



**PAULA FERNANDA ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE UM TROCADOR DE CALOR DE PLACAS EM  
UMA INDÚSTRIA DE ADESIVOS**

**LAVRAS – MG  
2022**

**PAULA FERNANDA ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TROCA TÉRMICA EM UMA INDÚSTRIA DE  
ADESIVOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof.º Drº Luciano Jacob Correa  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao Universo pela oportunidade de viver tudo isso.

A minha Mãe Romilda, por ser meu alicerce, ao meu Pai Tadeu, por ser meus exemplos de força, minha Irmã Ana Paula, por ser minha pessoa. Vocês são e sempre serão meu apoio, obrigada por cuidarem e apoiarem meus sonhos. Sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço aos professores que meu caminho cruzou, por não só ensinarem todo o conhecimento técnico, mas também por me mostrarem que a graduação é mais do que isso.

As entidades G-Óleo, NEPetro e PQ. Jr, que foram essenciais na minha trajetória.

Ao meu orientador Luciano, por toda paciência e atenção, sei que não foi uma tarefa muito fácil.

Agradeço ao meu companheiro de vida, João Pedro, por me entender, apoiar e me lembrar sempre que sou capaz.

Aos que tenho a honra de chamar de amigos, Maria, Luísa, Carla, Fernanda, Natália, Davi e Mylene, vocês foram essenciais nessa fase. Obrigada por todos os momentos, experiências e histórias, vocês sempre estarão comigo. A minha amiga Camila, por todo apoio, paciência e ajuda, por sempre prontificar independente do que seja.

A H.B. Fuller, que acreditou em meu potencial para contribuir com a empresa e que apoio meu desenvolvimento diariamente. Estendo ao, meu gestor Filipe Nunes, que hoje além de gestor tornou-se meu amigo. Por mais profissionais como você.

A todos que cruzaram meu caminho e me fizeram continuar enquanto queria desistir, a minha eterna gratidão.

*“Não importa o que aconteça, continue a nadar”. – Dory, Procurando Nemo.*

## RESUMO

Os trocadores de calor são equipamentos necessários nas indústrias químicas. São responsáveis por realizar a transferência de calor de um corpo para outro por meio de três mecanismos: condução, convecção e radiação. Há diversos tipos de trocadores de calor e um dos mais comuns e utilizados são os de placas. Para se realizar a análise de trocadores de calor são indicados dois métodos, a diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{ml}$ ) e a efetividade-Nut ( $\epsilon$ -Nut). O  $\Delta T_{ml}$  é indicado para quando se conhece as temperaturas de entrada e saída e a área do processo, já o  $\epsilon$ -Nut é para quando se conhece apenas as temperaturas de entrada dos fluidos. O trabalho proposto, tem como objetivo avaliar o trocador de calor de placas de uma indústria química de adesivo em um processo de resfriamento de *pillows*. O fluido em questão para ambas as correntes é a água, as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos foram medidas e a área foi obtida pela ficha de especificação do equipamento. Calculou-se e realizou uma análise das taxas de transferência de calor, realizando uma comparação entre o valor de projeto, foi de 139,789 kW e o real 9,903 kW. O  $\Delta T_{ml}$  real foi de 0,577 °C e o  $\Delta T_{ml}$  de projeto 5 °C. A partir dos resultados de taxa de transferência de calor e  $\Delta T_{ml}$ , notou-se que existem ineficiências no processo de resfriamento. Também foi comparado os resultados do coeficiente global de transferência de calor, foi um parâmetro obtido através do cálculo da taxa de calor e  $\Delta T_{ml}$ , o coeficiente global com incrustação real foi de 1290,733 W/m<sup>2</sup>.K e para o projeto com incrustação 1470,069 W/m<sup>2</sup>.K. Portanto sistema de resfriamento se mostra deficiente, sendo necessários realizar projetos de melhorias no processo e limpezas periