

### 2.2.1.2 Escoamento Contracorrente

Outra configuração possível para o trocador de calor de tubos concêntricos, é o escoamento contracorrente, que consiste no fluido quente e no fluido frio, escoando em direções opostas do equipamento, como mostra a figura 10. (INCROPERA, 2013)

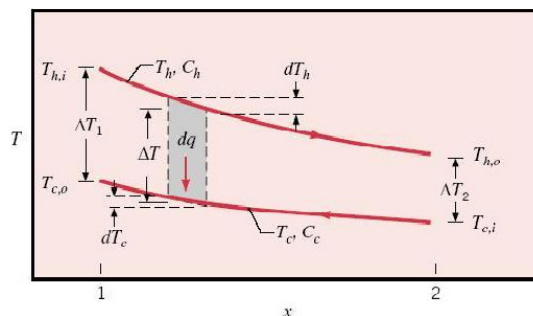
Figura 10: Esquema de um Trocador de Calor Configurado em Escoamento Contracorrente



Fonte: Própria

Diferente do escoamento em paralelo, o escoamento contracorrente não possui uma limitação termodinâmica, pois a temperatura de saída do fluido frio pode ser maior que a temperatura de saída do fluido quente, entretanto não pode ser maior que a temperatura de entrada do fluido quente. Uma outra característica desta configuração, é que a diferença da variação de temperatura é menor, comparada ao escoamento paralelo. Com isso o perfil de temperatura tende a ficar mais ou menos uniforme ao longo do trocador, como mostra a figura 11. (GUT; DE PAIVA, 2019; INCROPERA, 2013; NETO, 2014)

Figura 11: Perfil de Temperatura em Escoamento Contracorrente



Fonte: INCROPERA (2013)

Portanto, este escoamento possui um perfil mais uniforme que o paralelo, facilitando uma troca de calor mais homogênea, dessa forma necessita-se de uma área de transferência térmica menor, comparado com a configuração de fluidos na mesma direção. (DOS SANTOS & STAPASOLLA, 2011)

Ao analisar a figura 11, nota-se que a variação de temperatura na zona 1 (entrada do fluido quente) ( $\Delta T_1$ ) é igual a diferença da temperatura de entrada do fluido quente e a temperatura de saída do fluido frio, como mostra a equação 9. (INCROPERA, 2013)

$$\Delta T_1 = T_{q,entrada} - T_{f,saida} \quad (9)$$

Já a variação de temperatura na zona 2 (saída do fluido quente) ( $\Delta T_2$ ) é igual a temperatura de saída do fluido quente menos a temperatura de entrada do fluido frio, como mostra a equação 10. (INCROPERA, 2013)

$$\Delta T_2 = T_{q,saida} - T_{f,entrada} \quad (10)$$

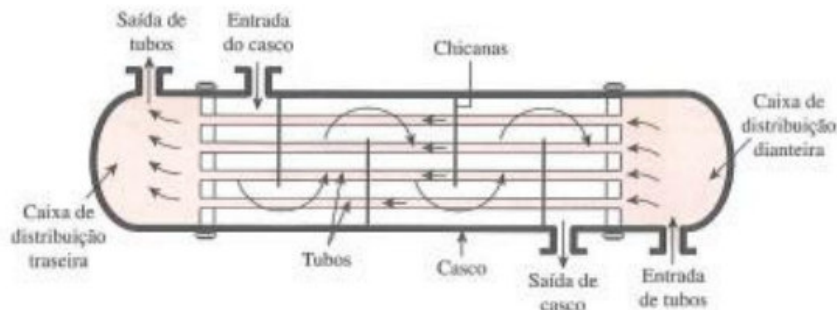
### 2.2.2 Casco e Tubo

Outro tipo de trocador de calor é o de casco e tubo, ele recebe este nome porque é composto por uma estrutura externa denominada de casco e por um feixe de tubos por onde os fluidos escoam. Este é um dos equipamentos de transferência de calor mais comuns na aplicação industrial, como no resfriamento de óleos, na produção de vapor para as usinas nucleares e indústria química em geral. Esta vasta gama de aplicações se dá por causa da sua ampla faixa de operação, pois possui uma grande área de troca térmica, além de possuir a capacidade de operar em diferentes temperaturas e pressões, e poder ser construído por diversos tipos de materiais. (ÇENGEL, 2012; FERREIRA, 2014; HEWITT *et al*, 1994)

O casco deste tipo de trocador é construído de acordo com as necessidades do cliente, seja em transferência de calor, área de troca térmica ou em números de passes. Já o número de tubos presente no feixe é projetado para facilitar a limpeza dos mesmos, proporcionando um menor custo de operação e uma maior taxa de transferência de calor. Este equipamento ainda pode ser composto por chicanas, que tem a função de sustentar os tubos para que não causem vibrações ao sistema, além de aumentar a turbulência do fluido de modo que o force a escoar por entre os tubos, garantindo que o mesmo utilize

toda a área de troca térmica e a uniformidade no espaçamento dos dutos, como mostra a figura 12. (FERREIRA, 2014; JÚNIOR, 2014)

Figura 12 – Esquema de Funcionamento de um Trocador de Calor de Casco e Tubos



Fonte: ÇENGEL, 2012

A figura 12 mostra o esquema de funcionamento de um trocador de calor casco e tubo. Nota-se que um fluido passa por dentro do feixe de tubos e outro por dentro do casco em escoamento contracorrente. Percebe-se também que na ilustração, o equipamento possui um passo de tubo e um passo de casco, isso se dá porque o fluido passa apenas uma vez por dentro do tubo (da direita para esquerda) e uma vez por dentro do casco (da esquerda para direita).

Portanto, este trocador de calor é muito importante para indústria pelas suas vantagens, entretanto faz-se necessário uma análise econômica adequada para mostrar qual modelo (número e diâmetro dos tubos, chicanas e número de passes) é o mais viável para aquela determinada função. (FOUST, 1982)

### 2.3 ANÁLISE DE TROCADORES DE CALOR

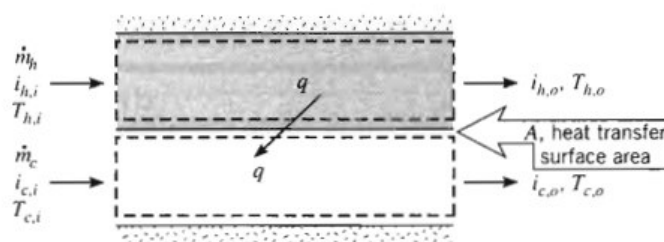
Como já mencionado até aqui, os trocadores de calor são equipamentos muito importantes para a indústria. O engenheiro responsável por construir ou operar deve ficar atento ao rendimento do mesmo, pois a má eficiência pode acarretar perdas significativas ao processo. Portanto, a análise de trocadores de calor consiste em verificar a eficiência do equipamento em relação a alguns parâmetros pré-determinados como, as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, coeficiente global de transferência de calor e área de troca térmica, ou seja, em outras palavras comparar a taxa total de transferência de calor com as grandezas já citadas. (GADERNAL; SGUÁRIO, 2016; INCROPERA, 2013)

### 2.3.1 Balanço de Massa e Energia

A primeira etapa para a análise de um trocador de calor é o balanço de massa e energia.

O balanço de massa tem como objetivo verificar os fluxos mássicos presentes no sistema. Portanto, o balanço é a quantidade de massa que entra no sistema igual a que sai ( $\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sai}$ ), como mostra a figura 13. (GADERNAL; SGUARIO, 2016)

Figura 13: Análise de um Trocador de calor



Fonte: INCROPERA (2013)

O balanço de energia do sistema é dado através da taxa total de transferência de calor entre o fluido quente e o fluido frio juntamente com a vizinhança, entretanto este último possui um valor pequeno e pode ser desprezado, assim como as mudanças de energia cinética e potencial. (INCROPERA, 2013)

Então seguindo a primeira lei da termodinâmica, a taxa de transferência de calor do fluido quente será igual a taxa de transferência de calor do fluido frio como mostra as equações (11) e (12). (ÇENGEL, 2012)

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} (T_{q,entrada} - T_{q,saida}) \quad (11)$$

$$q = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} (T_{f,saida} - T_{f,entrada}) \quad (12)$$

Onde  $\dot{m}_q$  e  $\dot{m}_f$  representam os fluxos mássicos dos fluido quente e frio (Kg/s),  $c_{p,q}$  e  $c_{p,f}$  simbolizam as capacidades caloríficas a pressão constante do fluido quente e frio (J/Kg.K) e  $T_q$  e  $T_f$ , as temperaturas dos fluidos quente e frio (K). (ÇENGEL, 2012)

As equações 11 e 12 ainda podem ser reescritas em função da taxa de capacidade calorífica dos fluidos (W/K). Esta taxa é igual aos fluxos mássicos multiplicados pelas capacidades caloríficas, e os subscritos  $q$  e  $f$  representam quente e frio respectivamente, como mostram as equações 13 e 14. (ÇENGEL, 2012)

$$C = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} \quad (13)$$

$$C = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \quad (14)$$

Então a equação da taxa de transferência de calor em função da taxa de capacidade calorífica será representada pelas equações 15 e 16.

$$q = C_q(T_{q,entrada} - T_{q,sáida}) \quad (15)$$

$$q = C_f(T_{f,sáida} - T_{f,entrada}) \quad (16)$$

Outra forma de associar a taxa de transferência de calor é através das diferenças de temperaturas entre os fluidos quente e frio, com isso a nova equação seria uma extensão da lei de resfriamento de Newton, utilizando o coeficiente global de transferência de calor (somatório das resistências térmicas), como mostra a equação 17. (INCROPERA, 2013)

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (17)$$

A equação 17 mostra a taxa de transferência de calor (q) igual a multiplicação do coeficiente global de transferência de calor (U) com a área de troca térmica (A) e a variação de temperatura média ( $\Delta T_m$ ) apropriada para as diferenças de temperaturas. (INCROPERA, 2013)

### 2.3.2 Método da Média Logarítmica de Temperatura

Ao analisar a equação 17 nota-se o uso da variação de temperatura média ( $\Delta T_m$ ), isso se dá pelo fato de que a variação de temperatura não se mantém uniforme ao longo do trocador, ou seja,  $\Delta T_m$  será obtida através do perfil de temperatura, na qual é a representação exata da temperatura média, refletindo verdadeiramente o deslocamento exponencial da variação de temperatura local. (ÇENGEL, 2012; GADERNAL; SGUARIO, 2016)

A análise da temperatura se dá por meio do método da Média Logarítmica de Temperatura (MLDT), tornando-se a ferramenta mais adequada para a avaliação dos trocadores de calor, porque estima as temperaturas considerando todas as seções do tubo. Logo a equação 18 define este método. (ÇENGEL, 2012; GADERNAL; SGUARIO, 2016)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (18)$$

Os valores de  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  representam as diferenças de temperatura nas extremidades do trocador, os seus valores dependem do tipo de escoamento, por exemplo se o escoamento for paralelo  $\Delta T_1$  será a diferença entre a temperatura de entrada do fluido quente e do fluido frio, já  $\Delta T_2$  será a diferença entre a temperatura de saída do fluido quente e do fluido frio. Se o trocador estiver configurado com escoamento em contracorrente  $\Delta T_1$  será a diferença entre a temperatura de entrada do fluido quente e a temperatura do fluido frio e o  $\Delta T_2$  será a diferença entre a entrada do fluido quente e a temperatura de entrada do fluido frio. (ÇENGEL, 2012)

Portanto, o MLDT é a forma mais adequada de análise de trocadores, sendo o mais indicado para determinar o tamanho necessário do equipamento para aquela determinada temperatura de operação. (GADERNAL & SGUARIO, 2016)

### 2.3.3 Coeficiente Global de Transferência de Calor

Uma das etapas essenciais para a análise de trocadores de calor é a determinação do coeficiente global. Este cálculo consiste na habilidade de um sistema criar barreiras convectivas e condutivas para transferir calor, em outras palavras, este valor representa a capacidade do equipamento trocar calor entre os fluidos, ou seja, está relacionado a resistência térmica. (INCROPERA, 2014; SCHENKEL, 2015)

A resistência térmica tem o mesmo princípio da resistência elétrica, onde em um circuito se colocam resistores para impedir a passagem da energia elétrica, só que em um circuito térmico os resistores retardam a troca de calor. Em um sistema de transferência de calor composto por um trocador de calor onde um fluido quente está separado de um fluido frio por meio de uma parede, esta parede se comporta como uma resistência térmica, dificultando a troca de calor entre os fluidos. (FOUST, 1982; HOLMAN, 1998)

Então pode-se definir que a resistência térmica é o quociente entre um potencial motriz (que neste caso é a diferença de temperatura) e a taxa de transferência de calor, na qual está presente nos três tipos de mecanismos, como mostra as equações 19, 20 e 21. (INCROPERA, 2013)

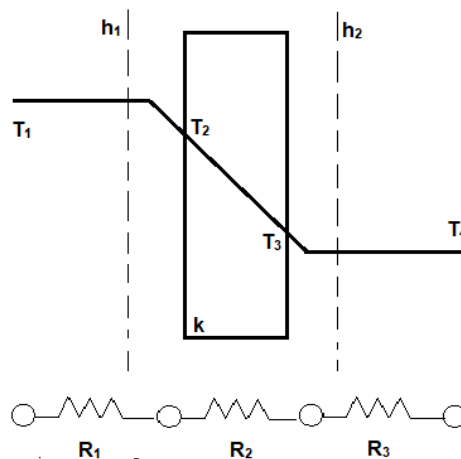
$$R_{t,cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (19)$$

$$R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (20)$$

$$R_{t,rad} \equiv \frac{T_s - T_{viz}}{q} = \frac{1}{h_r \cdot A} \quad (21)$$

Voltando ao trocador de calor mencionado acima, os fluidos são separados pela parede do tubo e somando com as definições já abordadas, nota-se que neste sistema existem três resistências térmicas, com isso formando um sistema composto. Como mostra a figura 14. (FOUST, 1982)

Figura 14: Resistencia térmica em um trocador de calor



Fonte: PRÓPRIA

A primeira resistência é proveniente da convecção presente no fluido quente, a segunda da condução da parede do tubo que separa os fluidos e a terceira por meio da convecção do fluido frio. (FOUST, 1982)

Então, neste caso o coeficiente global de transferência de calor ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$  ou  $J/s \cdot m^2 \cdot ^\circ C$ ) será definido pelo inverso da resistência total do sistema ( $K \cdot m \cdot W^{-1}$ ) multiplicado pela área de troca de calor ( $m^2$ ). Como mostra a equação 22. (FOUST, 1982)

$$U = \frac{1}{R_{total} \cdot A} \quad (22)$$

Onde a resistência total é demonstrada na equação 23:

$$R_{total} = \sum R_t = \frac{\Delta T_{global}}{q} \quad (23)$$

Logo a resistência global será igual ao somatório das resistências térmicas que é igual ao quociente entre a diferença total de temperatura global (K) e a taxa de transferência de calor (W/m). (HOLMAN,1998)

Com isso consegue-se determinar como ficará disposto a equação do coeficiente de calor de um trocador de calor tubular, que possui duas resistências térmicas provenientes da convecção dos fluidos quente e frio juntamente com a condução do metal do tubo que separa os meios. A equação 24 mostra as resistências térmicas presentes no equipamento. (INCROPERA, 2013)

$$R_T = \frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad (24)$$

Os subscritos *i* e *e* representam as superfícies internas e externas do tubo. Nota-se também a presença dos coeficientes convectivos para ambos os fluidos, na qual são estimados a partir da equação de alguns números adimensionais como: Nusselt, Reynolds e Prandtl 25. (INCROPERA, 2013)

$$h = \frac{Nu_D \cdot k}{D_h} \quad (25)$$

$$D_h = \frac{4A_{tr}}{P} \quad (26)$$

A equação 25 mostra o coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>.K) igual ao Número de Nusselt (adimensional) (este número representa o aprimoramento da transferência de calor por meio da convecção em uma camada de fluido) vezes a condutividade térmica do fluido (W/m.K) dividido pelo diâmetro hidráulico (m). O diâmetro hidráulico consiste no diâmetro da superfície utilizada no processo. A equação 26 mostra que este é a relação entre quatro vezes a área transversal de escoamento (m<sup>2</sup>) pelo perímetro molhado (m). (CONNOR, 2020; INCROPERA, 2013; KREITH, 2012)

Para o cálculo do número de Nusselt da equação 26 é preciso observar o escoamento turbulento dos fluidos. Com isso sua análise depende de outros dois números adimensionais: Reynolds (representa o parâmetro de escoamento de um fluido, a partir da relação entre as forças de viscosidade e as de inercia) e Prandtl (é a razão entre de difusidade de impulso e a difusidade térmica). A equação que representa este escoamento é dada pela lei de Dittus-Boetler. (CONNOR, 2019; CONNOR, 2020; INCROPERA 2013)

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^n \quad (27)$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (28)$$

A equação que rege a lei de Dittus-Boetler é: Nusselt (adimensional) igual a multiplicação de 0,023 com número de Reynolds elevado a  $4/5$  vezes o número de Prandtl elevado a  $n$ , onde  $n$  varia de acordo com a sua finalidade,  $n=0,3$  para o resfriamento e  $n=0,4$  para aquecimento. Neste caso o número de Prandtl é tabelado de acordo com a temperatura e Reynolds é calculado de acordo com a equação 28, onde o número de Reynolds é igual a multiplicação da densidade ( $\text{Kg/m}^3$ ) com a velocidade do fluido (m/s) e o diâmetro hidráulico (m) dividido pela viscosidade cinemática ( $\text{Kg/s.m}$ ). (INCROPERA, 2013)

Então depois de toda essa análise dos números adimensionais o coeficiente global de transferência de calor será cálculo segundo a equação 29. (INCROPERA, 2013)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_e}} \quad (29)$$

Portanto, o coeficiente global de transferência de calor é um fator muito importante para a análise dos trocadores de calor, e para uma maior precisão dos resultados faz-se necessário que as superfícies de troca estejam limpas, pois sujeiras encrostadas na parede do tubo aumentam a resistência térmica, tornando o equipamento ineficiente. (INCROPERA, 2013)

### 2.3.4 Cálculo da Área do Trocador de Calor

A área de um trocador de calor consiste na superfície de contato entre o fluido frio e fluido quente, por exemplo, em um trocador de calor bitubular a parede do tubo interno que separa os fluidos é a superfície de transferência de calor. (INCROPERA, 2013)

O seu cálculo é dado pela equação geral da taxa de transferência (Equação 17) onde a área é igual a taxa de transferência de calor dividido pelo coeficiente global de transferência de calor vezes a variação da temperatura média. A área também pode ser expressa através do cálculo da eficiência NUT, na qual será explicada no tópico seguinte. (INCROPERA, 2013)

### 2.3.5 Método de Eficiência $\varepsilon$ -NUT

Outra forma de análise de um trocador de calor é através do cálculo da sua eficiência de troca térmica, então essa isto pode ser dado por meio do método e eficiência  $\varepsilon$ -NUT (Número de Unidades de Transferência). (GARDERNAL & SGUARIO, 2016)

O método MLDT apresenta algumas limitações em relação ao seu cálculo, por exemplo, se as temperaturas de saída dos fluidos não forem conhecidas a sua utilização acaba se tornando difícil, pelo fato de haver iterações trabalhosas. Em virtude deste problema em 1955, William Kays e Alexander London desenvolveram um método denominado de eficiência  $\varepsilon$ -NUT. (ÇENGEL, 2012; INCROPERA, 2013)

Diferente do método MLDT, o método  $\varepsilon$ -NUT não analisa a eficácia em relação a temperatura ( $\Delta T_m$ ), mas a por meio da eficiência de transferência de calor ( $\varepsilon$ ). Então esta relação será dada por meio da equação 30. (KAYS & LONDON, 2018)

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{T_{q,entrada} - T_{q,s\acute{a}ida}}{T_{q,entrada} - T_{f,s\acute{a}ida}} \quad (30)$$

Ou seja, a eficiência de transferência de calor é a relação entre a taxa e a taxa máxima de transferência de calor. Para um entendimento melhor desta relação, além de entender melhor como calcular esta taxa máxima de transferência de calor, é necessário a analisar novamente a equação 15 e 16. (INCROPERA, 2013)

Para que haja essa taxa máxima de transferência de calor é necessário que tenha a maior variação de temperatura, que no caso de um trocador de calor em escoamento contracorrente será dado por meio da temperatura de entrada do fluido quente e a saída do fluido frio. Já em relação a taxa de capacidade calorífica é o contrário, pois para uma máxima taxa de transferência de calor é necessário uma taxa de capacidade calorífica mínima. Então se a  $C_f < C_q$  a equação da taxa máxima será representada pelas equações 31 e 32: (INCROPERA, 2013)

$$q_{m\acute{a}x} = C_f(T_{f,s\acute{a}ida} - T_{f,entrada}) \quad (31)$$

Agora se  $C_q < C_f$ , a taxa máxima de transferência de calor será: (INCROPERA, 2013)

$$q_{m\acute{a}x} = C_q(T_{f,s\acute{a}ida} - T_{f,entrada}) \quad (32)$$

O Número de Unidades de Transferência é um parâmetro adimensional que também é calculado e mede o tamanho de transferência de calor no trocador demonstrado pela equação 33. (KAYS & LONDON, 2018)

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (33)$$

Note que na equação de NUT é proporcional a área de transferência de calor, então quanto maior a área de troca, maior será o valor de NUT e com isso também o equipamento terá uma alta eficácia. (KAYS & LONDON, 2018)

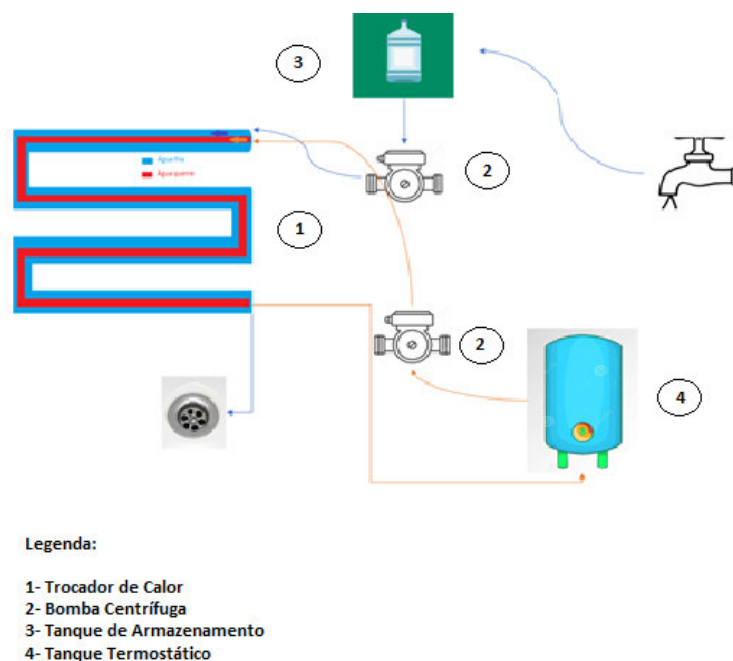
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e o método proposto para a realização e conclusão dos objetivos expostos nos tópicos anteriores deste trabalho.

#### 3.1 SISTEMA DE TROCA TÉRMICA

A figura 15 representa o sistema de troca térmica proposto para a realização deste projeto.

Figura 15: Esquema de Troca Térmica



Fonte: DIAS *et al* (2019)

De acordo com a figura 15 o sistema de troca térmica utilizado neste trabalho é composto por um trocador de calor de tubos concêntricos (1) dividido em quatro partes de troca térmica. O fluido que passará pelo tubo interno, será água quente, procedente de um tanque termostático (4), na qual é escoado por meio de uma bomba centrífuga SHX-HOBBY (2) com potência de 0,5 CV e 110 mm de diâmetro do rotor. Após a passagem pelo trocador de calor a água retornará para o tanque termostático para que seja reutilizada pelo sistema. (DE OLIVEIRA, 2011)

Já para o fluido que passará pelo tubo externo, será água fria, procedente de um tanque de armazenamento (3) de 50L, oriundo de uma torneira, na qual também foi utilizada uma bomba centrífuga (2) de mesmas características que a empregada para o fluido quente, na qual deslocará o fluido do tanque até o trocador. Após a passagem pelo trocador de calor a água foi descartada. (DE OLIVEIRA, 2011)

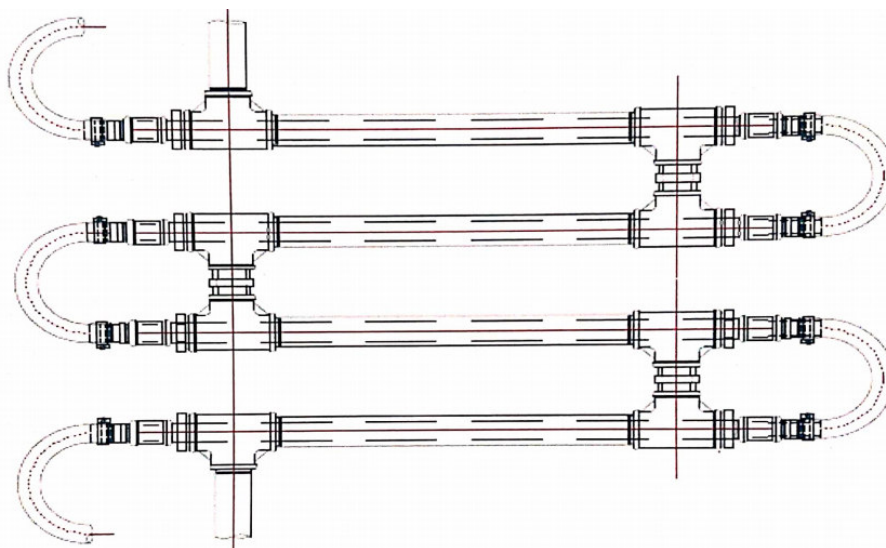
Também fazem parte do sistema dois rotômetros, a fim de indicar a vazão (L/h) dos fluidos no trocador de calor, além disso nas entradas e saídas dos fluidos são posicionados termômetros digitais com resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . (DE OLIVEIRA, 2011)

### 3.1.1 Trocador de Calor de Tubos Concêntricos

O equipamento primordial para este projeto é um trocador de calor de tubos concêntricos que consiste em um dispositivo com dois tubos de diâmetros diferentes, um com diâmetro menor e outro com diâmetro maior. (GUT & DE PAIVA, 2019)

O equipamento presente no LEQ está esquematizado na figura 16

Figura 16: Esquema do Trocador de Calor presente no LEQ



Fonte: DE OLIVEIRA (2011)

Nota-se que este equipamento possui quatro regiões onde se ocorrem as trocas térmicas. A linha tracejada corresponde ao fluido quente escoando pelo tubo de diâmetro menor e a linha contínua representa o fluido frio escoando pelo tubo de maior diâmetro. (DE OLIVEIRA, 2011)

Ao que se refere aos tubos, o interno possui diâmetro de 1 polegada (pol) e 1,38m de comprimento e o externo possui diâmetro de ½ polegada e 1,50m de comprimento. Ambos são constituídos de aço galvanizado, pois este material é de fácil acessibilidade, tanto de disponibilidade como de custo, além de ser resistente à corrosão. As especificações mais detalhadas estão representadas na tabela 1. (DE OLIVEIRA, 2011)

Tabela 1: Especificações da Tubulação

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
<b>Tubo Externo</b>	
<b>Diâmetro Nominal</b>	0,02540 m
<b>Diâmetro Externo</b>	0,03370 m
<b>Diâmetro Interno</b>	0,03105 m
<b>Comprimento</b>	1,38 m
<b>Área Anelar de Escoamento</b>	0,00040067 m <sup>2</sup>
<b>Tubo Interno</b>	
<b>Diâmetro Nominal</b>	0,01270
<b>Diâmetro Externo</b>	0,02130
<b>Diâmetro Interno</b>	0,01905
<b>Comprimento</b>	1,50
<b>Área de Escoamento</b>	0,0002850 m <sup>2</sup>

Fonte: OLIVEIRA (2011)

### 3.2 LIMPEZA E VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Primeiramente foi feita uma limpeza e verificação da parte externa do equipamento com a utilização de um pano de limpeza (pano multiuso) com o intuito de retirar o acúmulo de poeira presente trocador de calor e nos acessórios (termômetros e rotômetros), além de detectar possíveis não conformidades no sistema, como por exemplo rupturas nas tubulações ou falta das mesmas.

Após o primeiro passo, foi realizada uma limpeza e verificação interna do sistema, que abrange o interior das tubulações e rotômetros assim como as bombas centrifugas presentes. Para isto foi necessário a passagem de água pelo sistema, tanto pela tubulação do fluido frio como pela do fluido quente. (DIAS *et al*, 2019)

Para isso foi realizada uma passagem de água pelo sistema nas vazões de 100, 300 e 500 L/h por um período de 10 minutos. Isto foi necessário para que ocorra a limpeza da parte interna dos tubos e a retirada de incrustações presentes nas tubulações por meio da ação mecânica. Além disso, ao mesmo tempo foi feita uma verificação para que o sistema não tenha nenhum vazamento.

Neste mesmo processo foi feita a verificação da situação das bombas centrifugas se as mesmas estão funcionando corretamente, se há algum vazamento ou se foi necessária abri-la e realizar uma limpeza mais profunda, caso isto ocorra foi utilizada uma esponja de aço para a retirada das incrustações presentes na bomba.

Através da passagem de água os termômetros também serão verificados. A verificação consiste na checagem do equipamento está ligado e das pilhas, se as mesmas estão em condições adequadas para o uso.

A verificação do funcionamento dos rotâmetros foi dada através da abertura e fechamento das válvulas presentes no sistema, e à medida que isto ocorrer foi notado a movimentação dos êmbolos presentes nos mesmos.

Por fim, foi verificada as condições do Controlador Lógico Programável (CLP) presente no tanque termostático, onde foi setada uma determinada temperatura e foi analisada se o equipamento chegou a temperatura desejada.

### 3.3 FUNCIONAMENTO E REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O primeiro passo para o funcionamento e a realização dos experimentos foi o acionamento do trocador de calor. Ligar-se-á as bombas junto a energia, e logo em seguida foi liberada a vazão da água fria proveniente do tanque de armazenamento, assim como a água quente oriunda do tanque termostato. (DIAS *et al*, 2019)

Com a liberação das vazões de água quente e fria foi realizado o controle das mesmas por meio de válvulas e através da indicação no rotâmetro. (DIAS *et al*, 2019)

A análise de eficiência deste trocador de calor pode ser feita por vários métodos diferentes, isto se dá pelo fato de que o equipamento em questão é bastante versátil.

Para este trabalho de conclusão de curso foi analisado o comportamento da troca de calor no equipamento em diferentes vazões, tanto de fluido quente quanto de fluido

frio. As vazões variarão de 100 a 500 L/h para o fluido frio e de 100 a 600 L/h para o fluido quente, onde a vazão do fluido frio foi fixada enquanto a do fluido quente variou. A tabela com a sequência dos experimentos se encontra no Apêndice A deste trabalho.

Cada experimento durou 14 minutos com os dados da temperatura de entrada e saída de ambos os fluidos sendo anotados ao início do mesmo e posteriormente a cada 2 minutos até que se conclua o tempo proposto. Ao final deste tempo, foi realizada a alteração das vazões do próximo experimento. (DIAS *et al*, 2019)

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE TRÂNSFERÊNCIA DE CALOR

Os valores para a realização dos cálculos da taxa de transferência de calor foram obtidos a partir dos valores de vazão, tempo e temperatura e serão dispostos em formato de planilhas, na ferramenta computacional EXCEL. (DIAS *et al*, 2019)

A partir desses dados obtidos na realização dos experimentos foi possível determinar a taxa de transferência de calor para o fluido quente e para o fluido frio através da equação 34 e 35 respectivamente. Onde os valores de vazão são obtidos pela indicação dos rotâmetros, os valores das capacidades caloríficas a pressão constante são tabelados e os valores de temperatura são aferidos a partir dos termômetros presentes no sistema (DIAS *et al*, 2019)

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q} (T_{q,entrada} - T_{q,saída}) \quad (34)$$

$$q = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} (T_{f,saída} - T_{f,entrada}) \quad (35)$$

Outro ponto a ser analisado é que a subtração dos valores obtidos nas equações 34 e 35 representam o quanto é perdido para o ambiente, pois em um sistema perfeitamente isolado, segundo a primeira lei da termodinâmica, a quantidade de calor do fluido quente é a mesma do fluido frio. (ÇENGEL, 2012; DIAS *et al*, 2019)

#### 3.4.1 Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor

A partir dos valores da taxa de transferência de calor é possível calcular outro fator muito importante para a análise deste tipo de equipamento, que é o coeficiente global de transferência de calor (U). Este valor é responsável pela capacidade do equipamento trocar calor entre os fluidos (INCROPERA, 2014)

Este cálculo foi feito por dois métodos diferentes: O método utilizando a equação geral dos trocadores de calor e o método utilizando os números adimensionais.

O coeficiente global de transferência de calor pode ser associado a equação 36 que corresponde a uma extensão da lei de resfriamento de Newton, na qual, leva-se em conta a área de troca térmica, que é denominado a partir do diâmetro hidráulico (equação 37) e a variação de temperatura média, determinada pelo método MLDT (equação 38). (DIAS *et al*, 2019; INCROPERA, 2013)

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (36)$$

$$D_h = \frac{4A_{tr}}{P} \quad (37)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (38)$$

A outra forma que foi adotada neste trabalho foi a determinação do coeficiente global de transferência de calor por meio do cálculo dos coeficientes individuais dos fluidos quente e frio, na qual utilizam-se dos números adimensionais de Nusselt, representados pela lei de Dittus-Boetler que corresponde a equação 39; Reynolds, representada pela equação 40; e Prandlt, que são números tabelados de acordo com a temperatura. (DIAS *et al*, 2019)

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{4/5} \cdot Pr^n \quad (39)$$

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (40)$$

Os valores de Prandlt, viscosidade, densidade e condutividade térmica da água foram retirados da tabela “Propriedades Termofísicas da Água Saturada” encontrada no livro de INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de Transferencia de Calor e de Massa**, 7° ed. p.640, na qual, encontra-se no Anexo A deste trabalho.

A partir desses números adimensionais foi possível calcular os coeficientes individuais para o fluido quente e frio, a partir da equação 41, e posteriormente o coeficiente global de transferência de calor, através da equação 42. (DIAS *et al*, 2019)

$$h = \frac{Nu_D \cdot k}{D_h} \quad (41)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_e}} \quad (42)$$

Com estes dois parâmetros foi possível fazer uma comparação entre os mesmos. Podendo até ser comparada com os valores da taxa de transferência de calor, através da utilização da equação 36.

### 3.4.2 Cálculo da Eficiência e Número de Transferência de Calor

A última etapa de cálculos deste projeto foi determinar a eficiência do equipamento, na qual, utilizar-se-á o método  $\varepsilon$ -NUT, pois o mesmo analisa a eficiência através da troca de calor e não através da temperatura e a equação 43 regerá esta parte. (DE OLIVEIRA, 2011; KAYS & LONDON, 2018)

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{T_{q,entrada} - T_{q,saída}}{T_{q,entrada} - T_{f,entrada}} \quad (43)$$

Nota-se que a equação 43 é uma relação entre a taxa de transferência de calor com a taxa de transferência de calor máxima, na qual pode ser obtida pela relação entre as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio e a de saída do fluido quente, mas também pode ser obtida a partir da capacidade de calor mínima, seguindo as especificações das equações 44 e 45. (DE OLIVEIRA, 2011)

$$q_{m\acute{a}x} = C_f(T_{f,saída} - T_{f,entrada}) \quad (44)$$

$$q_{m\acute{a}x} = C_q(T_{f,saída} - T_{f,entrada}) \quad (45)$$

Por fim, foi necessário o cálculo do Número de Unidades de Transferência, que consiste em um parâmetro adimensional para medir o tamanho da transferência de calor no trocador. Para isto foi preciso utilizar a equação 46 para o cálculo deste indicador. (DE OLIVEIRA, 2011; KAYS & LONDON, 2018)

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{min}} \quad (46)$$

### 3.5 ATUALIZAÇÃO DO ROTEIRO DE AULA PRÁTICA

Por fim, foi realizado a atualização do roteiro de prática da disciplina de Operações Unitárias II com o intuito de que os alunos do curso de Engenharia Química da UEA consolidem os conhecimentos obtidos em sala de aula através da prática.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do desenvolvimento da parte de revisão e metodologia foram realizados experimentos, com o intuito de saber a real situação do equipamento.

### 4.1 LIMPEZA E VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO

A limpeza foi iniciada com a passagem de um pano de limpeza, como o da figura 17, pela parte externa do equipamento com isso houve a retirada do acúmulo de poeira de poeira presente no equipamento e nos seus acessórios.

Figura 17 – Pano de Limpeza Utilizado na Limpeza do Trocador



Fonte: Própria

Nesta parte da limpeza e verificação da parte externa constatou-se a falta de uma das mangueiras atóxicas, como a da figura 18, que liga o tanque termostático à bomba centrífuga, a mesma foi comprada. Também se notou uma inconformidade em um dos canos que leva a água quente da bomba centrífuga ao trocador de calor, o mesmo encontrava-se ressecado e prestes a se romper, então esta parte da tubulação foi trocada por uma nova, como mostra a figura 19. No momento de retirada da tubulação antiga aconteceu a ruptura da mesma, comprovando que era necessário ser feito uma troca.

Figura 18 – Mangueira Atóxica



Fonte: MERCADO LIVRE (2021)

Figura 19 – Tubulação Trocada



Fonte: Própria

Quanto a parte interna do equipamento foi realizada uma limpeza através de ação mecânica, como GANGHIS, 2018 e DIAS *et al*, 2019 sugeriram em seus trabalhos. Então foi realizada a limpeza e verificação através da passagem de água pelas tubulações e rotâmetros para a retirada de incrustações presentes nos mesmos. Além disso nesta passagem de água pelo sistema também foi possível verificar se não há vazamentos e averiguar a situação das bombas centrífugas, rotâmetros e termômetros.

Foram realizadas passagens de águas nas vazões 100, 300 e 500 L/h por um período de 10 minutos para houvesse um desprendimento das incrustações e as mesmas fossem levadas para fora do sistema. O relatório de DIAS *et al*, 2019 não especifica a vazão utilizada para a limpeza deste equipamento, por este motivo, foi definido a utilização destas três vazões para a realização deste processo.

Ao iniciar o acionamento do sistema de troca térmica com a liberação das válvulas para a passagem de água foi ligada as bombas centrífugas e ao ocorrer isto percebeu-se que a bomba referente ao fluido frio não estava funcionando, com isso fez-se necessário abrir a bomba para verificar sua situação. Ao abrir a bomba foi encontrada bastante incrustação como mostra a figura 20.

Figura 20 – Situação da Bomba Centrífuga



Fonte: Própria

Tendo em vista a situação que se encontrava a bomba centrífuga utilizou-se uma esponja de aço da marca Lustrol na parte do rotor da bomba. Após a limpeza com a esponja foram retiradas as incrustações como mostra a figura 21. Após isso a bomba foi fechada e ligou-se o sistema e a mesma funcionou corretamente.

Figura 21: Bomba Centrífuga após a limpeza



Fonte: Própria

Com a limpeza e verificação da bomba concluída foi realizada a passagem de água pelo sistema.

Iniciou-se o processo de passagem de água com a vazão de 100 L/h tanto para o fluido quente como para o fluido frio por 10 minutos, o mesmo processo foi repetido para as vazões de 300 e 500 L/h e não foi encontrado vazamentos no sistema. Notou-se o

funcionamento dos rotâmetros, pois a cada vez que as válvulas eram abertas ou fechadas os êmbolos se movimentavam e marcavam a vazão na escala presente no marcador. As figuras 22 e 23 mostram o funcionamento do rotâmetro do fluido quente, apesar de estar com a carenagem embaçada foi possível visualizar a movimentação dos êmbolos, enquanto as figuras 24 e 25 mostram o funcionamento do rotâmetro do fluido frio.

Figura 22: Rotâmetro do Fluido Quente marcando 300 L/h



Fonte: Própria

Figura 23: Rotâmetro do Fluido Quente a 500 L/h



Fonte: Própria

Figura 24: Rotâmetro do Fluido Frio a 300 L/h



Foto: Própria

Figura 25: Rotâmetro do Fluido Frio a 500 L/h



Fonte: Própria

Enquanto estava realizando a passagem de água pelo sistema também foi feita a verificação dos termômetros. Os quatro termômetros receberam pilhas AAA novas de 1,5V da marca Duracell. A figura 26 mostra o funcionamento dos termômetros.

Figura 26: Funcionamento dos Termômetros



Durante o processo de passagem de água também foi feita a verificação no CLP presente no tanque termostático, onde foi setada a temperatura de 40,0 e esperou-se para ver se o mesmo a chegar à temperatura estipulada. A figura 27 mostra o funcionamento do CLP e chegada a temperatura estipulada.

Figura 27: Funcionamento do CLP



Fonte: Própria

Ao final do processo de verificação e limpeza do equipamento foi constatado o quanto de incrustações foi retirado do trocador de calor. As impurezas da tubulação do fluido quente ficaram retidas no tanque termostático, como mostra a figura 28, enquanto as impurezas da tubulação do fluido frio foram retiradas do sistema para a rede de esgoto e não foi possível visualizá-las.

Figura 28: Incrustações Retiradas da Tubulação do Fluido Quente



Fonte: Própria

Entretanto à medida que os experimentos ocorriam mais incrustações eram retiradas do sistema, a figura 29 mostra as impurezas retiradas do sistema ao final da realização de todos os experimentos.

Figura 29: Incrustações Retiradas ao Final dos Experimentos da Tubulação do Fluido Quente



Fonte: Própria

A figura 30 mostra o sistema de troca térmica em condições para a realização dos experimentos.

Figura 30: Sistema de Troca Térmica Pronto para a Realização dos Experimentos



Fonte: Própria

## 4.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram iniciados a partir do acionamento do equipamento com a liberação dos fluidos por meio das válvulas e o acionamento das bombas.

Cada experimento durou 14 minutos com as temperaturas de entrada e saída do fluido quente ( $T_{q,entrada}$  e  $T_{q,saída}$ ) e do fluido frio ( $T_{f,entrada}$  e  $T_{f,saída}$ ) sendo anotadas a cada 2 minutos, com a vazão volumétrica do quente ( $V_q$ ) variando de 100 a 600 L/h e a do frio ( $V_f$ ) variando de 100 a 500 L/h. A sequência dos experimentos se encontra no Apêndice A deste trabalho.

Primeiro passo para a obtenção dos valores do equipamento foi calcular o diâmetro hidráulico ou diâmetro efetivo para o trocador de calor, este cálculo é importante pelo fato de levar em conta as regiões anulares do trocador de calor e ser utilizado para o cálculo de  $Re_D$  e  $Nu_D$ . (INCROPERA, 2013)

O resultado do cálculo do diâmetro hidráulico foi de 0,02396m, o mesmo valor apresentado no trabalho de DE OLIVEIRA, 2011.

Já o cálculo da área de troca térmica se deu a partir do valor do diâmetro efetivo calculando-se a área do cilindro e multiplicado por 4, que é número de seções presentes no equipamento, multiplicado por 1,38m, comprimento do tubo. Logo o valor da área de troca térmica é 0,4155 m<sup>2</sup>.

Foram montadas tabelas na ferramenta computacional Excel a partir das vazões volumétricas e temperaturas anotadas foram calculadas as vazões mássicas ( $V_m$ ), capacidades caloríficas ( $C$ ), taxas de calor ( $q$ ), média logarítmica da temperatura (MLDT), coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), eficiência ( $\epsilon$ ), número de unidades de transferência (NUT). Os números adimensionais também foram calculados, tanto para o escoamento concorrente e contracorrente.

A tabela completa dos experimentos encontra-se no Apêndice B para o escoamento concorrente e no Apêndice C para o escoamento contracorrente.

A partir dessas tabelas, foram tiradas médias aritméticas dos valores dentro de cada experimento e foram distribuídas nas tabelas 2 e 3

Tabela 2: Tabela das Médias dos Experimentos Concorrente

Experimento no	$T_{b, conc}(^{\circ}C)$	$T_{c, conc}(^{\circ}C)$	$T_{h, conc}(^{\circ}C)$	$T_{e, conc}(^{\circ}C)$	$V_f(L/h)$	$V_g(L/h)$	$V_{in}(kg/s)$	$V_{out}(kg/s)$	$Q(T/W)$	$Q_g(W/m)$	$Q_{in}(W/M)$	$q_f(W)$	$q_g(W)$	$q_{amb}(W)$	$q_{in}(W)$	$ATI(^{\circ}C)$	$ATI_2(^{\circ}C)$	$MDDT(^{\circ}C)$	$L(V_{in}/h)$	$\epsilon$	N.T.
1	51,3	28,8	41,9	39,6	100	100	0,0278	0,0278	116,1667	116,1694	116,1694	1254,6000	1081,8026	-172,7972	2068,0040	22,4800	2,33750	8,88738	1078,17710	0,52084	0,00635
2	50,4	30,9	43,2	40,8	100	200	0,0278	0,0556	116,1667	232,3389	232,3389	1151,8026	1678,10417	534,2026	4533,5127	19,51250	2,38750	8,14842	1081,46702	0,49289	0,00855
3	55,2	32,6	48,4	45,8	100	300	0,0278	0,0833	116,1667	348,5083	348,5083	1534,30147	2348,01875	811,17458	7880,6460	22,61250	2,63800	9,30792	2429,99636	0,43549	0,00778
4	54,8	32,9	49,4	46,8	100	400	0,0278	0,1111	116,1667	464,6778	464,6778	1613,36458	2548,8883	936,4975	10188,8028	21,92500	2,58000	9,00236	2728,78444	0,46656	0,00402
5	54,1	33,1	49,5	47,0	100	500	0,0278	0,1389	116,1667	580,8472	580,8472	1697,48625	2679,0975	1071,63750	12176,0090	20,96250	2,51250	8,69657	2988,30910	0,3990	0,00350
6	54,0	33,3	50,0	47,4	100	600	0,0278	0,1667	116,1667	697,0167	697,0167	1643,78333	2761,86250	1118,10417	14434,98771	20,71250	2,46000	8,72747	3048,64452	0,31683	0,00300
7	54,7	32,7	42,5	40,7	200	100	0,0556	0,0278	232,3333	116,1694	232,3333	1841,24167	1421,58958	-419,65208	5111,3333	22,00000	1,83750	8,09916	1780,42340	0,63860	0,01004
8	58,4	33,1	47,1	44,4	200	200	0,0556	0,0556	232,3333	232,3389	232,3389	2631,17500	2564,37917	-66,79583	5814,28069	25,02500	2,66250	9,97996	2476,33682	0,54783	0,00721
9	57,2	33,2	48,0	45,2	200	300	0,0556	0,0833	232,3333	348,5083	348,5083	2799,61667	3227,98125	428,36458	8377,2696	24,03750	2,72500	9,78856	3178,33262	0,48971	0,00625
10	55,1	33,9	48,0	45,2	200	400	0,0556	0,1111	232,3333	464,6778	464,6778	2634,88333	3310,75000	673,76667	9868,59431	21,23750	2,76250	9,94356	3531,72442	0,46315	0,00521
11	53,5	33,8	47,8	45,3	200	500	0,0556	0,1389	232,3333	580,8472	580,8472	2674,73750	3259,92708	585,18958	11420,90851	19,66250	2,53750	8,36305	3785,68928	0,41447	0,00443
12	51,9	34,0	47,1	44,7	200	600	0,0556	0,1667	232,3333	697,0167	697,0167	2497,88333	3354,1250	856,22917	12494,02375	17,92500	2,36250	7,67925	4208,46666	0,40032	0,00414
13	51,3	33,9	40,1	38,5	300	100	0,0833	0,0278	348,5000	116,1694	348,5000	1598,74375	1306,87500	-291,86875	6068,28625	17,41250	1,57500	6,58925	1910,64752	0,73649	0,01128
14	53,1	33,8	43,1	41,0	300	200	0,0833	0,0556	348,5000	232,3389	348,5000	2590,20000	2336,37500	-253,82500	6221,69375	19,28750	2,07500	7,72013	2094,56579	0,62692	0,00857
15	53,2	33,7	44,2	41,9	300	300	0,0833	0,0833	348,5000	348,5083	348,5083	2862,0625	3110,36250	248,30625	6783,84344	19,46250	2,32500	8,06535	3752,56755	0,47802	0,00721
16	51,8	33,1	44,3	41,8	300	400	0,0833	0,1111	348,5000	464,6778	464,6778	3045,01875	3508,23333	463,21458	8712,70833	18,79000	2,46250	8,02311	4212,28195	0,53395	0,00522
17	50,0	32,0	43,7	41,2	300	500	0,0833	0,1389	348,5000	580,8472	580,8472	3197,48750	3666,51042	469,02292	10484,32926	18,04900	2,56250	7,93320	4452,04751	0,49163	0,00526
18	48,1	31,5	42,8	40,3	300	600	0,0833	0,1667	348,5000	697,0167	697,0167	3049,37500	3727,66250	688,28750	11579,18938	16,61250	2,50000	7,45092	4835,75259	0,47318	0,00476
19	50,7	33,1	37,9	37,1	400	100	0,1111	0,0278	464,6667	116,1694	464,6667	1818,00833	1489,83750	-328,17083	8178,1333	17,60000	0,86250	5,35774	2860,51153	0,77789	0,01688
20	51,4	34,0	40,1	39,2	400	200	0,1111	0,0556	464,6667	232,3389	464,6667	2422,07500	2467,94167	185,86667	8044,54167	17,21250	0,87500	5,33398	4086,62187	0,69917	0,01445
21	49,9	33,7	41,2	39,4	400	300	0,1111	0,0833	464,6667	348,5083	464,6667	2648,60000	3022,23750	374,62750	7545,02500	16,23750	1,86250	6,62546	4408,61988	0,48882	0,00867
22	58,3	32,0	45,8	43,0	400	400	0,1111	0,1111	464,6667	464,6778	464,6778	5105,52500	5785,10000	679,57500	12313,0014	26,26250	2,82500	10,42155	5415,30055	0,58208	0,00799
23	50,3	32,0	43,0	40,2	400	500	0,1111	0,1389	464,6667	580,8472	580,8472	3792,84167	4202,78125	410,93958	10604,46181	18,28000	2,85000	8,23983	4926,56514	0,53274	0,00852
24	45,2	32,4	40,0	38,4	400	600	0,1111	0,1667	464,6667	697,0167	697,0167	2799,61667	3629,25000	829,6333	8912,10063	12,78750	1,51250	5,27566	6694,48730	0,52894	0,00659
25	47,4	30,9	36,2	34,1	500	100	0,1389	0,0278	580,8333	116,1694	580,8333	1851,40625	1389,87500	-464,53125	9612,79167	16,58000	2,11250	7,01209	1818,81807	0,81170	0,01074
26	48,9	31,3	38,8	36,2	500	200	0,1389	0,0556	580,8333	232,3389	580,8333	2875,12500	2346,62500	-528,50000	10237,18750	17,62500	2,58750	7,83737	2881,11996	0,71902	0,00850
27	48,2	31,2	39,8	36,9	500	300	0,1389	0,0833	580,8333	348,5083	580,8333	3333,53125	2925,43750	-378,09375	9085,94792	17,03750	2,82500	7,99917	3597,89258	0,62625	0,00706
28	48,1	31,1	40,3	37,3	500	400	0,1389	0,1111	580,8333	464,6778	580,8333	3557,0417	3624,10000	66,79583	9877,86488	16,93750	3,01250	8,06405	4330,56442	0,63831	0,00639
29	48,1	31,0	41,2	37,9	500	500	0,1389	0,1389	580,8333	580,8472	580,8472	3992,22917	4015,01042	21,78125	9917,96632	17,07500	3,28750	8,36870	4621,91989	0,59740	0,00546
30	45,6	31,2	40,4	37,5	500	600	0,1389	0,1667	580,8333	697,0167	697,0167	3659,25000	3606,97500	-52,27500	10019,61458	14,37500	2,90000	7,16820	4847,23677	0,56184	0,00477

Fonte: Própria

Tabela 3: Tabela das Médias dos Experimentos Contracorrente

Experimento	$T_{B, entrada} (^\circ C)$	$T_{B, entrada} (^\circ C)$	$T_{B, saída} (^\circ C)$	$T_{B, saída} (^\circ C)$	$V_f (L/h)$	$V_d (L/h)$	$V_m (kg/s)$	$V_{m,q} (kg/s)$	$CF (W/m)$	$C_q (W/m)$	$C_{m,q} (W/M)$	$q_f (W)$	$q_q (W)$	$q_{m,b} (W)$	$q_{m,q} (W)$	$ATI (^\circ C)$	$ATE_2 (^\circ C)$	$MHTI (^\circ C)$	$U (W/m^2 \cdot h)$	$\epsilon$	NIT
1	50,6	29,9	42,3	41,9	100	100	0,0278	0,02778	116,16667	116,18333	116,18333	139,82625	99,82708	-4,82917	240,78958	8,68750	12,46250	10,44441	794,72140	0,41651	0,00469
2	50,2	31,3	44,1	43,2	100	200	0,0278	0,02778	116,16667	232,36667	232,36667	139,25472	142,94883	33,9792	441,26708	7,00000	12,85000	9,61973	142,66232	0,37600	0,00420
3	48,7	31,2	44,6	43,6	100	300	0,0278	0,02778	116,16667	348,50000	348,50000	143,20625	142,11370	-13,08975	608,65438	5,12500	13,38750	8,60278	159,35134	0,29333	0,00313
4	48,0	30,8	45,1	43,7	100	400	0,0278	0,02778	116,16667	464,73333	464,73333	149,274167	137,76667	-121,97500	799,34133	4,35000	14,25000	8,33995	158,66184	0,25263	0,00233
5	47,5	31,3	45,5	43,9	100	500	0,0278	0,02778	116,16667	580,91667	580,91667	148,729167	114,14883	-310,74833	93,672125	3,57500	14,15000	7,68483	143,36253	0,21257	0,00169
6	47,5	32,1	45,9	44,3	100	600	0,0278	0,02778	116,16667	697,10000	697,10000	141,528125	112,91250	-291,86875	107,001900	3,26250	13,83750	7,31828	147,89216	0,21113	0,00145
7	48,4	30,8	38,8	38,7	200	100	0,0556	0,02778	232,33333	116,18333	232,33333	181,124167	110,55625	-721,68542	410,38750	9,73750	8,02500	8,85302	121,72299	0,25108	0,00719
8	49,5	31,5	42,1	41,6	200	200	0,0556	0,05556	232,33333	232,36667	232,36667	234,927083	172,217083	-627,30000	419,131375	7,92500	10,62500	9,20554	180,63099	0,43906	0,00532
9	48,7	31,7	42,9	42,0	200	300	0,0556	0,05533	232,33333	348,50000	348,50000	240,75417	202,66625	-381,89792	593,824063	6,67500	11,22500	8,75366	220,18741	0,29182	0,00439
10	48,5	31,7	44,0	42,6	200	400	0,0556	0,0556	232,33333	464,73333	464,73333	254,629417	208,819167	-461,76250	783,075667	5,88750	12,36250	8,71263	230,55529	0,25004	0,00340
11	47,9	31,7	44,2	42,8	200	500	0,0556	0,05556	232,33333	580,91667	580,91667	258,761250	212,78125	-474,83125	941,058000	5,06250	12,86250	8,25180	246,36631	0,21252	0,00291
12	47,2	31,5	44,2	42,6	200	600	0,0556	0,0556	232,33333	697,10000	697,10000	257,820000	208,72500	-540,17500	1092,57625	4,58750	12,76250	7,98967	248,84081	0,29240	0,00242
13	52,2	30,7	38,0	37,2	300	100	0,08333	0,02778	348,50000	116,18333	348,50000	226,09375	168,66250	-614,23125	749,71025	15,02500	7,33750	10,71719	188,62310	0,69965	0,00876
14	51,1	31,9	42,4	40,4	300	200	0,08333	0,05556	348,50000	232,36667	348,50000	292,250000	202,710833	-925,14167	669,55625	10,71250	10,48750	10,52572	193,27282	0,25704	0,00570
15	48,9	32,1	41,5	40,3	300	300	0,08333	0,08333	348,50000	348,50000	348,50000	286,641250	260,68125	-265,73125	897,42438	8,62750	9,40000	9,01286	277,87808	0,21213	0,00547
16	47,4	32,1	41,7	40,2	300	400	0,08333	0,11111	348,50000	464,73333	464,73333	284,027500	262,53667	-214,00833	710,61083	7,13750	9,63750	8,32487	303,25918	0,26681	0,00448
17	46,6	32,2	42,4	40,5	300	500	0,08333	0,13889	348,50000	580,91667	580,91667	289,250000	247,80208	-16,74792	839,424833	6,15000	10,18750	7,99885	298,24697	0,22583	0,00353
18	45,5	32,1	41,9	40,1	300	600	0,08333	0,16667	348,50000	697,10000	697,10000	278,564375	251,91250	-265,73125	928,86750	5,43750	9,81250	7,41061	327,24936	0,40499	0,00322
19	47,1	32,1	36,2	35,8	400	100	0,11111	0,02778	464,66667	116,18333	464,66667	160,125000	126,47648	-425,40412	694,419167	11,35000	4,10000	7,12000	1710,6379	0,25772	0,01010
20	49,6	32,6	39,2	38,6	400	200	0,11111	0,05556	464,66667	232,36667	464,66667	277,638333	240,65000	-371,73333	788,72167	11,00000	6,62500	8,62812	268,46028	0,64802	0,00792
21	49,0	32,9	40,9	39,8	400	300	0,11111	0,08333	464,66667	348,50000	464,66667	320,620000	285,34375	-352,88625	751,538333	9,27500	7,98750	8,61520	318,94692	0,27353	0,00628
22	47,2	32,9	40,9	39,6	400	400	0,11111	0,11111	464,66667	464,73333	464,73333	312,208333	294,82500	-197,48333	667,473250	7,60000	8,02500	7,81041	363,14830	0,25915	0,00536
23	46,1	32,5	40,9	39,4	400	500	0,11111	0,13889	464,66667	580,91667	580,91667	323,625000	301,52022	-210,55208	791,438958	6,68750	8,43750	7,52852	385,84536	0,49080	0,00455
24	44,1	32,0	40,2	38,5	400	600	0,11111	0,16667	464,66667	697,10000	697,10000	305,618333	271,830000	-350,38333	848,976500	5,57500	8,25000	6,82522	388,67563	0,45885	0,00377
25	45,6	30,5	36,1	35,1	500	200	0,13889	0,05556	580,83333	232,36667	580,83333	270,815542	220,42620	-402,87292	877,784375	10,45000	5,62500	7,78991	272,15406	0,76808	0,00804
26	46,5	30,6	38,1	36,7	500	300	0,13889	0,08333	580,83333	348,50000	580,83333	351,083333	229,618125	-293,20208	927,78958	9,78750	7,42500	8,55136	323,22977	0,69148	0,00653
27	46,5	30,6	38,1	36,7	500	400	0,13889	0,08333	580,83333	464,73333	580,83333	351,083333	229,618125	-293,20208	927,78958	9,78750	7,42500	8,55136	323,22977	0,69148	0,00653
28	44,7	31,1	38,5	37,0	500	400	0,13889	0,11111	580,83333	464,73333	580,83333	338,35417	291,578333	-467,57083	789,933333	7,75000	7,25000	7,54727	372,128511	0,27196	0,00549
29	43,9	31,2	38,6	37,0	500	500	0,13889	0,13889	580,83333	580,91667	580,91667	338,35417	307,41667	-304,93750	736,311875	6,85000	7,37500	7,10913	417,67766	0,24031	0,00492
30	43,8	31,2	38,8	37,2	500	600	0,13889	0,16667	580,83333	697,10000	697,10000	345,528333	348,015000	-5,98833	879,9125	6,58750	7,58750	7,07558	469,384127	0,22556	0,00462

Fonte: Própria

A partir dos dados obtidos nas tabelas 3 e 4 também foram possíveis calcular os dados para os números adimensionais Reynolds, Nusselt e Prandtl. As tabelas 4 e 5 mostram estes dados, já as tabelas de apoio se encontram na seção de Apêndice D e E.

Tabela 4: Tabela de Dados para os Números Adimensionais Concorrente

Experiment	VF (L/h)	VO (L/h)	Vmf (kg/h)	Vmq (kg/h)	MIDT (°C)	Reynolds <sub>f</sub>	Reynolds <sub>q</sub>	Prandtl <sub>f</sub>	Prandtl <sub>q</sub>	h <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> ·K)	h <sub>q</sub> (W/m <sup>2</sup> ·K)	Nusselt <sub>f</sub>	Nusselt <sub>q</sub>	h <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> ·K)	h <sub>q</sub> (W/m <sup>2</sup> ·K)	Q <sub>(Kcal)</sub>	ε	NTU	
1	100	100	0,22778	0,22778	8,88728	2024,222438	3414,54566	4,36625	3,4719	0,6313	0,6444	15,80401	22,41632	997,707244	914,245398	477,07733	1720,58	0,6597299	0,002816
	VF=100 L/h	Vq=200 L/h																	
2	100	100	0,22778	0,22778	8,14842	2338,23821	6767,1214	4,2568	3,5303	0,63204	0,63982	17,60201	38,94888	1112,52189	1577,22569	652,36705	2157,14	0,4758202	0,001925
	VF=100 L/h	Vq=300 L/h																	
3	100	100	0,22778	0,22778	9,30792	2583,91952	10901,3023	3,8539	3,24418	0,63871	0,64831	18,50629	55,95978	1182,01552	2281,23031	778,59031	2940,86	0,3731745	0,001532
	VF=100 L/h	Vq=400 L/h																	
4	100	100	0,22778	0,22778	9,00326	2631,58547	14663,9065	3,7747	3,259	0,63992	0,64798	18,66236	69,80263	1194,24171	2862,70854	842,69358	3078,8	0,3021969	0,002143
	VF=100 L/h	Vq=500 L/h																	
5	100	100	0,22778	0,22778	8,69657	2638,67395	17879,5046	3,7622	3,29918	0,64011	0,64724	18,63891	83,01065	1195,97787	3400,48147	884,78985	3122,48	0,2564455	0,001044
	VF=100 L/h	Vq=600 L/h																	
6	100	100	0,22778	0,22778	8,27247	2596,21009	21427,9066	3,72886	3,3039	0,64059	0,64715	18,33985	95,98861	1178,28696	3931,58409	906,58536	3210,77	0,2222993	0,000892
	VF=200 L/h	Vq=100 L/h																	
7	100	100	0,22778	0,22778	8,09906	4715,11521	3611,33167	4,2742	3,26475	0,63256	0,64785	30,88706	23,0153	1953,79436	943,702119	636,3424	2091,4	0,4091695	0,001878
	VF=200 L/h	Vq=200 L/h																	
8	100	100	0,22778	0,22778	9,97996	5206,06971	6626,06917	3,9592	3,08115	0,63886	0,65133	32,67506	36,75754	2087,48303	1515,26569	877,96615	3555,65	0,6115366	0,002591
	VF=200 L/h	Vq=300 L/h																	
9	100	100	0,22778	0,22778	9,78856	5117,99837	9819,03639	3,8958	3,12975	0,63812	0,65049	32,07641	50,58664	2082,66874	1032,3034	4100,51	0,4899408	0,002031	
	VF=200 L/h	Vq=400 L/h																	
10	100	100	0,22778	0,22778	9,04356	5105,47001	14523,6469	3,9016	3,24415	0,63798	0,64826	32,02802	69,93888	2043,30754	2869,51359	1193,4688	4379,88	0,4438205	0,001761
	VF=200 L/h	Vq=500 L/h																	
11	100	100	0,22778	0,22778	8,26305	5122,31676	15511,7225	3,8909	3,33386	0,65841	0,64660	32,08603	74,3259	1791,70344	3041,7168	1127,5358	3826,55	0,3359476	0,001331
	VF=200 L/h	Vq=600 L/h																	
12	100	100	0,22778	0,22778	7,67935	5425,71125	21142,8262	3,9348	3,41883	0,63747	0,64506	33,71081	95,94477	2148,94596	3917,11243	1387,666	4324,36	0,3461142	0,001365
	VF=300 L/h	Vq=100 L/h																	
13	100	100	0,22778	0,22778	6,89925	6788,04216	3428,06303	4,4093	3,4571	0,63150	0,64446	41,8983	22,45849	2665,85672	916,053887	680,46271	1819,5	0,2998394	0,001339
	VF=300 L/h	Vq=200 L/h																	
14	100	100	0,22778	0,22778	7,22013	7294,95336	7048,03818	4,2382	3,35368	0,63298	0,64624	43,68178	39,61309	2764,96905	1620,21928	1021,5881	3200,46	0,4761389	0,002201
	VF=300 L/h	Vq=300 L/h																	
15	100	100	0,22778	0,22778	8,06535	7228,31818	10583,2234	4,1556	3,34913	0,63407	0,64684	43,15458	54,81528	2736,3026	2244,08715	1232,9359	4035,3	0,5949274	0,002266
	VF=300 L/h	Vq=400 L/h																	
16	100	100	0,22778	0,22778	8,02311	7226,35824	13832,5533	4,1658	3,42455	0,63395	0,64498	43,17704	68,36452	2737,20866	2790,72193	1381,8531	4499,01	0,5163733	0,002039
	VF=300 L/h	Vq=500 L/h																	
17	100	100	0,22778	0,22778	7,93320	6267,05606	16766,6052	4,2233	3,51313	0,63318	0,64319	38,64341	80,35114	2466,80408	3270,93969	1399,7389	4506,17	0,4229801	0,001652
	VF=300 L/h	Vq=600 L/h																	
18	100	100	0,22778	0,22778	7,45092	5265,26518	19456,4984	4,3061	3,66825	0,63210	0,64128	33,81332	91,689	2137,32276	3721,38396	1357,6031	4104,82	0,3545002	0,001336
	VF=400 L/h	Vq=100 L/h																	
19	100	100	0,22778	0,22778	5,55274	9093,52254	3419,16469	4,4652	3,41413	0,62813	0,64388	52,92552	22,32789	3324,39719	909,896832	714,37138	1551,72	0,1897396	0,001054
	VF=400 L/h	Vq=200 L/h																	
20	100	100	0,22778	0,22778	5,33398	9101,51667	6940,67335	4,3325	3,41035	0,63162	0,64572	52,48563	39,32682	3315,0843	1607,23166	1082,4893	2342,97	0,2912499	0,001597
	VF=400 L/h	Vq=300 L/h																	
21	100	100	0,22778	0,22778	6,62546	9191,14263	10035,791	4,3575	3,55563	0,63162	0,64306	52,99	53,48647	3346,96094	2176,90765	1319,0076	3546,3	0,4700182	0,001946
	VF=400 L/h	Vq=400 L/h																	
22	100	100	0,22778	0,22778	10,42155	9843,01568	13940,0364	4,08161	3,0744	0,63535	0,64478	54,88831	66,59889	3487,32853	2759,9641	1540,6516	6515,51	0,533901	0,002273
	VF=400 L/h	Vq=500 L/h																	
23	100	100	0,22778	0,22778	8,28983	9353,3	16829,2	4,2942	3,54577	0,63179	0,64338	53,50134	80,75347	3380,14127	3288,28252	1666,7896	5607,1	0,5289487	0,001968
	VF=400 L/h	Vq=600 L/h																	
24	100	100	0,22778	0,22778	5,27566	9042,06887	18488,6896	4,6964	3,89969	0,62991	0,63802	53,48988	89,64544	3369,35417	3619,9735	1745,0853	3735,99	0,4191569	0,001717
	VF=500 L/h	Vq=100 L/h																	
25	100	100	0,22778	0,22778	7,01209	9042,06887	18488,6896	4,6964	3,89969	0,62991	0,63802	53,48988	89,64544	3369,35417	3619,9735	1745,0853	3965,65	0,5166609	0,002306
	VF=500 L/h	Vq=200 L/h																	
26	100	100	0,22778	0,22778	7,83737	10382,4558	3271,36357	4,9348	3,6468	0,62352	0,64175	60,67538	21,89287	3783,23151	892,878509	722,38807	2297,49	0,2242455	0,000853
	VF=500 L/h	Vq=300 L/h																	
27	100	100	0,22778	0,22778	7,90917	10676,8638	6570,64719	4,6954	3,62825	0,62696	0,64227	61,09198	38,3463	3850,22304	1558,76514	1107,8922	3555,83	0,3593215	0,001308
	VF=500 L/h	Vq=400 L/h																	
28	100	100	0,22778	0,22778	8,06405	10993,2949	9746,93955	4,6136	3,72338	0,62808	0,64138	62,20721	52,98328	3907,12587	2150,76898	1387,1692	4539,36	0,4614171	0,001638
	VF=500 L/h	Vq=500 L/h																	
29	100	100	0,22778	0,22778	8,36870	11102,3	14187,7	4,5234	3,68518	0,62926	0,64121	62,33014	71,31737	3922,18624	2894,27223	1665,3626	5655,6	0,5702383	0,001966
	VF=500 L/h	Vq=600 L/h																	
30	100	100	0,22778	0,22778	7,16820	11099,2	18546,0442	4,5097	3,2795	0,62947	0,64519	62,25934	85,32399	3919,03861	3484,17546	1844,4176	5365,15	0,5354645	0,001814
	VF=500 L/h	Vq=700 L/h																	

Fonte: Própria

Tabela 5: Tabela de Dados para os Números Adimensionais Contracorrente

Experimento	Vf (L/h)	Vg (L/h)	Vm <sub>f</sub> (kg/h)	Vm <sub>g</sub> (kg/h)	Vm <sub>aq</sub> (kg/h)	MDDP (°C)	Re <sub>ynolds</sub> f	Re <sub>ynolds</sub> g	Prandtl <sub>f</sub>	Prandtl <sub>g</sub>	k <sub>f</sub> (W/m.k)	k <sub>g</sub> (W/m.k)	Nusselt <sub>f</sub>	Nusselt <sub>g</sub>	h <sub>f</sub> (W/m <sup>2</sup> .k)	h <sub>g</sub> (W/m <sup>2</sup> .k)	U (W/m <sup>2</sup> .k)	Q (kcal)	e	NTU
1	100	100	0,02778	0,02778	0,02778	10,44441	1073,65812	5630,5383	4,1561	3,5075	0,63406	0,64375	9,376191	33,54803	594,506765	1366,87005	414,30769	1755,978	0,72925704	0,0024451
	Vf = 100 L/h e Vg = 200 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	200	0,02778	0,05556	0,05556	9,61973	1097,54687	8386,2922	4,0547	3,5355	0,63562	0,64335	9,4722666	46,25078	602,076211	1883,25573	456,22215	1780,949	0,40365455	0,0013462
	Vf = 100 L/h e Vg = 300 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
3	100	300	0,02778	0,08333	0,08333	8,60278	1105,11784	10912,771	4,0235	3,6335	0,63610	0,64195	9,5025669	57,56698	604,451286	2338,93171	480,32155	1,676,807	0,27549357	0,0009449
	Vf = 100 L/h e Vg = 400 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
4	100	400	0,02778	0,11111	0,11111	8,33995	1107,02732	13456,181	4,0157	3,7595	0,63622	0,64115	9,5100519	68,77084	605,048521	2790,65963	497,24075	1,682,837	0,21082798	0,0007356
	Vf = 100 L/h e Vg = 500 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
5	100	500	0,02778	0,13889	0,13889	7,68483	1110,86662	16011,925	4,0001	3,2745	0,63646	0,64065	9,5253291	75,8274	606,247188	3074,60915	506,3966	1,579,201	0,16858689	0,0005977
	Vf = 100 L/h e Vg = 600 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
6	100	600	0,02778	0,16667	0,16667	7,31828	2,628,95899	2,668,6542	3,3059	3,2745	0,64714	0,64065	17,920156	18,08444	1159,68497	733,278439	449,2279	1,334,098	0,12386942	0,0004419
	Vf = 200 L/h e Vg = 100 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
7	200	100	0,05556	0,02778	0,02778	8,83302	2019,18095	5419,1709	4,4498	3,7315	0,62296	0,64155	15,662447	33,14661	988,16078	1345,59931	569,80955	2,047,071	0,49884924	0,0016816
	Vf = 200 L/h e Vg = 200 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
8	200	200	0,05556	0,05556	0,05556	9,20554	2134,90701	8284,179	4,1830	3,5845	0,63370	0,64265	16,280861	45,98921	1031,71815	1870,56764	664,95815	2,484,023	0,59265982	0,0019622
	Vf = 200 L/h e Vg = 300 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
9	200	300	0,05556	0,08333	0,08333	8,75266	2143,18457	10894,066	4,1560	3,6405	0,63414	0,64185	16,299645	57,52123	1033,62572	2336,70886	716,62985	2,545,346	0,42862335	0,0014098
	Vf = 200 L/h e Vg = 400 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
10	200	400	0,05556	0,11111	0,11111	8,71263	2172,77481	13571,065	4,1015	3,6545	0,63490	0,64165	16,414302	68,65424	1042,14405	2788,10079	758,59449	2,682,074	0,34250514	0,0011922
	Vf = 200 L/h e Vg = 500 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
11	200	500	0,05556	0,13889	0,13889	8,25180	2102,07233	16120,131	4,0859	3,6965	0,63280	0,64105	15,673329	79,00666	1010,41259	3207,70719	768,37736	2,572,973	0,27340498	0,0009069
	Vf = 200 L/h e Vg = 600 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
12	200	600	0,05556	0,16667	0,16667	7,99867	3,259,16222	3,034,6401	4,1015	3,2391	0,63490	0,64835	22,702637	19,97749	1441,45391	819,772472	522,57671	1,694,302	0,15493233	0,000514
	Vf = 300 L/h e Vg = 100 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
13	300	100	0,08333	0,02778	0,02778	10,71719	2,946,61024	5,787,0556	4,5878	3,4011	0,62842	0,64535	21,658679	33,97659	1361,07469	1387,77164	687,14676	2,298,425	0,39861041	0,001352
	Vf = 300 L/h e Vg = 200 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
14	300	200	0,08333	0,05556	0,05556	10,52572	3128,12326	11361,904	4,2934	3,4725	0,63226	0,64425	22,253792	58,65181	1408,29324	2391,54597	886,35277	3,785,912	0,56543647	0,0017459
	Vf = 300 L/h e Vg = 300 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
15	300	300	0,08333	0,08333	0,08333	9,01286	3122,09506	13664,428	4,3026	3,6965	0,63214	0,64205	22,537922	69,26889	1406,65121	2814,81578	937,98002	3,430,587	0,58368885	0,0018452
	Vf = 300 L/h e Vg = 400 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
16	300	400	0,08333	0,11111	0,11111	8,32487	3116,09053	15985,106	4,3118	3,7315	0,63302	0,64055	22,237899	78,75267	1405,2199	3192,72288	975,75763	3,296,635	0,46397118	0,0014396
	Vf = 200 L/h e Vg = 500 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
17	300	500	0,08333	0,13889	0,13889	7,99865	4178,90038	2,627,4358	4,2842	3,7895	0,63238	0,63970	28,636276	18,66298	1774,66546	755,614454	529,96622	1,720,063	0,20490982	0,0006255
	Vf = 300 L/h e Vg = 600 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
18	300	600	0,08333	0,16667	0,16667	7,41061	4,285,05366	5152,3708	4,1628	3,8753	0,63396	0,63838	28,386282	32,19772	1799,57673	1300,91017	755,07098	2,270,669	0,242,63	0,0007427
	Vf = 400 L/h e Vg = 100 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
19	400	100	0,11111	0,02778	0,02778	7,12000	3,819,85159	7,965,8709	4,7418	3,7455	0,62632	0,64035	26,924522	45,1614	1,686,33664	1,830,3229	877,69104	2,535,908	0,3641353	0,0012951
	Vf = 400 L/h e Vg = 200 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
20	400	200	0,11111	0,05556	0,05556	8,62812	4,030,83663	11,064,814	4,4600	3,5775	0,63010	0,64275	27,595893	57,93714	1738,81721	235,690472	1,000,6115	3,503,431	0,44416286	0,0014765
	Vf = 400 L/h e Vg = 300 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
21	400	300	0,11111	0,08333	0,08333	8,61520	4123,07518	13,687,975	4,3486	3,6195	0,63154	0,64215	27,849506	68,92277	1761,20756	2,801,38735	1,081,5637	3,780,499	0,5029946	0,0015957
	Vf = 400 L/h e Vg = 400 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
22	400	400	0,11111	0,11111	0,11111	7,81041	4107,40372	15,979,102	4,367	3,7391	0,63130	0,63835	27,837915	78,77708	1757,40759	3182,74345	1132,228	3,588,557	0,53763311	0,0016705
	Vf = 400 L/h e Vg = 500 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
23	400	500	0,11111	0,13889	0,13889	7,52852	5114,81682	2,604,0982	4,3854	3,8205	0,63106	0,63910	33,219621	18,57533	2,096,35737	751,279464	553,07272	1,689,678	0,21347819	0,0006528
	Vf = 400 L/h e Vg = 600 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
24	400	600	0,11111	0,16667	0,16667	6,82522	5029,17496	502,67508	4,4682	3,9845	0,62998	0,63670	32,9258316	31,83344	2,076,30799	1,282,76657	792,90246	2,19,6082	0,25928488	0,0007799
	Vf = 500 L/h e Vg = 100 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
25	500	200	0,13889	0,05556	0,05556	7,78981	4,623,25744	7,660,1635	4,9274	3,9143	0,62376	0,63778	31,73288	44,35213	1,979,36888	1,790,3103	940,04936	2,971,594	0,3383352	0,0011097
	Vf = 500 L/h e Vg = 200 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
26	500	300	0,13889	0,08333	0,08333	8,55136	4,707,90547	10,323,18	4,8230	3,8675	0,62520	0,63850	31,985687	56,1058	1,999,74514	2,267,21335	1,062,5701	3,687,629	0,39957449	0,0012544
	Vf = 500 L/h e Vg = 300 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
27	500	300	0,13889	0,08333	0,08333	8,55136	4,864,29496	1,315,265	4,6374	3,7973	0,62776	0,63988	32,540854	67,57592	2,037,13478	2,735,4561	1,167,6033	4,051,749	0,43901771	0,0013763
	Vf = 500 L/h e Vg = 400 L/h												0	0	0	0	0	0	0	0
28	500	400	0,13889	0,11111	0,11111	7,54727	4,892,76794	15,239,438	4,6062	3,9377	0,62818	0,63742	32,536765	77,03382	2,					

Nota-se que nas tabelas 2, 3, 4 e 5 nas quatro últimas colunas da tabela tem os valores de coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), taxa de transferência de calor ( $q$ ), eficiência ( $\epsilon$ ) e número de unidades de transferência (NUT).

#### 4.2.1 Análise do Coeficiente Global de Transferência de Calor

Nas tabelas 2 e 3 os valores de coeficientes globais são obtidos a partir da equação geral dos trocadores de calor, enquanto nas tabelas 4 e 5 os valores são obtidos a partir dos coeficientes de convecção.

Segundo as tabelas 2 e 4, que são referentes ao escoamento concorrente, nota-se que os valores do coeficiente global de transferência de calor variam de 1075 a 6649  $W/m^2.K$  pela equação geral do trocador e 477 a 1844  $W/m^2.K$  pelos números adimensionais.

Segundo as tabelas 3 e 5, que são referentes ao escoamento contracorrente, nota-se que os valores do coeficiente global de transferência de calor variam de 794 a 4697  $W/m^2.K$  pela equação geral do trocador de calor 1334 a 4474  $W/m^2.K$ .

Segundo INCROPERA, 2013 o coeficiente global de transferência de calor da água para água varia de 850 a 1700  $W/m^2.K$ , ou seja, tanto a configuração concorrente como a contra corrente apresentaram valores acima da faixa descrita. Comparada com o trabalhos (realizados no trocador de calor em questão) de DE OLIVEIRA, 2011, onde os valores variam de 530 a 762  $W/m^2.K$  para as duas configurações e DIAS *et al*, 2019 os valores variaram de 670 a 1800  $W/m^2.K$ .

Ao analisar os valores obtidos neste trabalho com o que diz na literatura, os valores apresentam-se mais elevados, uma explicação para isso seria que o coeficiente global de transferência de calor é o inverso do somatório das resistências térmicas, ou seja, quanto menor a resistência térmica do sistema, maior será o valor do coeficiente global, pois o mesmo é a capacidade do sistema trocar calor.(INCROPERA, 2013)

Outro fator a ser analisado é a quantidade de calor que é perdida para o ambiente, pois se analisar a coluna da taxa de calor do ambiente ( $q_{amb}$ ) presentes nas tabelas 3 e 4, nota-se que, por exemplo, na vazão de  $V_f = 400$  L/h e  $V_q = 600$  L/h para a configuração concorrente pela equação geral, o sistema perdeu 859,63 W, sendo que a taxa de calor do

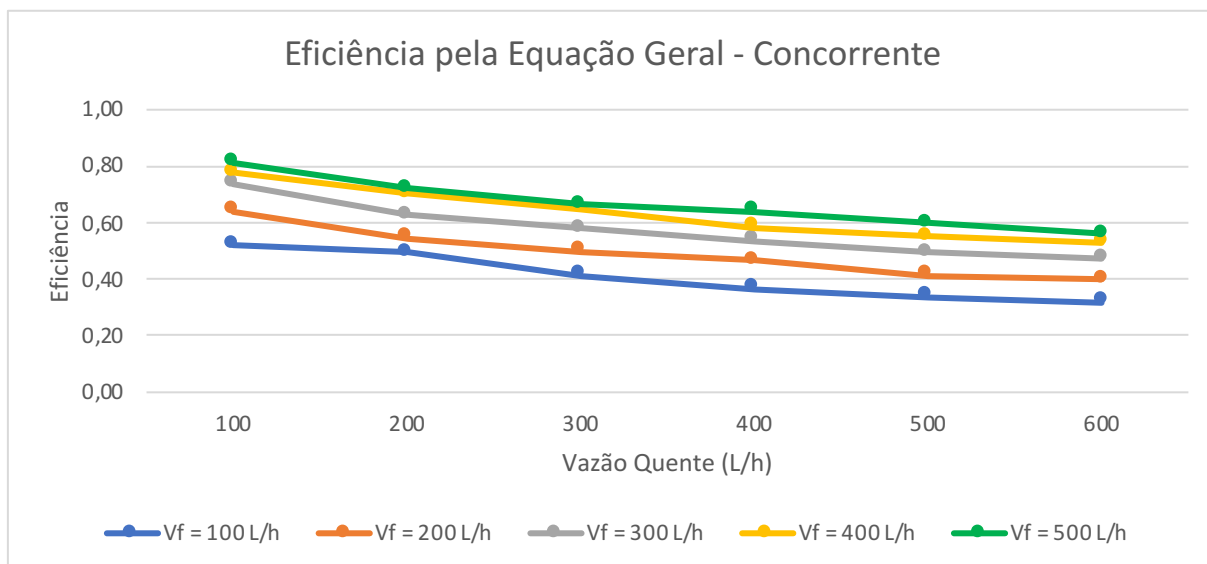
fluido frio é de 2799,62 W (representando 30,7% de perda de calor) se comparado com o fluido quente que é de 3659,25 W.

#### 4.2.2 Análise da Eficiência pelo Método $\epsilon$ -NUT

A análise da eficiência de um equipamento é muito importante, pois ela quem determina se o mesmo está desempenhando a sua função corretamente. (SIGNIFICADOS, 2021)

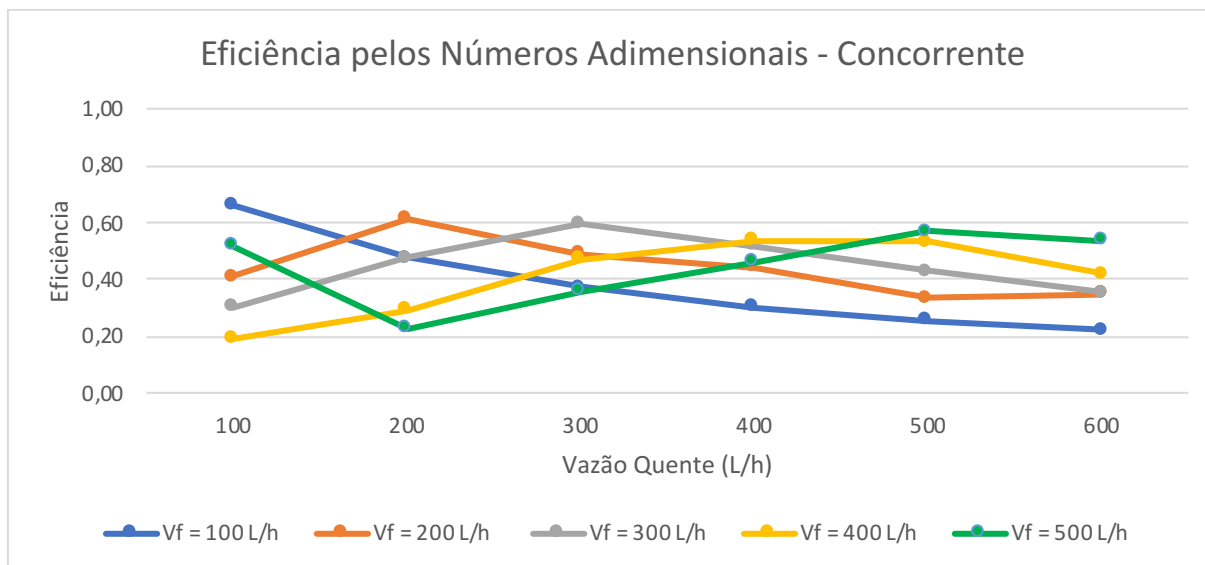
Para o escoamento concorrente nas tabelas 2 e 4 a eficiência é representada por  $\epsilon$  e se encontra na penúltima coluna das tabelas, mas também estão representadas nas figuras 31 e 32 para o escoamento concorrente.

Figura 31: Gráfico da Eficiência pela Equação Geral pelo Escoamento Concorrente



Fonte: Própria

Figura 32: Gráfico da Eficiência pelos Números Adimensionais pelo Escoamento Concorrente



Fonte: Própria

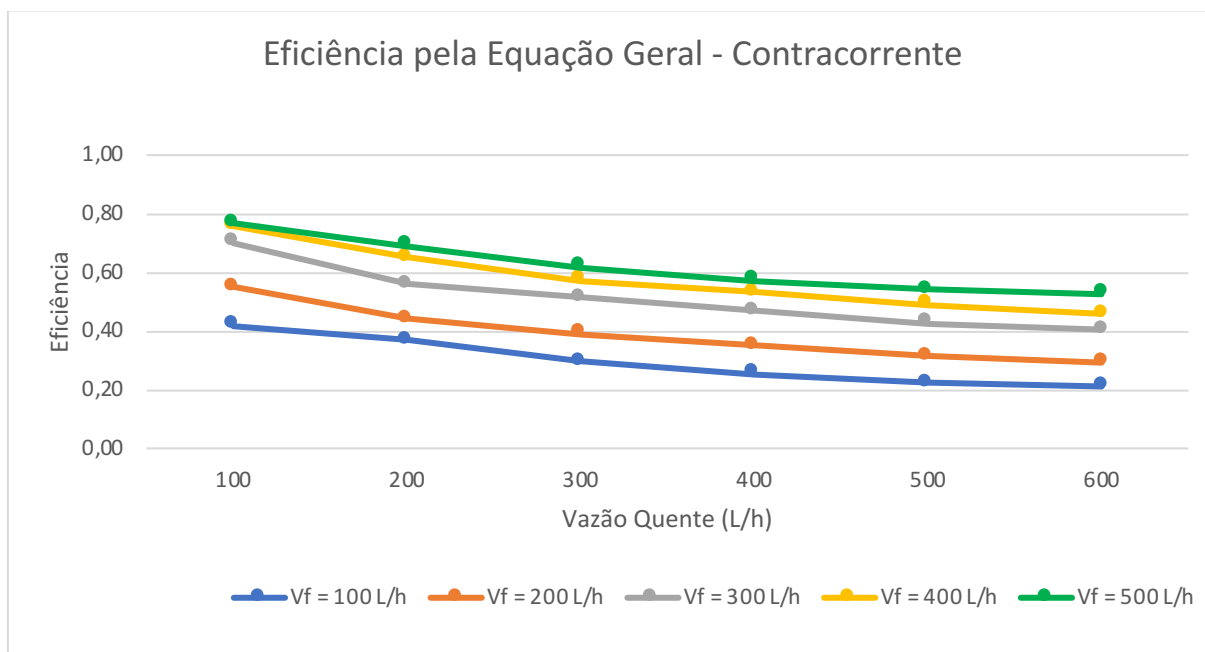
A figura 31 representa o comportamento da eficiência através da equação geral dos trocadores, onde não se leva em conta os coeficientes convectivos e os números adimensionais que analisam o comportamento do escoamento dentro dos tubos. Nota-se que a maior eficiência apresentada neste gráfico se encontra na vazão  $V_f = 500 \text{ L/h}$  e  $V_q = 100 \text{ L/h}$  com valor de 0,81170.

Foi feita uma varredura em todas as vazões possíveis do trocador de calor e notou-se, pelo menos pela figura 31 onde a eficiência aumenta de acordo com o aumento da vazão fria e diminui à medida que a vazão quente aumenta, diferente do comportamento apresentado na figura 32 com a utilização dos números adimensionais onde a maior eficiência se apresentou na vazão  $V_f = 100 \text{ L/h}$  e  $V_q = 100 \text{ L/h}$  com valor de 0,65973.

Comparando-se os valores deste trabalho com os de DE OLIVEIRA, 2019 para o escoamento concorrente, onde a eficiência variava entre 0,4590 e 0,4854, o resultado se mostrou dentro desta faixa para as baixas vazões do fluido frio na figura 31, enquanto no gráfico 2 os valores intermediários do fluido quente e frio que se encontram nesta faixa.

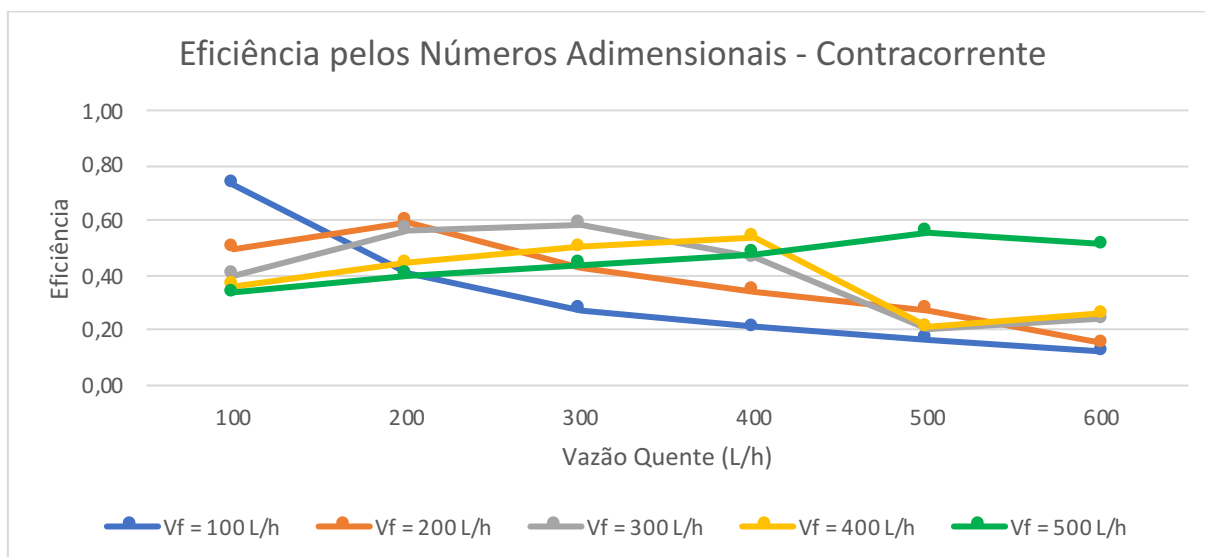
Já para o escoamento contracorrente as tabelas 3 e 5 tem a eficiência representada na penúltima coluna das mesmas, mas os dados também foram dispostos em forma de gráficos como mostram as figuras 33 e 34 a seguir.

Figura 33: Gráfico da Eficiência pela Equação Geral pelo Escoamento Contracorrente



Fonte: Própria

Figura 34: Gráfico da Eficiência pelos Números Adimensionais pelo Escoamento Contracorrente



Fonte: Própria

A figura 33 representa o comportamento da eficiência por meio da equação geral dos trocadores de calores, ou seja, não levando em conta os coeficientes convectivos e os números adimensionais. Tendo em vista isso notou-se que a maior eficiência segundo o gráfico foi na vazão  $V_f = 500$  L/h e  $V_q = 100$  L/h com valor de 0,76808.

De igual modo ao escoamento concorrente foi feita uma varredura em todas as vazões possíveis no trocador de calor e notou-se o mesmo comportamento na figura 33 que na figura 31, onde a eficiência aumenta de acordo com o aumento da vazão fria e diminui à medida que a vazão quente aumenta, diferente do comportamento apresentado na figura 34 onde se leva em conta os números adimensionais e neste caso a maior eficiência apresentada foi na vazão  $V_f = 100\text{L/h}$  e  $V_q = 100\text{ L/h}$  com valor de 0,72926.

Comparando com o trabalho de DE OLIVEIRA, 2011, onde os valores da eficiência para o escoamento contracorrente estão na faixa de 0,5596 a 0,6391, os valores intermediários de vazão quente (200 a 400 L/h) e de vazão fria se mostraram dentro desta faixa.

Outro ponto notado ao olhar os gráficos é que os valores apresentados nas figuras 33 e 34 se mostraram mais consistentes, no sentido de não haver uma diferença tão grande de valores ao comparar a eficiência pela equação geral e pelos números adimensionais, comprovando o que está escrito na literatura que a configuração contracorrente é mais uniforme que a concorrente.

Já analisando os valores de NUT representados pela última coluna das tabelas 2, 3, 4 e 5 notou-se que os seus valores ficaram bem abaixo de 1 enquanto os do trabalho de DE OLIVEIRA, 2011 ficaram acima de 1 para ambas as configurações de escoamentos.

O valor de NUT representa o tamanho da transferência de calor no sistema e por ter dado um valor tão baixo faz-se necessária uma investigação para descobrir o porquê deste resultado ter dado baixo, uma das soluções seria colocar mais termômetros para monitorar o comportamento da troca de calor ao longo do trocador e não só nas pontas como é feito. (KAYS; LONDON, 2018)]

### 4.3 ATUALIZAÇÃO DO ROTEIRO DE PRÁTICA

Foi atualizado o roteiro de prática da disciplina de Operações Unitárias II, baseada no roteiro já proposto por DE OLIVEIRA, 2011 junto com um trabalho de DIAS, 2020 e os dados obtidos neste trabalho de conclusão de curso.

O roteiro de prática encontra-se no APÊNDICE F e foi estruturado em introdução, objetivos, materiais, procedimento e referências

## 5. CONCLUSÕES

Portanto, a partir do que foi apresentado neste trabalho conclui-se que foi possível fazer a análise da eficiência do trocador de calor. No momento em que se foi iniciado os experimentos o equipamento encontrava-se sem uso a aproximadamente 2 anos por conta da pandemia de COVID-19, então todo este trabalho foi um processo de reativação do equipamento.

A limpeza e verificação do trocador de calor se mostrou satisfatório, pois foi possível averiguar se tanto o equipamento como os acessórios como tubulações, bombas centrifugas, termômetros e rotâmetros tinham condições para uso depois de tanto de ociosidade e sim todos estão aptos para a realização de experimentos.

Quanto aos dados obtidos de coeficiente global de transferência de calor notou-se que os valores deram acima do que se diz na literatura, mostrando que o sistema tem pouca resistência térmica, pois o coeficiente global é o inverso do somatório das resistências térmicas, isto também foi notado na taxa de transferência de calor tanto do fluido quente como do fluido frio, pois notou-se uma perda bem elevada para o ambiente podendo ser fruto do isolamento térmico do equipamento.

Em relação a eficiência apresentou-se pouco abaixo e com resultados fora da faixa apresentada pelo trabalho de comparado, pois isso pode ser consequência da ociosidade do sistema e foi refletido no Número de Unidades de Transferências que deu um valor muito abaixo com o trabalho que foi comparado.

Portanto, apesar dos resultados não serem tão bons foi possível fazer uma análise da eficiência e foi possível observar as variáveis fundamentais na transferência de calor, e apesar de não ter uma eficiência alta o equipamento ainda cumpre a sua função de ser um trocador de calor em escala laboratorial para que os alunos tenham contato e saibam como é o funcionamento de um equipamento tão importante para a troca de calor, tendo em vista disto que neste trabalho também foi feita a atualização do roteiro de aula prática da disciplina de operações unitárias II do curso de engenharia química.

## 6. PERSPECTIVAS

Como engenheiro químico, tem como objetivo otimizar o processo com intuito que tenha a maior eficiência possível com o menor custo.

Como este trabalho de conclusão de curso que trabalha com um trocador de calor de tubos concêntricos as perspectivas para trabalhos futuros é melhorar a troca de calor entre os fluidos e consequentemente melhorar a eficiência.

A primeira perspectiva seria melhorar a limpeza do trocador de calor, pois neste trabalho foi realizada apenas a passagem de água, para um próximo trabalho poderia se abrir o equipamento e fazer uma limpeza manual com a passagem de uma escova para tirar as incrustações nas partes internas das tubulações, ou também pesquisar e verificar fluidos que possam ser utilizados para a retirada destas incrustações.

A segunda perspectiva seria em relação a evitar a ociosidade do equipamento, ou seja, evitar que o mesmo não fique parado. A aquisição de uma outra bomba centrífuga seria o ideal para que tivesse uma bomba extra para caso uma dê algum problema ter sempre uma reserva, outro ponto também seria o revezamento entre as bombas, pois a que não estivesse usando seria separada para a manutenção, onde se abriria para ver a situação da mesma.

A terceira perspectiva para trabalhos futuros está relacionada ao sistema de troca térmica, pois durante os experimentos notou-se que o tanque termostático perdia bastante calor durante a realização dos experimentos, pois o mesmo necessitava ficar um pouco aberto para que a mangueira de saída do fluido frio entrasse no tanque para ser realizado o reciclo, essa perda de calor era muito sentida pelo sistema, pois se o experimento se iniciava com temperatura de 60°C e o tanque não conseguia manter-se próximo a esta temperatura.

Ainda falando do sistema de troca térmica notou-se que a descarga do fluido frio vai direto para o esgoto gerando um desperdício muito grande e como engenheiro químico tem-se o dever de manter a preservação dos recursos naturais e para isso acontecer faz-se necessário que o fluido frio tivesse também um reciclo para que seja reaproveitada, com isso poderia se retirar o tanque de armazenamento localizado na parte superior do sistema

e coloca-lo na altura da bomba, podendo a descarga ser colocada novamente no tanque de armazenamento.

Ainda no sistema de troca térmica outra melhoria a ser observada seria a diminuição de tubulações visando diminuir as perdas de cargas do sistema assim como as perdas de calor para o ambiente através da tubulação.

A troca do isolante térmico que reveste o trocador de calor também é uma das melhorias a serem aplicadas ao sistema para que não haja grandes perdas de calor para o ambiente.

Quanto aos experimentos uma perspectiva para trabalhos futuros seria a realização dos mesmos em triplicata para que veja se há uma consistência nos dados, pra ver se não há dados fora da curva consolidando cada vez mais os dados gerados pelo trocador de calor. A utilização da ferramenta de planejamento experimental estático também poderia ser útil para ver as variáveis dependentes e independentes do sistema além de serem experimentos que garantam o melhor resultado.

Por fim, a última perspectiva para trabalhos futuros seria a utilização de ferramentas computacionais para comparação dos dados, além de fazer um dimensionamento do trocador de calor.

Portanto, a partir deste trabalho é possível abrir um leque de melhorias para este equipamento através dos conhecimentos obtidos no curso de engenharia química, pois as perspectivas abordadas nesta seção visam uma multidisciplinaridade entre as matérias do curso, pois ao analisar tem-se perspectivas voltadas a operações unitárias I e II assim como fenômenos de transporte I e II, como também a parte de modelagem para a engenharia química e a utilização de planejamento experimental estatístico.

## REFERÊNCIAS

- BARREIROS, AMANDA. **Condução, Convecção e Radiação.** <<https://querobolsa.com.br/enem/fisica/conducao-conveccao-e-radiacao>>. Acessado em 27/05/2021 às 10h37. 2018.
- CAMPOS, André Telles. **Convecção Natural no Controle do Escoamento de Fumaça em Incêndios.** Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia. Brasília – DF. 2015.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, AFSHIN J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem Prática.** 4ª ed. São Paulo – SP. AMGH EDITORA LTDA. 2012.
- CHAVES, Marcelo dos Santos; DA SILVA, Fernando Moreira; LIMA, Zuleide Maria C. **Massas de Ar e Circulação Atmosférica.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN. 2009.
- COELHO, João Carlos Martins. **Energia e Fluidos – Transferência de Calor – Vol. 3.** 5ª ed. São Paulo – SP. Blucher. 2016.
- BORGES, Dayane. **Sensação Térmica – Quando Ocorre e Tipos de Transferência de Calor.** <<https://conhecimentocientifico.r7.com/sensacao-termica/>>. Acessado em 27/05/2021 às 10h33. 2019.
- CONNOR, Nick. **O que é Convecção Natural – Transferência de Calor – Correlações – Definição.** 2014. <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-conveccao-natural-conveccao-livre-definicao/>> Acessado em 16/05/2021 às 14h14min.
- CONNOR, Nick. **O que é o Número de Nusselt – Definição.** <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-de-nusselt-definicao/>>. Acessado em 04/06/2021 às 20h24. 2020.
- CONNOR, Nick. **O que é o Número de Prandtl – Definição.** <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-prandtl-definicao/>>. Acessado em 04/06/2021 às 23h29.
- CONNOR, Nick. **O que é o Número de Reynolds para Fluxo de Tubulação – Definição.** <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-de-reynolds-para-fluxo-de-tubulacao-definicao/>>. Acessado em 04/06/2021 às 20h42.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Chemical Engineering – Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer – Vol. 1.** 6ª ed. Woburn – USA. Butterworth Heinemann. 1999.
- DE OLIVEIRA, Rick Rocha. **Determinação dos Coeficientes de Transferência de Calor em Trocador de Tubos Concêntricos.** Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Manaus – AM. 2011.
- DIAS, Ely M. F.; CORTEZ, Bianca L. D.; SILVA, André L. B. **Trocadores De Calor.** Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Manaus – AM. 2019.

DIRECT INDUSTRY. **Trocador de Calor de Placas.** <<https://www.directindustry.com/pt/prod/cft-packaging-spa/product-93645-1659348.html>>. Acessado em 09/06/2021 às 20h47.2021.

DOS SANTOS, Anderson Pinho. **Estudo e Avaliação de Performance em Sistemas de Ar-Condicionado: Um Comparativo entre Sistemas Split System e Sistema VRV (Vazão de Refrigerante Variáveis).** Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – PPGEP. Belém – PA. 2017.

DOS SANTOS, Fellipe Cros; STAPASOLLA, Tayron Zilli. **Construção Trocador de Calor Tipo Casco e Tubo para Resfriamento de Mostro de Cerveja.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS. Porto Alegre – RS. 2011.

ENGELHARDT, Bruna Angelica Severo; ARRIECHE, Leonardo da Silva. Análise da Secagem de Amêndoas de Cacau por Convecção Forçada a partir de Diferentes Secadores. **Brazilian Journal of Production Engineering.** V.X. nº X. Editora CEUNES/DETEC. São Mateus – SP. 2016.

FERRÃO, Ewerton Shimara Pires Ferrão. **Modelagem e Validação da Transferência de Calor e da Distribuição de Temperatura no Processamento Termico Continuo de Alimentos Líquidos em Trocadores Bitubulares.** Escola Politecnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2012.

FERREIRA, Cassio Eduardo Nadal. **Análise Experimental do Desempenho de um Trocador de Calor do Tipo Casco e Tubos.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Ponta Grossa – PR. 2014

FÍSICA UFPR. **Mecanismos de Transferência de Calor.** <<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-9.html>>. Acessado em 27/05/2021 às 10h25min. 2021.

FOSTER, David G.; RORRER, Gregory L. WELTY, James R. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa.** 6ª ed. Rio de Janeiro – RJ. LTC. 2017.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W., MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípio das Operações Unitárias.** 2ª ed. Editora Guanabara. 1982.

GANGHIS, Diógenes. **Apostila de Trocadores de Calor.** Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET. Bahia – Brasil. 2018

GARDENAL, Angélica Lubaski; SGUARIO, Mariana Kato. **Avaliação do Desempenho de Trocadores de Calor.** Universidade Tecnológica do Paraná. Ponta Grossa – PR. 2016.

GEANKOPLIS, Christie John. **Transport and Process and Separation Process Principles.** 5ª ed. United States of America – USA. Pearson. 2018.

GHIAASIAAN, S. Mostafa. **Convective Heat and Mass Transfer.** 2ª ed. Boca Raton – EUA. CRC PRESS. 2018.

GOUVEIA, Rosimar. **Irradiação Térmica.** <<https://www.todamateria.com.br/irradiacao-termica/>>. Acessado em 27/05/2021 às 10h54. 2011.

GREEN, Don w.; PERRY, Robert H. **Perry's Chemical Engineers – Handbook.** 8ªed. United States of America – USA. Mcgraw Hill Book Company. 2008.

GUT, Jorge A. W.; DE PAIVA, José Luiz. **Apostila 3 – Introdução aos Trocadores de Calor.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2019.

HEWITT, G. F.; SHIRES, G.L.; BOTT, T.R. **Process Heat Transfer.** CRC- Press. Boca Raton – New York. 1994.

HOLMAN, J. P. **Transferencia de calor.** 8ª ed. McGraw Hill/Interamericana. Madrid – ESP. 1998.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, THEODORE L.; LAVINE, ADRIENNE S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 7ª ed. Rio de Janeiro – RJ. LTC. 2014.

JJI, Latif M. **Heat Convection.** 2ª ed. The City Collegue of The City of New York. Nova Iorque – EUA. Springer. 2009.

JÚNIOR, Edson Jansen Pedrosa de Miranda; GONÇALVES, Rubens Soeiro. Determinação Experimental do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção. **Revista IFES.** Instituto Federal do Espírito Santo. v.2, nº1, p. 53-71, 2016.

JÚNIOR, Gabriel Nunes Maia. **Investigação Experimental do Desempenho de um Trocador de Calor de Tubos Concêntricos.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa – PR. 2014.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact Heat Exchangers.** 3ª ed. New Delhi – IND. MEDTECH. 2018.

KERN, Donald Q. **Procesos de Transferencia de Calor.** Mexico. Mcgraw Hill Book Company. 1999.

KREITH, Frank; MANGLIK, RAJ M.; BOHN, Mark S. **Principios de Transferencia de Calor.** 7ª ed. Cidade do México – MEX. 2012.

LIENHARD IV, Jonh H.; LIENHARD V, Jonh H. **A Heat Transfer – Textbook.** 5ª ed. Massachussets – USA. Phlogiston Press – Cambridge Massachussets. 2020.

McCABE, Warren L.; SMITH, Julian L.; Hariott, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering.** 5ª ed. United States of America – USA. Mcgraw Hill Book Company.1993.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Trocador de Calor, um Dispositivo muito Utilizado nas Indústrias.** <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/582-trocador-de-calor-um-dispositivo-muito-utilizado-nas-industrias/>>. Acessado em 09/06/2021 às 20h41. 2021.

NASCIMENTO, Denir Pagani; MARTORANO, Marcelo de Aquino; NETO, João Batista Ferreira; DE LIMA, Moysés Leite; RIBEIRO, Tiago Ramos. **Efeito da Convecção Forçada na Micro e Macroestrutura de Lingotes de Silício Grau Metalúrgicos Obtidos por Solidificação Unidirecional**. Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos. Vol. 48. nº 1. 2017.

NETO, Arthur Viana dos Santos. **Modelagem Matemática de Trocadores de Calor Tipo Casco e Tubos**. Universidade de Rio Verde – UNIRV. Rio Verde – GO. 2014.

PEREIRA, Isabella Bordilhão Torres; BUSSULO, Jéssica Resende; CARPI, João Marcos Guerras; YANOMOTO, Kariyn; DE ANDRADE, Patrícia Florêncio. **Indústria de Suco de Laranja Integral**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Apucarana – PR. 2018.

PROPEQ. **Trocadores de Calor: Quais os Tipos e Por que São Importantes**. <<https://propeq.com/post/trocadores-de-calor/>>. Acessado em 28/05/2021 às 17h42. 2020.

SCHENKEL, Kelvin Alex. **Monitoramento da Efetividade Térmica de Trocadores de Calor**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS. Porto Alegre – RS. 2015.

SCHMIDT, Frank W.; HENDERSON, Robert E.; WOLGEMUTH. **Introdução às Ciências Térmicas – Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor**. 7ª ed. São Paulo – SP. Blucher. 2018.

MERCADO LIVRE. **Mangueira Atóxica Alimentícia Transparente**. <[https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1079369820-mangueira-atoxica-int12127mm-c-espiral-aco-o-metro-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1079369820-mangueira-atoxica-int12127mm-c-espiral-aco-o-metro-_JM)>. Acessado em 05/12/2021 às 10h06. 2021.

SIGNIFICADOS. **Significado de Eficiência**. <Significado de Eficiência (O que é, Conceito e Definição) - Significados>. Acessado em 05/12/2021 às 22h45. 2021.

**APÊNDICE****APÊNDICE A – Sequência dos Experimentos**

Experimento	Vazão Frio (L/h)	Vazão Quente (L/h)
1	100	100
2	100	200
3	100	300
4	100	400
5	100	500
6	100	600
7	200	100
8	200	200
9	200	300
10	200	400
11	200	500
12	200	600
13	300	100
14	300	200
15	300	300
16	300	400
17	300	500
18	300	600
19	400	100
20	400	200
21	400	300
22	400	400
23	400	500
24	400	600
25	500	100
26	500	200
27	500	300
28	500	400

29	500	500
30	500	600

APÊNCIDE B – Tabela Completa de Experimentos no escoamento concorrente

Experimento	Tempo (Min)	Re. entrada (°C)	Re. saída (°C)	Re. saída (°C)	VR (l/h)	Vd (l/h)	Vmd (kg/s)	Vmq (kg/s)	Q (W/m²)	Qm (W/m²)	q (W)	qq (W)	qamb (W)	qunk (W)	ARI (°C)	ARI2 (°C)	MHTD (°C)	U (W/m².K)	ε	NIT	
VI=100 l/h e Vg=100 l/h																					
1	0	54,1	26,8	45,1	41,8	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1742,5	1065,5	497	3171,425833	27,3	3,3	11,3584506	8,57018995	0,45054951	523,588205
1	2	54,1	27,1	45,2	39,5	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1440,66667	1370,76667	497	3171,425833	27	2,8	10,6785802	12,6665926	0,50740741	0,00729206
1	4	52,3	28,2	42,1	39,6	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1343,3	1184,9	-1394	2799,698511	24,1	2,5	9,52542725	11,97499608	0,52670954	0,00706810
1	6	51,1	29,2	41,7	39,5	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1196,56667	1091,96667	-104,55	2294,100833	21,9	2,2	8,87526254	12,7166477	0,52960865	0,00724310
1	8	50,3	29,8	41,5	39,5	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1126,86667	1022,26667	-104,55	2281,475611	20,5	2	7,949201746	12,3892918	0,526829268	0,007312512
1	10	49,9	29,8	41,3	39,3	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1103,583333	999,033333	-104,55	2235,008833	20,1	2	7,843740097	12,77429006	0,52763184	0,007242403
1	12	49,3	29,8	40,9	38,9	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1057,16667	978	-81,2666667	2260,300167	19,5	2	7,6864649103	12,2318148	0,523333333	0,0072294123
1	14	48,9	29,7	40,6	38,7	100	0,02777778	0,02777778	116,1606667	116,1604444	116,1604444	1045,5	964,1333333	-81,2666667	2202,453333	19,2	1,9	7,479281549	12,41949861	0,53125	0,007339065
VI=100 l/h e Vg=200 l/h																					
2	0	47,7	29,8	40,3	37,8	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	929,3333333	1719,26667	789,0333333	4158,866111	17,9	2,5	7,8317598	21,1720441	0,453072626	0,006248216
2	2	48,8	29,8	42	39,5	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1126,86667	1579,96667	443,05	4414,438989	19	2,5	8,13849968	1870849425	0,489478684	0,00551182
2	4	49,5	30,8	42,6	40,2	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1091,96667	1603,1	511,3333333	4344,73222	18,7	2,4	9,293988713	1945253454	0,497526203	0,005740761
2	6	49,9	31,3	43,2	41	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1126,86667	1556,633333	429,8166667	4321,503333	18,6	2,2	7,68264316	0,497844624	0,405760711	0,005670711
2	8	50,6	31,3	43,5	41,2	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1150,95	1609,26667	499,5166667	4484,140556	19,3	2,3	7,991714342	1988,52501	0,487046632	0,005868463
2	10	51,5	31,3	44,1	41,8	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1219,275	1719,26667	499,5166667	4609,245556	20,2	2,3	8,238138514	2015,16468	0,48019802	0,005933358
2	12	52,3	31,3	44,8	42,3	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1277,833333	1742,5	464,6666667	4879,16667	21	2,5	8,695662528	19311,79272	0,476190476	0,005929256
2	14	53,1	31,7	45,2	42,8	100	0,02777778	0,05555556	116,1606667	232,3388889	232,3388889	1299,45	1854,333333	545,9333333	4972,052222	21,4	2,4	8,684938278	2056,095776	0,481308411	0,006009146
VI=100 l/h e Vg=300 l/h																					
3	0	53,3	32,4	46,9	44,1	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1359,15	2230,4	871,75	7283,83167	20,9	2,8	9,004393907	238632328	0,440191388	0,006492971
3	2	54,8	32,5	48,1	45,3	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1486,033333	2313,495	848,016667	7771,738333	22,3	2,8	9,29737836	233632912	0,456008069	0,006703037
3	4	55,5	32,4	48,6	46	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1579,86667	2100,45	824,7833333	8085,5425	23,1	2,6	9,38506747	246840916	0,41258411	0,00684652
3	6	55,5	32,4	48,2	46,2	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1603,1	210	836,4	8156,408	23,4	2,6	9,66489787	248244476	0,41075641	0,00683846
3	8	55,5	32,5	48,2	46,2	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1614,76667	249,8	754,0333333	8085,259333	23,2	2,5	9,27421017	245715397	0,40086049	0,00683408
3	10	55,4	32,6	48,2	46,1	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1564,25	234,95	767	7974,593	22,8	2,6	9,30490576	241750983	0,40784937	0,0067408
3	12	55,4	32,9	48,3	46,1	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1533,4	234,95	801,55	7974,593	22,6	2,7	9,36003674	240157154	0,44792594	0,00672567
3	14	55,5	32,9	48,3	46,2	100	0,02777778	0,08333333	116,1606667	348,5083333	348,5083333	1545,01667	234,95	789,9333333	7870,285333	22,6	2,6	9,248818109	243217089	0,411594425	0,006738155
VI=100 l/h e Vg=400 l/h																					
4	0	55,3	32,8	49,5	46,6	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1603,1	265,16667	1091,96667	1065,525	22,5	2,9	9,566552017	271442544	0,38666667	0,006404791
4	2	55,1	32,8	49,5	47	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1649,56667	2602,133333	952,566667	1060,23444	22,3	2,5	9,04813605	2770459077	0,3652287	0,006088329
4	4	55,1	33	49,5	47	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1626,333333	2602,133333	972,8	1020,27889	22,1	2,4	8,819627717	2787434707	0,360518037	0,006412953
4	6	54,9	33	49,4	47	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1626,333333	2556,66667	929,3333333	1017,644333	21,9	2,4	8,819627717	2791672716	0,360730594	0,006419341
4	8	54,2	32,9	49,5	47,2	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1591,833333	289,2	846,8166667	1068,23444	22,5	2,6	9,16072255	275180082	0,389743295	0,006391227
4	10	54,5	32,9	49,2	46,8	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1614,76667	2462,353333	848,0166667	1003,504	21,6	2,4	8,82329676	271516419	0,356841881	0,0064046
4	12	54,4	32,8	49	46,5	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1591,833333	289,2	917,7166667	1003,504	21,6	2,5	8,85746232	272919398	0,35740741	0,006407212
4	14	54,2	33,1	48,9	46,3	100	0,02777778	0,11111111	116,1606667	464,6777778	464,6777778	1533,4	2462,353333	929,3333333	9084,701111	21,1	2,6	8,85771962	268519385	0,324973883	0,00642759
VI=100 l/h e Vg=500 l/h																					
5	0	54,2	33,2	49,5	47	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1603,1	2729,01667	1126,86667	1219,79167	21	2,5	8,695662528	302521430	0,32857143	0,005371515
5	2	54,3	33,1	49,7	47,2	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1637,95	2671,833333	1032,883333	1231,30611	21,2	2,5	8,74767678	2942151955	0,33490566	0,005473542
5	4	54,1	33,1	49,5	47	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1614,76667	2671,833333	1057,16667	1219,79167	21,1	2,6	8,695662528	296141703	0,338092538	0,005495525
5	6	54	33	46,9	46,9	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1614,76667	2671,833333	1057,16667	1225,87639	21,1	2,6	8,835771962	291181286	0,34122227	0,005438909
5	8	54	33	49,4	46,9	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1614,76667	2671,833333	1057,16667	1219,79167	21,1	2,5	8,695662528	291181286	0,338092538	0,005495525
5	10	54	33	49,4	46,8	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1603,1	2671,833333	1064,733333	1219,79167	21	2,6	8,80795776	2922,68059	0,342857143	0,005449754
5	12	54	33,3	49,4	46,9	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1579,86667	2671,833333	1091,96667	1202,5375	20,7	2,5	8,60911082	2989,401783	0,342905169	0,005529121
5	14	54	33,3	49,4	47	100	0,02777778	0,13888889	116,1606667	580,8472222	580,8472222	1591,833333	2671,833333	1080,55	1202,5375	20,7	2,4	8,49197965	3030,684097	0,338164251	0,00



Experimento	Tempo (Min)	lib. completa (°C)	Treatment1 (°C)	lib. saída (°C)	lib. saída (°C)	V(L/D)	Vg(L/D)	Vmd (kg/s)	Vmd (kg/s)	Q(T/W/m)	Q(L/W/m)	Cont (W/W)	qf (W)	qq (W)	qumb (W)	qumk (W)	AH1 (°C)	AH2 (°C)	MHD1 (°C)	L (W/m <sup>2</sup> .h)	e	NIT		
VI-300 Lib-C Vg=100 Lib	13	0	51.5	34	39.5	37.7	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1289.45	1394	104.55	6098.75	17.5	1.8	6306.823685	1945.84339	0.28887429	0.01143805		
	13	2	51.3	34	40.3	38.8	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1277.8333	-304.966667	6099.05	6099.05	17.3	1.5	6460.529746	1905.204117	0.22254533	0.01147585		
	13	4	51.3	34	40.2	38.7	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1637.95	1289.45	6029.05	6029.05	17.3	1.5	6460.529746	1922.524155	0.22832369	0.01134256		
	13	6	51.2	34	40.1	38.6	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1637.95	1289.45	6029.05	6029.05	17.3	1.5	6460.529746	1922.524155	0.22832369	0.01134256		
	13	8	51.2	34	40.1	38.5	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1637.95	1289.45	6029.05	6029.05	17.4	1.6	6260.666785	1876.513882	0.22888587	0.01107460		
	13	10	51.3	33.9	40.1	38.5	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1603.1	1301.066667	-371.233333	6063.9	6063.9	17.4	1.6	6260.666785	1893.212708	0.22888587	0.01117487	
	13	12	51.3	33.8	40.1	38.6	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1627.8	1301.066667	-371.233333	6098.75	6098.75	17.5	1.5	6512.706892	1924.608809	0.225714286	0.011359623	
	13	14	51.4	33.8	40.1	38.5	300	0.08333333	0.02777778	348.5	116.694444	348.5	1627.95	1312.683333	-325.266667	6133.6	6133.6	17.6	1.6	6675.813823	1895.277673	0.232954845	0.01183658	
	VI-300 Lib-C Vg=200 Lib	14	0	51.6	33.8	42	40.1	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2195.55	2230.4	34.85	6203.3	17.8	1.9	7106.63917	3023.578356	0.64067416	0.008923072	
		14	2	51.8	33.8	42.9	40.9	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2474.35	2200.1	-174.25	6621.5	6621.5	19	2	7581.221053	2934.487287	0.626315789	0.008660151
		14	4	51.3	33.8	42.2	41.1	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2544.05	2216.56667	-107.483333	6795.75	6795.75	19.5	1.9	7880.022724	2905.306631	0.625641026	0.008544571
		14	6	51.3	33.8	41.2	41.2	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2578.9	2232.33333	-285.566667	6795.75	6795.75	19.5	2.1	7880.022724	2866.639635	0.629512821	0.008459972
		14	8	51.5	33.8	41.2	41.2	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2578.9	2232.33333	-285.566667	6865.45	6865.45	19.7	2.1	7860.771155	2903.989257	0.623163482	0.008570126
		14	10	51.4	33.8	41.2	41.2	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2578.9	2232.33333	-285.566667	6865.45	6865.45	19.7	2.1	7860.771155	2903.989257	0.623163482	0.008570126
14		12	51.4	33.8	41.2	41.2	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2578.9	2232.33333	-285.566667	6865.45	6865.45	19.6	2.1	7830.912672	2885.569146	0.62124898	0.008515196	
14		14	51.3	33.8	41.1	41.1	300	0.08333333	0.05555556	348.5	232.388889	348.5	2544.05	2232.33333	-220.716667	6795.75	6795.75	19.5	2.2	7928.661823	2823.022082	0.625641026	0.008331199	
VI-300 Lib-C Vg=300 Lib		15	0	53.3	33.8	44.2	41.8	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2788	3171.25	383.25	6296.9125	19.5	2.4	8162.507622	3743.031547	0.88074389	0.007346198	
		15	2	53.5	33.2	44.5	42.1	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2927.4	3136.5	203.95	6865.614167	19.7	2.4	8212.794211	3676.025756	0.876690203	0.007234129	
		15	4	53.5	33.2	44.5	42.1	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2927.4	3136.5	203.95	6865.614167	19.8	2.4	8212.794211	3676.025756	0.876690203	0.007234129	
		15	6	53.2	33.7	44.3	42.2	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2892.55	3136.5	243.95	6830.76333	19.5	2.4	8072.25211	3742.270272	0.87653012	0.00732003	
		15	8	53.2	33.7	44.2	41.9	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2857.7	3136.5	278.8	6796.9125	19.5	2.3	8067.651513	3751.144095	0.87653012	0.007380831	
		15	10	53	33.7	44.2	41.9	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2857.7	3136.5	278.8	6726.210833	19.3	2.3	7991.741342	3696.976431	0.876120534	0.007233887	
	15	12	52.9	33.6	44.1	41.8	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2857.7	3136.5	278.8	6726.210833	19.3	2.3	7991.741342	3696.976431	0.876120534	0.007233887		
	15	14	52.6	33.6	43.9	41.7	300	0.08333333	0.08333333	348.5	348.508333	348.508333	2822.85	3011.95	209.1	6621.658333	19	2.2	7792.274236	3748.525363	0.875864211	0.007375807		
	VI-300 Lib-C Vg=400 Lib	16	0	52.4	33.5	44.3	42.3	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3066.8	3531.66667	464.666667	8782.41	18.9	2.5	8107.28333	4196.458831	0.833201534	0.006102206	
		16	2	52.4	33.5	44.3	42.3	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3066.8	3531.66667	464.666667	8782.41	18.9	2.5	8107.28333	4196.458831	0.833201534	0.006102206	
		16	4	52.1	33.4	44.2	42.2	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3066.8	3531.66667	464.666667	8699.07444	18.7	2.5	8089.758374	4116.458831	0.833201534	0.006072216	
		16	6	51.9	33.4	44.2	42.2	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3066.8	3531.66667	464.666667	8699.07444	18.6	2.4	8089.758374	4116.458831	0.833201534	0.006072216	
		16	8	51.8	33.4	44.2	41.8	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3061.25	3531.66667	498.52857	8865.006667	18.6	2.4	8134.27124	4313.886111	0.832325126	0.006071528	
		16	10	51.8	33.4	44.2	41.8	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3061.25	3531.66667	498.52857	8865.006667	18.6	2.4	8134.27124	4313.886111	0.832325126	0.006071528	
16		12	51.8	33.4	44.2	41.5	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3061.25	3531.66667	498.52857	8865.006667	18.4	2.4	8134.27124	4313.886111	0.832325126	0.006071528		
16		14	51.8	33.4	44.2	41.2	300	0.08333333	0.11111111	348.5	464.677778	464.677778	3061.25	3531.66667	498.52857	8865.006667	18.4	2.4	8134.27124	4313.886111	0.832325126	0.006071528		
VI-300 Lib-C Vg=500 Lib		17	0	51.1	32.6	44.3	41.7	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3171.25	3949.66667	778.166667	10745.67461	18.5	2.6	8102.9447	4695.938063	0.808108108	0.00545322	
		17	2	50.8	32.7	44.4	41.9	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3206.2	3717.535333	514.335333	10515.3472	18.1	2.6	7880.925457	4544.538012	0.791712707	0.005364693	
		17	4	50.4	32.4	44.2	41.6	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3206.2	3717.535333	514.335333	10515.3472	18	2.6	7880.925457	4544.538012	0.791712707	0.005364693	
		17	6	50.1	32.2	43.9	41.3	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3171.25	3717.535333	501.106667	10515.3472	17.9	2.6	7939.845985	4584.735552	0.791620112	0.00514223	
		17	8	49.9	31.8	43.6	40.8	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3210.2	3679.245	418.2	10515.3472	18.1	2.5	7880.925457	4473.739255	0.791620112	0.00514223	
		17	10	49.6	31.6	43.5	40.8	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3210.2	3679.245	418.2	10515.3472	18	2.5	7880.925457	4473.739255	0.791620112	0.00514223	
	17	12	49.3	31.4	43.2	40.6	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3210.2	3679.245	418.2	10515.3472	17.9	2.6	7880.925457	4473.739255	0.791620112	0.00514223		
	17	14	49.1	31.2	42.9	40.3	300	0.08333333	0.13888889	348.5	580.847222	580.847222	3171.25	3717.535333	501.106667	10515.3472	17.9	2.6	7939.845985	4584.735552	0.791620112	0.00514223		
	VI-300 Lib-C Vg=600 Lib	18	0	48.9	31.2	43.1	40.3	300	0.08333333	0.16666667	348.5	67.2106667	67.2106667	3171.25	4042.6	871.25	12337.95	17.7	2.8	8080.80332	4815.752219	0.835875706	0.004712377	
		18	2	48.8	31.2	43.1	40.3	300	0.															

Experimento	Tempo (Min)	Temperatura (°C)	Tecmatura (°C)	Tg. saída (°C)	Tk. saída (°C)	Vf (L/h)	Vd (L/h)	Vm (L/h)	Wm (kg/h)	Wd (kg/h)	CT (W/m)	CQ (W/m)	Cm (W/m)	qT (W)	qQ (W)	qm (W)	qm (W)	qk (W)	ATI (%)	ATE (%)	MIDI (%)	L/W (m²/s)	e	NIT	
VI=400 Lit/s Vm=100 Lit/h																									
19	0	51.5	30.2	38.1	35.6	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	2	51.6	32	37.8	36.3	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	4	50.9	32.8	37.6	36.8	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	6	50.5	33.2	37.4	37.1	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	8	50.4	33.7	37.6	37.5	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	10	50.4	33.8	37.2	37.5	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	12	50.2	34.2	38.2	37.8	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
19	14	50.2	34.5	38.5	38	400	100	0.11111111	0.02777778	464.666667	116.169444	464.666667	464.666667	229.4	155.633333	467.666667	961.86	20.7	1.6	8.60911082	1741.267095	0.76811242	0.010280484		
VI=400 Lit/s Vm=200 Lit/h																									
20	0	44.3	32.5	36.9	36	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	162.633333	170.266667	92.233333	548.166667	11.8	0.9	4.23527333	1391.540085	0.7389831	0.01150644		
20	2	44.3	32.5	36.9	36	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	162.633333	170.266667	92.233333	548.166667	11.8	0.9	4.23527333	1391.540085	0.7389831	0.01150644		
20	4	45.1	34.4	40.5	40.1	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
20	6	45.2	34.4	40.7	39.9	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
20	8	45.2	34.2	40.8	39.8	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
20	10	45.2	34.2	40.6	39.5	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
20	12	45.1	34.1	40.6	39.3	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
20	14	45.4	34	40.6	39.2	400	200	0.11111111	0.05555556	464.666667	232.338889	464.666667	464.666667	268.6	209.74	279.8	869.266667	18.7	0.4	4.79667578	1925.281817	0.65187166	0.014286173		
VI=400 Lit/s Vm=300 Lit/h																									
21	0	46.9	33.9	41.5	39.9	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	2	46.9	33.9	41.5	39.9	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	4	46.8	33.9	41.2	39.9	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	6	46.2	33.9	41.6	39.8	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	8	45.2	33.9	41.6	39.8	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	10	45.2	32.2	38.5	37.1	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	12	45.1	32.9	39.5	37.5	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
21	14	45.8	32.8	41.2	39.2	400	300	0.11111111	0.08333333	464.666667	348.508333	464.666667	464.666667	238	317.8	487.9	789.233333	17	1.6	6.51626889	1882.092907	0.61708834	0.00953333		
VI=400 Lit/s Vm=500 Lit/h																									
22	0	60.5	32.8	44.9	43.1	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	2	61.9	33	46.8	45.4	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	4	60.2	30.1	46.8	45.1	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	6	59	30.1	46.1	45.8	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	8	57.8	31.8	45.9	42.8	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	10	56.5	32.5	45.6	42.5	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	12	55.5	32.8	45.3	42.2	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
22	14	54.8	32.8	45	41.9	400	400	0.11111111	0.11111111	464.666667	464.677778	464.677778	464.677778	478.066667	715.866667	2369.8	1279.83889	27.5	1.8	9.42632948	7313.432955	0.62584545	0.010791566		
VI=400 Lit/s Vm=600 Lit/h																									
23	0	53.3	32.5	44.7	41.4	400	500	0.11111111	0.13888889	464.666667	580.847222	580.847222	580.847222	413.533333	499.516667	859.633333	1208.16222	20.8	3.3	9.50548849	502.622778	0.572115385	0.005976251		
23	2	52.5	32.3	44.6	40.5	400	500	0.11111111	0.13888889	464.666667	580.847222	580.847222	580.847222	413.533333	499.516667	859.633333	1208.16222	20.8	3.3	9.50548849	502.622778	0.572115385	0.005976251		
23	4	51.2	31.2	43.6	40.3	400	500	0.11111111	0.13888889	464.666667	580.847222	580.847222	580.847222	413.533333	499.516667	859.633333	1208.16222	20.8	3.3	9.50548849	502.622778	0.572115385	0.005976251		
23	6	50.7	31.5	43.1	40.1	400	500	0.11111111	0.13888889	464.666667	580.847222	580.847222	580.847222	413.533333	499.516667	859.633333	1208.16222	20.8	3.3	9.50548849	502.622778	0.572115385	0.005976251		
23	8	50.1	31.9	43.1	40.1	400	500	0.11111111	0.13888889	464.666667	580.847222	580.847222	580.847222	413.533333	499.516667	859.633333	1208.16222	20.8	3.3	9.50548849	502.622778	0.572115385	0.005976251		
23	10	49.7	32.1</																						





Experimento	Tempo (Min)	lg. entrada (°C)	Temperatura (°C)	lg. saída (°C)	Tk. saída (°C)	V(L/h)	Vq (L/h)	Vm <sup>2</sup> (kg/s)	Vm <sup>3</sup> (kg/s)	GT(W/m)	Cq (W/m)	Ghm (W/m)	qr (W)	qq (W)	qumb (W)	qmax (W)	ATI (°C)	ATI 2 (°C)	MHD (°C)	U/W.m <sup>2</sup> .h	e	NIT
VI-200 L/Dc Vq=100 L/h																						
7	0	45,8	30,4	37,6	37,5	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	164,566667	108,233333	-60,9	357,923333	8,3	7,2	7,3	7,3	0,4375	0,00515095
7	2	47,1	30,4	37,9	37,8	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	171,926667	108,233333	-60,9	357,923333	9,3	7,5	7,6	7,5	0,4375	0,00515095
7	4	48,3	30,8	38,8	38,7	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	195,133333	108,233333	-60,9	357,923333	9,6	8,3	8,3	8,3	0,4375	0,00515095
7	6	49	30,8	39,1	39,1	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	195,133333	108,233333	-60,9	357,923333	10	8,3	8,3	8,3	0,4375	0,00515095
7	8	49,2	30,9	39,2	39,1	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	195,133333	108,233333	-60,9	357,923333	10,1	8,3	8,3	8,3	0,4375	0,00515095
7	10	49,3	31	39,2	39,1	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	195,133333	108,233333	-60,9	357,923333	10,2	8,2	8,2	8,2	0,4375	0,00515095
7	12	49,4	31,1	39,3	39,2	200	100	0,05555556	0,02777778	232,333333	116,183333	232,333333	195,133333	108,233333	-60,9	357,923333	10,2	8,2	8,2	8,2	0,4375	0,00515095
VI-200 L/Dc Vq=200 L/h																						
8	0	49,6	31,1	41,2	40,8	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,2	10,2	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	2	49,8	31,1	42,1	41,1	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,1	10,1	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	4	49,8	31,3	42,3	41,9	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,1	10,1	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	6	49,6	31,5	42,3	41,9	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,7	10,7	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	8	49,6	31,6	42,3	41,9	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,7	10,7	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	10	49,3	31,7	42,2	41,8	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,4	10,4	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
8	12	49	31,7	42,1	41,6	200	200	0,05555556	0,05555556	232,333333	232,333333	232,333333	232,333333	181,9	-70,8	421,7	10,4	10,4	9,6	9,6	0,4375	0,00515095
VI-200 L/Dc Vq=300 L/h																						
9	0	49,2	31,5	43,1	42,1	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	7,1	11,6	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	2	49	31,5	43,1	42,2	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	7,1	11,6	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	4	48,9	31,5	42,9	42,2	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	6,7	11,6	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	6	48,7	31,5	42,9	42	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	6,7	11,4	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	8	48,4	31,6	42,8	42,1	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	6,4	11,2	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	10	48,2	31,9	42,8	42	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	6,3	11,1	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
9	12	48,3	31,9	42,8	41,5	200	300	0,05555556	0,08333333	232,333333	348,5	348,5	242,733333	212,58	-136,8	571,622	6,3	10,9	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
VI-200 L/Dc Vq=400 L/h																						
10	0	46,2	32	43	40,6	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,3	11,1	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	2	46,9	32	44,2	43,5	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,5	12,7	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	4	48,9	32	44,5	43,3	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,6	12,5	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	6	48,8	31,8	44,5	43,1	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,7	12,7	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	8	48,3	31,5	44	42,6	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,7	12,6	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	10	48,2	31,4	43,9	42,6	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,7	12,6	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
10	12	48,2	31,4	43,9	42,6	200	400	0,05555556	0,11111111	232,333333	464,733333	464,733333	198,066667	216,266667	-182	752,848	5,6	12,4	9,1	9,1	0,4375	0,00647067
VI-200 L/Dc Vq=500 L/h																						
11	0	48,1	31,5	44,2	42,8	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,3	12,7	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	2	48,1	31,6	44,5	43,1	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,5	12,9	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	4	48	31,7	44,4	43	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,5	12,7	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	6	47,9	31,8	44,3	42,9	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,5	12,5	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	8	47,8	31,8	44,2	42,8	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,5	12,4	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	10	47,8	31,8	44,2	42,8	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,1	12,4	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
11	12	47,7	31,7	44,1	42,6	200	500	0,05555556	0,13888889	232,333333	580,216667	580,216667	262,566667	226,525	-304,1	964,216667	5,1	12,5	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
VI-200 L/Dc Vq=600 L/h																						
12	0	47,5	31,5	44,5	42,9	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,6	13	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	2	47,5	31,5	44,5	42,8	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,7	13	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	4	47,2	31,5	44,3	42,7	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,5	12,8	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	6	47,1	31,2	44,1	42,4	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,7	12,9	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	8	47,1	31,1	44,1	42,3	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,8	13	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	10	47	31,4	44,1	42,4	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,6	12,7	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
12	12	46,9	31,7	44,1	42,5	200	600	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,4	12,3	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
VI-200 L/Dc Vq=800 L/h																						
13	0	46,9	31,8	44,1	42,5	200	800	0,05555556	0,16666667	232,333333	697,1	697,1	262,566667	209,1	-527,6	1115,6	4,4	12,3	9,1	9,1	0,4375	0,00814192
13	2	46,9	31,8	44,1	42,5																	

Experimento	Tempo (Min)	T <sub>g</sub> entrada (°C)	T <sub>g</sub> T <sub>entrada</sub> (°C)	T <sub>g</sub> saída (°C)	T <sub>g</sub> saída (°C)	V <sub>1</sub> (L/h)	V <sub>2</sub> (L/h)	V <sub>in</sub> (kg/s)	V <sub>out</sub> (kg/s)	CT (W/m)	C <sub>q</sub> (W/m)	Q <sub>in</sub> (W)	Q <sub>out</sub> (W)	q <sub>in</sub> (W)	q <sub>out</sub> (W)	q <sub>in</sub> (W)	q <sub>out</sub> (W)	q <sub>in</sub> (W)	q <sub>out</sub> (W)	AI1 (°C)	AI2 (°C)	MHD (°C)	L <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> h)	e	NIT	
VI-300 L/h e V <sub>2</sub> =200 L/h	13	0	52,7	28,3	37,2	36,5	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	288,7	179,8333333	-105,7166667	850,4	732,05	16,2	8,9	12,8779288	161,9128151	0,6393426	0,002902921			
	13	2	50,9	29,3	36	35,9	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	289,7	179,8333333	-105,7166667	850,4	732,05	15	8,9	10,2986499	161,9128151	0,6393426	0,002902921			
	13	4	52,1	30,8	37,3	37,6	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	290,8	179,8333333	-105,7166667	850,4	732,05	14,5	7,1	10,6353638	153,3457604	0,620751174	0,003170661			
	13	6	52,5	31,1	38,3	38,1	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	249,5	164,9566667	-78,9233333	745,9	745,9	14,4	7,2	10,8754049	149,2297916	0,620751174	0,003170661			
	13	8	52,4	31,4	38,6	38,3	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	250,2	164,9566667	-78,9233333	745,9	745,9	14,2	7,5	10,6959919	148,3403193	0,635814102	0,002916002			
	13	10	52,4	31,5	38,7	38,3	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	250,8	164,9566667	-78,9233333	745,9	745,9	14,1	7,2	10,6664256	149,3423235	0,626451148	0,002938313			
	13	12	52,3	31,7	38,8	38,4	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	250,9	164,9566667	-78,9233333	745,9	745,9	17,9	7,1	11,6297803	152,3493514	0,628932399	0,002954531			
	13	14	52,3	31,8	38,8	38,4	300	0,083333333	0,027777778	348,5	116,1833333	348,5	250,1	164,9566667	-78,9233333	745,9	745,9	13,9	7	10,986248	150,233301	0,627804878	0,002955234			
	VI-300 L/h e V <sub>2</sub> =300 L/h	14	0	52,4	31,8	40,1	39,8	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	278,8	238,7	69,7	719,1	719,1	12,6	8,3	10,3008495	762,6754	0,61165048	0,00538460		
		14	2	52,1	31,8	41,9	41,9	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	3171,35	250,8	-801,45	609,45	732,45	11,2	10,1	10,6085353	214,642405	0,58172438	0,00212469		
		14	4	51,5	31,9	41,6	40,8	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	3101,65	230,1	-801,45	681,6	732,45	10,7	9,7	10,9183242	214,642405	0,545918367	0,00227695		
		14	6	51,2	31,9	41,5	40,7	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	2996,8	225,6333333	-813,1666667	672,05	728,9	10,5	9,6	10,0432799	214,642405	0,544014151	0,00243268		
		14	8	50,9	31,9	41,3	40,5	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	2991,1	220,4	-766,7	662,15	728,9	10,4	9,4	9,80157678	214,642405	0,547368421	0,00232978		
		14	10	50,7	32	41,7	40,3	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	2897,45	200,1	-801,45	651,95	728,9	10,4	9,7	10,0493657	200,8239665	0,554109713	0,00245387		
14		12	50,2	32	41,1	40,2	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	2897,7	214,2333333	-743,6666667	624,2	728,9	10	9,7	9,54292747	214,239732	0,54958649	0,00219931			
14		14	50,1	32,1	50,1	40,2	300	0,083333333	0,055555556	348,5	232,5666667	348,5	2823,85	0	-2823,85	623,2	623,2	9,9	18	13,5808456	0	0,58	0,00000000			
VI-300 L/h e V <sub>2</sub> =400 L/h		15	0	50,1	32,1	41,8	40,6	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	276,25	209,55	-69,7	627,9	627,9	9,5	9,7	9,59965768	290,27279	0,57777778	0,00571052		
		15	2	49,6	32,1	41,9	40,8	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	3161,95	208,45	-314,5	609,625	738,26	8,8	9,8	9,29102209	272,480788	0,50257143	0,00457916		
		15	4	49,5	32,1	41,8	40,5	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2972,4	201,75	-313,65	599,506	738,26	8,8	9,7	9,24289892	272,480788	0,5162797	0,00535942		
		15	6	48,9	32	41,5	40,2	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2872,5	257,89	-276,8	580,495	701,7442	8,6	9,5	9,39407049	276,258054	0,5088754	0,00458015		
		15	8	48,5	32,1	41,4	40,1	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2788	254,05	-276,8	585,644	691	8,4	9,1	9,34931341	276,258054	0,51190462	0,00451411		
		15	10	48,2	32,1	41,2	40,1	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2751,85	247,45	-276,8	571,622	691	8,2	9,1	9,35917468	276,258054	0,51219512	0,00451379		
	15	12	48,2	32,1	41,1	40	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2718,3	249,5	-276,8	561,685	691	8,2	9	9,39797468	274,255384	0,5091677	0,004580685			
	15	14	48,1	32,1	41,1	39,9	300	0,083333333	0,083333333	348,5	348,55	348,55	2718,3	249,5	-276,8	561,685	691	8,2	9	9,39797468	274,255384	0,5091677	0,004580685			
	VI-300 L/h e V <sub>2</sub> =500 L/h	16	0	47,9	32	41,9	40,3	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	292,4	278,8	-104,55	738,26	738,26	7,6	9,9	8,69934856	308,7499238	0,477987421	0,004555313		
		16	2	47,8	32	42	40,4	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	3161,95	269,55	-243,95	720,366667	742,786667	7,4	10	8,64889852	308,7499238	0,4685344	0,004436735		
		16	4	47,5	32	41,8	40,3	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2872,5	264,86	-243,95	720,366667	742,786667	7,2	9,8	8,43330653	306,856693	0,464516128	0,004468085		
		16	6	47,4	32,1	41,7	40,3	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2857,7	260,1333333	-255,6666667	711,0442	691	7,1	9,7	8,32592715	308,856693	0,464516128	0,004438825		
		16	8	47,2	32,1	41,5	40,2	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2823,85	258,6666667	-267,1833333	701,7423333	691	7	8,23107812	299,1019385	0,463576159	0,004412958			
		16	10	47,1	32,1	41,5	40,1	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2788	260,1333333	-185,8666667	691	691	9,4	9,4	8,141172516	309,269871	0,466666667	0,004434711		
16		12	47	32,1	41,4	40,1	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2751,85	258,6666667	-232,3333333	674,426667	691	9,4	9,4	8,098589868	306,5018015	0,463987348	0,004492646			
16		14	46,9	32,1	41,3	40	300	0,083333333	0,111111111	348,5	464,7333333	464,7333333	2751,85	258,6666667	-197,4833333	678,8053333	691	9,3	8,002899885	302,173174	0,466216216	0,004579216				
VI-300 L/h e V <sub>2</sub> =600 L/h		17	0	46,9	32,1	42,2	40,2	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2823,85	272,9	-92,3333333	859,7566667	859,7566667	6,7	10,1	8,234037572	317,475336	0,452702703	0,003747238		
		17	2	47,1	32,1	43,5	40,8	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	3161,95	269,1	-94,95	871,75	871,75	6,3	11,4	8,597911301	234,245467	0,421608707	0,002764962		
		17	4	46,9	32,2	42,5	40,7	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2967,25	255,6666667	-40,5833333	859,475	859,475	10,3	10,3	8,079712041	304,817564	0,421608707	0,003597836		
		17	6	46,8	32,2	42,3	40,6	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2927,4	261,175	-313,65	848,1383333	691	10,1	7,99730304	315,071825	0,414697534	0,00318869			
		17	8	46,4	32,2	42,2	40,5	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2897,45	249,5	-453,05	824,916667	691	5,9	7,70656436	302,484408	0,415492958	0,003569872			
		17	10	46,4	32,2	42,2	40,5	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2897,45	249,5	-453,05	824,916667	691	10	7,740566436	302,484408	0,415492958	0,003569872			
	17	12	46,3	32,2	42	40,3	300	0,083333333	0,138888889	348,5	580,9166667	580,9166667	2823,85	249,5	-348,5	819,916667	691	9,8	7,74525822	310,641094	0,42551915	0,00366808				
	17	14	46,2	32,2																						

Experimento no	Tempo (Min)	Br. entrada (°C)	Temperatura (°C)	lg. saída (°C)	Tf. saída (°C)	Vf (L/h)	Vd (L/h)	Vm (l/g.s)	Vmd (l/g.s)	CT (W.m)	Cq (W.m)	Qm (W.M)	qf (W)	qr (W)	qm (W)	qms (W)	Alf (°C)	Alc (°C)	MDDf (°C)	L/W.m <sup>2</sup> .h	e	NTf	
VI=400 L/h e Vd=100 L/h																							
19	0	42,5	32,2	35	34,6	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	120,133333	906,1	-20,416667	60,066667	501,84	8,2	3,5	8,1744391	1,68727862	0,75292529	0,00230819
19	2	45,1	32,1	35,6	35,1	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	130,4	-20,416667	60,066667	68,936	11,2	4	6,19152867	1,71745751	0,75292529	0,00233387	
19	4	46,4	32,1	36,1	35,6	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	130,206667	-28,325	68,936	68,936	11,2	4,2	6,09287515	1,71242748	0,75292529	0,00230819	
19	6	47,5	32,1	36,3	35,9	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	176,523333	130,106667	-46,666667	71,586667	11,6	4,2	7,28043006	1,72049256	0,75292529	0,00230819	
19	8	48,3	32,1	36,5	36,1	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	188,866667	137,266667	-48,725	75,756	12,2	4,4	7,64812295	1,72643205	0,75292529	0,00237848	
19	10	48,6	32,1	36,7	36,2	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	190,813333	-48,725	76,7	76,7	12,4	4,6	7,86756293	1,73151515	0,75292529	0,00230819	
19	12	48,8	32,2	36,8	36,3	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	190,813333	-41,833333	77,133333	77,133333	12,5	4,4	7,90288958	1,73040531	0,75292529	0,00230819	
19	14	49	32,3	36,8	36,3	400	100	0,11111111	0,02777778	464,666667	116,183333	464,666667	188,866667	141,723333	-41,833333	77,923333	12,7	4,5	7,90342986	1,72747178	0,75292529	0,00230819	
VI=400 L/h e Vd=200 L/h																							
20	0	48,7	32,3	38,6	37,8	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	235,566667	234,566667	-20,1	72,033333	10,9	6,3	8,30896773	1,76413348	0,64324146	0,00375333	
20	2	50,1	32,3	39,2	38,5	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	280,033333	232,433333	-34,85	82,706667	11,6	6,9	9,04744842	1,76648878	0,65108539	0,00379112	
20	4	50,2	32,5	39,3	38,7	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	280,033333	232,433333	-34,85	82,746	11,5	6,8	9,04514069	1,77242664	0,64971714	0,00402437	
20	6	49,9	32,5	39,3	38,7	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	280,033333	246,733333	-41,82	80,852	11,2	6,8	8,87191373	1,76846833	0,64324146	0,00379112	
20	8	49,7	32,6	39,3	38,7	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	281,466667	246,566667	-41,82	79,458	11,1	6,7	8,67396631	1,76839504	0,64324146	0,00379112	
20	10	49,3	32,8	39,3	38,6	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	269,066667	232,333333	-41,82	76,7	10,7	8,45026375	1,76563128	0,64848484	0,00379112		
20	12	49,3	32,8	39,3	38,7	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	274,533333	232,333333	-41,82	76,7	10,6	8,45026375	1,76563128	0,64324146	0,00379112		
20	14	49,2	32,8	39,3	38,7	400	200	0,11111111	0,05555556	464,666667	232,366667	464,666667	274,533333	230,1	-44,14333333	76,033333	10,5	6,5	8,40751732	1,76563128	0,64324146	0,00379112	
VI=400 L/h e Vd=300 L/h																							
21	0	52,5	32,9	41,2	40,2	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	339,266667	329,1	-39,19666667	78,246667	9,6	8,3	8,83434238	1,81113202	0,63884737	0,00478917	
21	2	56,1	32,8	41,5	40,2	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	348,853333	320,8	-37,17333333	80,873333	9,9	8,5	9,10218858	1,81746428	0,63725435	0,00478917	
21	4	56,2	32,8	41,1	40,6	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	325,566667	276,225	-34,01166667	78,064333	9,4	8,1	8,5142238	1,81746428	0,63725435	0,00478917	
21	6	49,2	32,8	40,9	39,8	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	325,566667	289,25	-34,01166667	78,064333	9,4	8,1	8,53081808	1,81062876	0,63725435	0,00478917	
21	8	48,5	32,9	40,8	39,7	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	302,333333	278,8	-37,17333333	75,862	9,1	7,7	8,68262545	1,81518897	0,63725435	0,00478917	
21	10	48,5	32,9	40,6	39,4	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	300,68	275,15	-37,17333333	72,862	8,8	7,7	8,65100691	1,81524101	0,63725435	0,00478917	
21	12	48,2	32,9	40,5	39,4	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	302,333333	268,45	-35,08333333	71,948	8,8	7,6	8,65100691	1,81524101	0,63725435	0,00478917	
21	14	48,1	32,9	40,4	39,3	400	300	0,11111111	0,08333333	464,666667	348,85	464,666667	297,366667	268,45	-39,01166667	70,623333	8,8	7,5	8,13290628	1,81797658	0,63725435	0,00478917	
VI=400 L/h e Vd=400 L/h																							
22	0	48	32,9	41,2	39,9	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	325,266667	319,733333	-32,92333333	70,1743333	8,1	8,3	8,19593248	1,81746428	0,63501342	0,00547737	
22	2	47,8	32,9	41,2	39,9	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	325,266667	306,8	-18,85666667	69,242667	7,9	8,3	8,08635942	1,80630689	0,63501342	0,00547737	
22	4	47,6	32,9	41,1	39,9	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	325,266667	302,333333	-23,73333333	68,128	8,2	8,2	7,96178764	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
22	6	47,3	32,9	41	39,8	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	320,62	292,74	-27,8	69,216	7,5	8,1	7,91615238	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
22	8	47,1	32,9	40,8	39,6	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	311,266667	288,933333	-24,738	65,9213333	7,4	7,9	7,73711088	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
22	10	46,9	32,9	40,8	39,5	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	306,8	283,466667	-23,23333333	65,9213333	7,4	7,9	7,61727912	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
22	12	46,7	32,9	40,6	39,3	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	297,366667	283,466667	-13,94	64,132	7,4	7,7	7,59100618	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
22	14	46,5	32,7	40,4	39,2	400	400	0,11111111	0,11111111	464,666667	464,733333	464,733333	302,333333	283,466667	-18,85666667	61,4332	7,3	7,7	7,49021888	1,80748526	0,63280952	0,00547737	
VI=400 L/h e Vd=500 L/h																							
23	0	46,8	32,6	41,3	39,8	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	334,56	319,433333	-15,10166667	82,4916667	7	8,7	7,91242408	1,93559254	0,49295746	0,00464574	
23	2	46,8	32,6	41,3	39,8	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	334,56	319,433333	-15,10166667	82,4916667	7	8,7	7,91242408	1,93559254	0,49295746	0,00464574	
23	4	46,4	32,6	41,2	39,6	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	329,133333	320,2	-27,88	80,741667	6,8	8,7	7,71026021	1,937480862	0,48970863	0,00445964	
23	6	46,3	32,4	41,1	39,5	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	320,62	292,28	-24,98	78,42475	6,6	8,4	7,71026021	1,937480862	0,48970863	0,00445964	
23	8	45,9	32,4	40,8	39,3	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	311,266667	296,228	-23,98	78,42475	6,6	8,4	7,63860707	1,937480862	0,48970863	0,00445964	
23	10	45,7	32,4	40,6	39,1	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	311,266667	296,228	-15,10166667	77,6101667	6,6	8,2	7,31080736	1,937480862	0,48970863	0,00445964	
23	12	45,5	32,4	40,6	39,1	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	311,266667	296,228	-15,10166667	77,6101667	6,6	8,2	7,26286257	1,937480862	0,48970863	0,00445964	
23	14	45,2	32,3	40,2	38,9	400	500	0,11111111	0,13888889	464,666667	580,916667	580,916667	306,8	290,166667	-16,26333333	76,008333	6,3	7,9	7				

Experimento	Tempo (Min)	lg. entrada (°C)	lg. entrada (°C)	lg. saída (°C)	lg. saída (°C)	VI (L/h)	Vg (L/h)	Vm <sub>1</sub> (kg/s)	Vm <sub>2</sub> (kg/s)	CI (W/m)	CI (W/m)	Qm <sub>1</sub> (W/W)	q <sub>1</sub> (W)	q <sub>2</sub> (W)	q <sub>amb</sub> (W)	q <sub>amb</sub> (W)	ATI (°C)	ATI2 (°C)	MDD1 (°C)	L/W <sub>in</sub> m <sup>2</sup> /h	ε	NIT	
VI - 500 L/h e Vg = 100 L/h	25	0	43.8	31.1	34.9	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.8	6.25838747	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	2	43.8	31.1	34.9	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	4	44.9	30.9	34.8	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	6	45.2	30.9	34.4	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	8	45.4	30.9	34.4	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	10	45.6	30.9	35.1	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	12	45.7	30.8	35.1	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	25	14	45.7	30.8	35.1	500	100	0.13888889	0.02777778	580.833333	116.183333	580.833333	162.833333	106.923333	-427.6	720.233333	9.6	3.5	6.15196813	157.284173	0.79274358	0.00181546	
	VI - 500 L/h e Vg = 200 L/h																						
	26	0	45.8	30.7	36.2	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	220.4	-441.433333	877.083333	10.5	5.5	7.323411	277.877776	0.69364238	0.00323047	
	26	2	45.8	30.6	36.2	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	220.4	-441.433333	877.083333	10.6	5.6	7.48190707	274.177542	0.69364238	0.00323047	
	26	4	45.8	30.4	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	220.4	-441.433333	877.083333	10.7	5.7	7.69931106	274.658414	0.69364238	0.00323047	
	26	6	45.5	30.3	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	220.4	-441.433333	877.083333	10.4	5.8	7.87145245	270.900045	0.68627451	0.00323047	
	26	8	45.6	30.3	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	220.4	-441.433333	877.083333	10.5	5.7	7.85714268	274.209042	0.68627451	0.00323047	
26	10	45.4	30.5	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	216.07	-487.9	854.416667	10.3	5.6	7.12791454	268.802155	0.691275168	0.00323047		
26	12	45.4	30.5	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	216.07	-487.9	854.416667	10.3	5.5	7.650627292	279.004341	0.691275168	0.00323047		
26	14	45.4	30.5	36.1	500	200	0.13888889	0.05555556	580.833333	232.366667	580.833333	267.833333	216.07	-487.9	854.416667	10.3	5.6	7.212791454	268.802155	0.691275168	0.00323047		
VI - 500 L/h e Vg = 300 L/h																							
27	0	47.2	30.6	38.2	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	10.7	7.6	9.061792736	351.07315	0.62571094	0.004155070		
27	2	47.4	30.5	38.5	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	10.2	8	9.055893621	329.762596	0.638530296	0.004155070		
27	4	47.1	30.5	38.2	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	10.2	7.7	8.891580165	330.627513	0.614453701	0.003967109		
27	6	46.5	30.5	38.1	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	10.4	7.6	8.651340541	328.066603	0.6175	0.003837011		
27	8	46.2	30.5	36.7	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	9.7	7.2	8.201819024	327.11852	0.617834305	0.003837011		
27	10	46	30.7	37.9	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	9.5	7.2	8.201819024	327.11852	0.623915033	0.003837011		
27	12	45.7	30.8	36.5	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	9.2	7	8.201819024	327.11852	0.623915033	0.003837011		
27	14	45.5	30.9	36.5	500	300	0.13888889	0.08333333	580.833333	348.85	580.833333	371.733333	330.75	-496.833333	993.235	6.9	7	7.903585656	327.04761	0.616438356	0.003837011		
VI - 500 L/h e Vg = 400 L/h																							
28	0	45.3	31	38.7	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	8.1	7.7	7.898311948	374.708888	0.564633566	0.004415882		
28	2	45.3	31	38.7	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	8.1	7.7	7.898311948	374.708888	0.564633566	0.004415882		
28	4	45.1	31.1	38.6	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	7.9	7.5	7.698348167	377.705219	0.562425714	0.004415882		
28	6	44.9	31.1	38.5	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	7.8	7.4	7.598348167	377.705219	0.562425714	0.004415882		
28	8	44.6	31.2	38.4	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	7.4	7.1	7.38178747	375.24871	0.561017319	0.004415882		
28	10	44.5	31.2	38.5	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	7.4	7.2	7.489852589	378.24871	0.564884549	0.004415882		
28	12	44.2	31.2	38.2	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	8	7.4	7.489852589	378.24871	0.564884549	0.004415882		
28	14	44.1	31.2	38.5	500	400	0.13888889	0.11111111	580.833333	464.733333	580.833333	501.166667	390.68	-534.566667	838.916667	7.3	7	7.148950246	368.484606	0.568914715	0.004415882		
VI - 500 L/h e Vg = 500 L/h																							
29	0	44.2	31.2	38.8	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	7	7.6	7.293888559	414.1635307	0.538401538	0.004888449		
29	2	44.5	31.2	38.8	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	7.3	7.7	7.498221885	417.111109	0.538401538	0.004888449		
29	4	44.3	31.2	38.8	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	7.1	7.6	7.347164168	418.872051	0.541994733	0.004888449		
29	6	43.9	31.2	38.5	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	6.9	7.3	7.098121608	420.268844	0.543307087	0.004888449		
29	8	43.6	31.2	38.5	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	6.7	7.3	6.995712168	420.268844	0.543307087	0.004888449		
29	10	43.7	31.2	38.5	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	6.8	7.3	7.040957526	429.268844	0.543307087	0.004888449		
29	12	43.5	31.2	38.3	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	6.6	7.1	6.840957526	429.268844	0.543307087	0.004888449		
29	14	43.3	31.2	38.3	500	500	0.13888889	0.13888889	580.833333	580.833333	580.833333	501.166667	348.85	-513.666667	755.916667	6.4	7.1	6.743936274	418.872051	0.538925862	0.004888449		
VI - 500 L/h e Vg = 600 L/h																							
30	0	44.2	31.2	39.1	500	600	0.13888889	0.16666667	580.833333	697.1	580.8												

APÊNDICE D – Tabela de Apoio para os cálculos dos Números Adimensionais para Concorrente

Experimento	H	TQ	Vef (m³/kg)	Veq (m³/kg)	p f (kg/m²)	p q (kg/m²)	µ f (Pa.s)	µ q (Pa.s)	k f (W/m.K)	k q (W/m.K)	Prandtl f	Prandtl q	v f (m/s)	v q (m/s)	Reynolds f	Reynolds q
1	Para Vf=100 L/h e Vq=100 L/h	39,6	0,12689603	0,001014805	808,0788282	985,723374	0,0006598	0,00053518	0,6313	0,6444	4,36625	3,4719	0,068300413	0,097465887	202,42	3414,5
2	Para Vf=100 L/h e Vq=200 L/h	40,8	0,00100859	0,00101247	991,485324	987,682167	6,525E-04	5,415E-04	0,62304	0,62982	4,2568	3,539025	0,068300413	0,1949	238,2	6767,1
3	Para Vf=100 L/h e Vq=300 L/h	45,8	0,00101057	0,00101499	989,5406207	985,234029	5,89E-04	5,02E-04	0,63871	0,63871	3,8539	3,244175	0,068300413	0,2924	2583,9	10901,3
4	Para Vf=100 L/h e Vq=400 L/h	46,8	0,00101098	0,00101479	989,1392638	985,4243943	5,785E-04	5,055E-04	0,63992	0,64798	3,747	3,259	0,068300413	0,3899	2631,6	14463,5
5	Para Vf=100 L/h e Vq=500 L/h	47,0	0,00101130	0,00101434	988,8315451	985,8603025	5,76E-04	5,11E-04	0,64011	0,64724	3,7622	3,299175	0,068300413	0,4873	2638,7	17879,5
6	Para Vf=100 L/h e Vq=600 L/h	47,4	0,00101123	0,00101429	988,891047	985,9113297	5,865E-04	5,115E-04	0,64059	0,64715	3,728625	3,309	0,068300413	0,5848	2596,2	21427,9
7	Para Vf=200 L/h e Vq=100 L/h	40,7	0,00100852	0,00101468	991,551916	985,5327082	6,46E-04	5,06E-04	0,62256	0,64785	4,2742	3,26475	0,13660825	0,0975	4715,1	3611,3
8	Para Vf=200 L/h e Vq=200 L/h	44,4	0,00101003	0,00101649	990,006667	983,739973	5,875E-04	6,07E-02	0,63886	0,65133	3,992	3,08115	0,13660825	0,1949	5206,1	6626,1
9	Para Vf=200 L/h e Vq=300 L/h	45,2	0,00101035	0,12795155	989,7512774	981,2929075	5,94E-04	4,86E-04	0,63812	0,65049	3,8958	3,12975	0,13660825	0,2924	5118,0	9819,0
10	Para Vf=200 L/h e Vq=400 L/h	45,2	0,00101145	0,00101496	988,6887024	985,242744	5,955E-04	5,03E-04	0,63798	0,64836	3,9016	3,24415	0,13660825	0,3899	5105,5	14523,6
11	Para Vf=200 L/h e Vq=500 L/h	45,3	0,00101038	0,00101236	989,726691	987,7909461	5,94E-04	6,45E-02	0,65841	0,66660	3,8909	3,338625	0,13660825	0,4873	5122,3	15511,7
12	Para Vf=200 L/h e Vq=600 L/h	44,7	0,00101023	0,00101307	989,571946	987,1055387	5,635E-04	5,195E-04	0,63747	0,64506	3,9348	3,418825	0,13660825	0,5848	5425,7	21142,8
13	Para Vf=300 L/h e Vq=100 L/h	38,5	0,00100766	0,00101301	992,4031693	987,1574259	6,74E-04	5,33E-04	0,63150	0,64446	4,4693	3,4571	0,204901238	0,0975	6788,0	3428,1
14	Para Vf=300 L/h e Vq=200 L/h	41,0	0,00101266	0,00101375	987,4982911	986,437828	6,275E-04	5,185E-04	0,63298	0,64624	4,2382	3,35675	0,204901238	0,1949	7255,0	7048,0
15	Para Vf=300 L/h e Vq=300 L/h	41,9	0,00101038	0,00101388	989,7310672	986,312097	6,30E-04	5,18E-04	0,63407	0,64684	4,1556	3,349125	0,204901238	0,2924	7238,3	10583,2
16	Para Vf=300 L/h e Vq=400 L/h	41,8	0,00100842	0,00101304	991,658889	987,1279096	6,325E-04	5,295E-04	0,63395	0,64498	4,1658	3,42455	0,204901238	0,3899	7236,4	13832,6
17	Para Vf=300 L/h e Vq=500 L/h	41,2	0,00100873	0,00101201	991,3505108	988,1316893	8,19E-02	5,46E-04	0,63318	0,64319	4,2233	3,513125	0,204901238	0,4873	6267,1	16766,6
18	Para Vf=300 L/h e Vq=600 L/h	40,3	0,00100837	0,00101151	991,7043955	988,6259045	1,63E-01	5,65E-04	0,63210	0,64128	4,3061	3,66825	0,204901238	0,5848	5265,3	19456,5
19	Para Vf=400 L/h e Vq=100 L/h	37,1	0,00100708	0,00101256	992,9698613	987,6007132	6,72E-04	5,35E-04	0,62813	0,64388	4,4652	3,414125	0,27320165	0,0975	9093,5	3419,2
20	Para Vf=400 L/h e Vq=200 L/h	39,2	0,00101720	0,00101310	983,6326075	987,0731264	6,655E-04	5,27E-04	0,63162	0,64572	4,3225	3,41035	0,27320165	0,1949	9101,5	6940,7
21	Para Vf=400 L/h e Vq=300 L/h	39,4	0,00102684	0,00101223	974,7236098	987,9227345	6,52E-04	5,47E-04	0,63162	0,64306	4,3575	3,555625	0,27320165	0,2924	9191,1	10035,8
22	Para Vf=400 L/h e Vq=400 L/h	43,0	0,00100945	0,00101319	990,6386211	992,675449	6,195E-04	4,795E-04	0,63535	0,64578	4,08161	3,07439875	0,27320165	0,3899	9843,0	13940,0
23	Para Vf=400 L/h e Vq=500 L/h	40,2	0,00101771	0,00101242	983,1345674	987,7372913	6,46E-04	5,44E-04	0,63179	0,64338	4,2942	3,53677	0,27320165	0,4873	9353,3	16829,2
24	Para Vf=400 L/h e Vq=600 L/h	38,4	0,00100764	0,00101034	992,422846	989,7658233	6,75E-04	5,95E-04	0,62991	0,63802	4,0964	3,898685	0,27320165	0,5848	9042,1	18488,7
25	Para Vf=500 L/h e Vq=100 L/h	38,4	0,00100764	0,00101034	992,422846	989,7658233	6,75E-04	5,95E-04	0,62991	0,63802	4,0964	3,898685	0,27320165	0,5848	9042,1	18488,7
26	Para Vf=500 L/h e Vq=200 L/h	34,1	0,00100522	0,00101171	994,8083539	988,4258465	7,36E-04	5,60E-04	0,62332	0,64175	4,9448	3,6679875	0,341502063	0,0975	10382,5	3271,4
27	Para Vf=500 L/h e Vq=300 L/h	36,2	0,00102200	0,00101191	979,1149516	988,2302977	7,05E-04	5,57E-04	0,62696	0,64227	4,0584	3,62825	0,341502063	0,1949	10676,9	6570,6
28	Para Vf=500 L/h e Vq=400 L/h	36,9	0,00100703	0,00101155	993,0195712	988,58189	6,945E-04	5,63E-04	0,62808	0,64138	4,6136	3,724375	0,341502063	0,2924	10993,3	9746,9
29	Para Vf=500 L/h e Vq=500 L/h	37,9	0,00067548	0,00101174	433,723385	988,4014015	6,82E-04	7,64E-03	0,62926	0,64121	4,5234	3,685175	0,341502063	0,4873	11102,3	14187,7
30	Para Vf=500 L/h e Vq=600 L/h	37,5	0,00100725	0,00101458	992,8021085	985,6295216	6,025E-04	5,91E-04	0,62947	0,64519	4,5097	3,2795	0,341502063	0,5848	11099,2	18546,4425

APÊNDICE E – Tabela de Apoio para os cálculos dos Números Adimensionais para Contracorrente

Experimento	TR (°C)	Ig (°C)	Ve f (m <sup>2</sup> /kg)	Ve q (m <sup>2</sup> /kg)	p f (kg/m <sup>3</sup> )	p q (kg/m <sup>3</sup> )	μ f (Pa.s)	μ q (Pa.s)	k f (W/m.K)	k q (W/m.K)	Prandtl f	Prandtl q	ν f (m <sup>2</sup> /s)	ν q (m <sup>2</sup> /s)	Reynolds f	Reynolds q
1	41.9	50.6	0.00109902	0.00101230	991.606331	987.654321	6.30E-04	5.40E-04	0.63406	0.64375	4.1561	3.5075	0.0068300413	0.11949	1073.650121	5636.538267
2	43.2	50.2	0.00100954	0.00101234	990.580516	987.8104194	6.16E-04	5.44E-04	0.63562	0.64335	4.0547	3.5355	0.0068300413	0.2924	1097.546867	8386.292159
3	43.6	48.8	0.00100970	0.00101178	990.393861	988.3571527	6.12E-04	5.38E-04	0.63610	0.64195	4.0235	3.6335	0.0068300413	0.3899	1105.117843	10912.77121
4	43.7	48.0	0.00100974	0.00101146	990.3539525	988.6698436	6.11E-04	5.66E-04	0.63622	0.64115	4.0157	3.7595	0.0068300413	0.4873	1107.027231	13456.18064
5	43.9	47.5	0.00100982	0.00101136	990.2754946	988.8653759	6.09E-04	5.71E-04	0.63646	0.64065	4.0001	3.2745	0.0068300413	0.5848	1110.866616	16011.92499
6	44.3	47.5	0.00101338	0.00101126	986.796667	988.8653759	5.13E-04	5.71E-04	0.64714	0.64065	3.3059	3.2745	0.136600825	0.0975	2628.958888	2668.654166
7	38.7	48.4	0.00100774	0.00101162	992.3194475	988.5134734	6.71E-04	5.62E-04	0.62296	0.64155	4.4498	3.7315	0.136600825	0.1949	2019.180946	5419.170932
8	41.6	49.5	0.00100890	0.00101206	991.1785112	988.0837105	6.34E-04	5.51E-04	0.63370	0.64265	4.1830	3.5845	0.136600825	0.2924	2134.907008	8284.179041
9	42.0	48.7	0.00101270	0.00101174	987.4592673	988.3962283	6.29E-04	5.59E-04	0.63414	0.64185	4.1560	3.6405	0.136600825	0.3899	2143.184573	10894.06894
10	42.6	48.5	0.00100930	0.00101166	990.7856931	988.4743886	6.23E-04	5.61E-04	0.63490	0.64165	4.1015	3.6545	0.136600825	0.4873	2172.774814	13571.06451
11	42.8	47.9	0.00100938	0.00101142	990.7071668	988.7089439	6.44E-04	5.67E-04	0.63380	0.64105	4.0859	3.6965	0.136600825	0.5848	2102.072327	16120.13087
12	42.6	47.2	0.00100930	0.00101114	990.7856931	988.9827324	6.23E-04	5.02E-04	0.63490	0.64835	4.1015	3.2291	0.204901238	0.0975	3259.16222	3084.640148
13	37.2	52.2	0.00100714	0.00101331	992.3194482	986.9622229	6.91E-04	5.25E-04	0.62842	0.64335	4.5878	3.4011	0.204901238	0.1949	2946.310237	5787.055627
14	40.4	51.1	0.00100842	0.00101270	991.6503044	987.4592673	6.30E-04	5.35E-04	0.63226	0.64425	4.2934	3.4725	0.204901238	0.3899	3128.12363	11361.90361
15	40.3	48.9	0.00100838	0.00101182	991.6896408	988.3108803	6.51E-04	5.57E-04	0.63214	0.64205	4.3026	3.6965	0.204901238	0.4873	3122.095957	13664.42794
16	40.2	47.4	0.00100834	0.00101122	991.7289803	988.9044916	6.52E-04	5.72E-04	0.63202	0.64055	4.3118	3.7315	0.204901238	0.5848	3116.091527	15985.10554
17	40.5	46.6	0.00100846	0.00101090	991.6169712	989.2175289	6.48E-04	5.80E-04	0.63238	0.63970	4.2842	3.7895	0.27320165	0.0975	4178.900377	2627.835826
18	40.1	45.5	0.00100899	0.00101046	991.0930468	989.6482729	6.32E-04	5.92E-04	0.63396	0.63838	4.1628	3.8753	0.27320165	0.1949	4285.05562	5152.370827
19	35.8	47.1	0.00100658	0.00101114	993.4630134	988.9827324	7.11E-04	5.74E-04	0.62632	0.64035	4.7418	3.7455	0.27320165	0.2924	3819.851586	7965.870867
20	38.6	49.6	0.00100770	0.00101210	992.338837	988.0446596	6.73E-04	5.30E-04	0.63010	0.64275	4.4600	3.5775	0.27320165	0.3899	4030.836631	11064.81415
21	39.8	49.0	0.00100818	0.00101186	991.8863695	988.2790109	6.57E-04	5.56E-04	0.63154	0.64215	4.3486	3.6195	0.27320165	0.4873	4123.075176	13687.97463
22	39.6	47.2	0.00100810	0.00101114	991.9658028	988.9827324	6.40E-04	5.72E-04	0.63130	0.63835	4.367	3.7391	0.27320165	0.5848	4107.403721	15979.10208
23	39.4	46.1	0.00100802	0.00101070	992.0438087	989.4132729	6.62E-04	5.85E-04	0.63106	0.63910	4.3854	3.8205	0.341502063	0.0975	5114.81682	2404.09823
24	38.5	44.1	0.00100766	0.00100990	992.3982296	990.1970492	6.74E-04	6.07E-04	0.62998	0.63670	4.4682	3.9845	0.341502063	0.1949	5029.174963	5026.750788
25	34.2	45.0	0.00100594	0.00101026	994.0958753	989.8441985	7.34E-04	5.97E-04	0.62376	0.63778	4.9274	3.9143	0.341502063	0.2924	4623.757439	7660.163333
26	35.1	45.6	0.00100630	0.00101080	993.7944455	989.6091044	7.21E-04	5.91E-04	0.62320	0.63850	4.8320	3.8675	0.341502063	0.3899	4707.905466	10321.79955
27	36.7	46.5	0.00100694	0.00101086	993.1078316	989.2566725	6.97E-04	5.81E-04	0.62776	0.63958	4.6374	3.7973	0.341502063	0.4873	4864.294957	13115.26489
28	37.0	44.7	0.00100706	0.00101014	992.9894942	989.9617875	6.59E-04	6.00E-04	0.62818	0.63742	4.6062	3.9377	0.341502063	0.5848	4892.762941	15239.43778
29	37.0	43.9	0.00100706	0.00100982	992.9894942	990.2754946	6.33E-04	6.09E-04	0.62818	0.63646	4.6062	4.0001	0.849	0.3683	12163.79178	9464.03887
30	37.2	43.8	0.00100714	0.00100978	992.9106182	990.314722	6.91E-04	6.10E-04	0.62842	0.63634	4.5878	4.008	0.849	0.4421	12207.91744	11341.32306

APÊNDICE F – Roteiro da Aula Prática  
**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias no mundo todo possuem crescentes demandas de processos que utilizam sistemas de troca de calor, seja para produção energética ou operação unitária. Este tipo de sistema térmico está presente em todos os lugares, seja no ar-condicionado das casas e automóveis ou nas fábricas como em processos de secagem.

As trocas térmicas envolvendo fluidos líquidos se tem a água como componente universal, visto a sua abundância do ponto de vista social, econômico e ambiental. A água é essencial para quase tudo no nosso planeta, ela foi necessária para manutenção da vida desde o princípio. Outras máquinas térmicas utilizam fluidos refrigerantes para fazer a troca térmica, outras utilizam resistências elétricas, o importante é que em todas elas ocorre essa troca de energia com alguma finalidade específica

Um trocador de calor ou permutador de calor é um equipamento que tem por objetivo transferir calor de maneira eficiente de um meio a outro. Essa troca só é feita em meios com diferentes temperaturas, podendo esses serem separados por meio físico sólido ou não (se misturarem ou não).

Os materiais utilizados nesta área possuem coeficientes de condutividade térmica elevado, caso seja de metal os mais usados são: cobre e alumínio. Os principais fatores que influenciam nesta troca são:

- Tipo de material
- Característica geométrica
- Vazão, diferença de temperatura e coeficientes de condutividade térmica.

Quanto a fase ele pode ser monofásico onde não há mudança de fase ou multifase onde há mudança de estado físico. Quanto ao fluxo quando ambos os fluidos são líquido frio, e líquido quente: concorrente, paralelo ou contracorrente. Quanto ao tipo de construção: pode ser tipo placa ou tubular. Se for tipo tubular ainda pode ser: carcaça e tubo, tubo duplo ou serpentina.

**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

Algumas equações podem ser utilizadas para descrever os fenômenos que acontecem em um trocador de calor.

Para o cálculo da quantidade de Calor:

Equação 1: Equação para quantidade de calor para o fluido quente

$$Q_h = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,in} - T_{h,out})$$

Equação 2: Equação para quantidade de calor para o fluido frio

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in})$$

Onde:

- $Q_h$  = Quantidade de calor quente (J);
- $Q_c$  = Quantidade de calor frio (J);
- $\dot{m}_h$  = Vazão mássica do fluido quente (Kg/s);
- $\dot{m}_c$  = Vazão mássica do fluido frio (Kg/s);
- $C_{p,h}$  = Calor específico do fluido quente (J/Kg.K);
- $C_{p,c}$  = Calor específico do fluido frio (J/Kg.K);
- $T_{h,in}$  = Temperatura de entrada do fluido quente (K);
- $T_{h,out}$  = Temperatura de saída do fluido quente (K);
- $T_{c,in}$  = Temperatura de entrada do fluido frio (K);
- $T_{c,out}$  = Temperatura de saída do fluido frio (K);

Outra forma é por meio da equação:

Equação 3: Equação para quantidade de calor

$$Q = U \cdot A \cdot MLDT$$

**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

- Q = Quantidade de calor (J);
- U = Coeficiente Global de Transferência de Calor (W/m.K);
- A = Área de Troca de calor (m<sup>2</sup>);
- MDLT = Média Logarítmica da Temperatura (K);

Para o cálculo do Coeficiente global de Transferência de calor, faz necessário o cálculo dos coeficientes de película para o fluido quente ( $h_h$ ) e para o fluido frio ( $h_c$ ).

Equação 4: Equação para coeficiente global de transferência de calor

$$U = \sum R_T = \frac{1}{h_h + h_c}$$

Onde:

Equação 5: Equação para coeficiente de película do liquido

$$h = Nu_D \frac{k}{D_h}$$

Equação 6: Equação para número de Nusselt

$$Nu_D = Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0,4}$$

Equação 6: Equação para número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot D_h \cdot v}{\mu}$$

Equação 7: Equação para diâmetro hidráulico

$$D_h = \frac{4A_c}{P}$$

**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

- |  |  |
|--|--|
| - $Nu_D$ = Número de Nusselt;              | - $v$ = Velocidade (m/s);  |
| - $D_h$ = Diâmetro Hidráulico (m);         | - $\mu$ = Viscosidade (Pa.s).  |
| - $k$ = Condutividade Térmica (W/m.K);     | - $A_c$ = Área da seção transversal do escoamento (m <sup>2</sup> ); |
| - $Re_D$ = Número de Reynolds;             | - $P$ = Perímetro molhado (m).                                       |
| - $Pr$ = Número de Prandlt;                |  |
| - $\rho$ = Densidade (Kg/m <sup>3</sup> ); |  |

Os valores de Prandlt estavam dispostos na tabela de propriedades termofísicas da água saturada (INCROPERA, 2013), assim como para os valores de viscosidade ( $\mu$ ) e densidade ( $\rho$ ) como mostra a equação 3.

## 2. OBJETIVOS

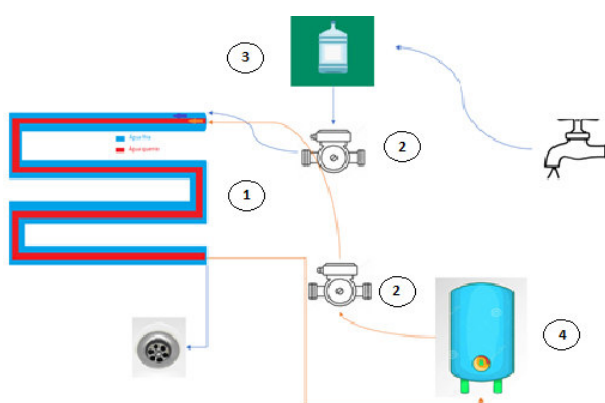
- Verificar o funcionamento de um trocador de calor e verificar a conservação de energia, além de calcular variáveis como área de troca de calor, coeficiente global, entre outros.
  
- Analisar o comportamento do trocador de calor em o concorrente e contracorrente.

## 3. MATERIAIS

A figura 1 representa o sistema de troca térmica proposto para a realização deste projeto.

**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

Figura 1: Esquema de Troca Térmica



Legenda:

- 1- Trocador de Calor
- 2- Bomba Centrífuga
- 3- Tanque de Armazenamento
- 4- Tanque Termostático

Fonte: DIAS; CORTEZ; SILVA (2019)

De acordo com a figura 1 o sistema de troca térmica que será utilizado neste trabalho é composto por um trocador de calor de tubos concêntricos (1) dividido em quatro partes de troca térmica. O fluido que passará pelo tubo interno, será água quente, procedente de um tanque termostático (4), na qual é escoado por meio de uma bomba centrífuga SHX-HOBBY (2) com potência de 0,5 CV e 110 mm de diâmetro do rotor. Após a passagem pelo trocador de calor a água retornará para o tanque termostático para que seja reutilizada pelo sistema.

Já para o fluido que passará pelo tubo externo, será água fria, procedente de um tanque de armazenamento (3) de 50L, na qual também será utilizada uma bomba centrífuga (2) de mesmas características que a empregada para o fluido quente, na qual deslocará o fluido do tanque até o trocador. Após a passagem pelo trocador de calor a água será descartada.

Também fazem parte do sistema dois rotâmetros, a fim de indicar a vazão (L/h) dos fluidos no trocador de calor, além disso nas entradas e saídas dos fluidos são posicionados termômetros digitais com resolução de 0,1°C. (DE OLIVEIRA, 2011)

**Escola Superior De Tecnologia – EST**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

#### **4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O procedimento adotado para o acionamento do sistema.

- Ligar o tanque termostático (4).
- Ligar as bombas centrifugas (2), sempre verificando se o nível de água do tanque de armazenamento (1) está na faixa indicada.
- Ligar os termômetros digitais.
- Abrir válvula do fluido externo, ajustando a vazão indicada.
- Abrir válvula do fluido interno, ajustando a vazão indicada.

A prática será realizada em dois experimentos

- Experimento 01

A vazão será selecionada pelo professor tanto para a configuração concorrente como para configuração contracorrente. Apenas três dos quatro termômetros serão ligados, e após o acionamento do sistema esperará 5 minutos e as temperaturas dos três termômetros serão anotadas.

A partir disso, será calculada a temperatura do termômetro que foi desligado.

- Experimento 2

A vazão será selecionada pelo professor tanto para a configuração concorrente como para configuração contracorrente.

A cada 2 minutos serão anotados os valores de temperatura de entrada e saída de ambos os fluidos por um período de 14 minutos.

A partir dos valores obtidos será calculado e abordar-se-á no relatório:

- Medir e definir o algarismo duvidoso;
- Quantidade de calor do fluido quente ( $q_q$ );

**Escola Superior De Tecnologia – Est**  
**Curso De Engenharia Química**  
**Laboratório De Engenharia Química**  
**Operações Unitárias II**

- Quantidade de calor frio ( $q_f$ );
- Comparar e discutir a diferença entre  $q_q$  e  $q_f$ ;
- Calcular o diâmetro hidráulico ( $D_h$ )
- Comparar e discutir a diferença entre o coeficiente global de transferência de calor teórico (Equação 3) e o prático (Equação 4);
- Calcular a Área de troca de calor;
- Calcular o Coeficiente Global de Transferência de Calor;

Dados:

Características	Valor
<b>Tubo Externo</b>	
<b>Diâmetro Nominal</b>	0,02540 m
<b>Diâmetro Externo</b>	0,03370 m
<b>Diâmetro Interno</b>	0,03105 m
<b>Comprimento</b>	1,38 m
<b>Tubo Interno</b>	
<b>Diâmetro Nominal</b>	0,01270 m
<b>Diâmetro Externo</b>	0,02130 m
<b>Diâmetro Interno</b>	0,01905 m
<b>Comprimento</b>	1,50 m

## REFERÊNCIAS

DE OLIVEIRA, Rick Rocha. **Determinação dos Coeficientes de Transferência de Calor em Trocador de Tubos Concêntricos**. Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Manaus – AM. 2011.

DIAS, Ely M. F.; CORTEZ, Bianca L. D.; SILVA, André L. B. **Trocadores De Calor**. Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Manaus – AM. 2019.

DIAS, Ely Matheus F. **Roteiro de Prática de Trocador de Calor**. Universidade Federal do Amazonas – UFAM. Manaus – AM. 2020.

## ANEXOS

## ANEXO A – Tabela das Propriedades Termofísicas da Água Saturada

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada\*

Temperatura, $T$ (K)	Pressão, $p$ (bars) <sup>a</sup>	Volume Específico (m <sup>3</sup> /kg)		Calor de Vaporização, $h_{fg}$ (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade (N · s/m <sup>2</sup> )		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_f \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Temperatura, $T$ (K)
		$v_f \cdot 10^3$	$v_g$		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	$Pr_f$	$Pr_g$			
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	-46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	664	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373,15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373,15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400
410	3,302	1,077	0,553	2153	4,278	2,221	200	13,42	688	28,2	1,24	1,054	51,5	952	410
420	4,370	1,088	0,425	2123	4,302	2,291	185	13,79	688	29,8	1,16	1,075	49,4	1010	420
430	5,699	1,099	0,331	2091	4,331	2,369	173	14,14	685	30,4	1,09	1,10	47,2		430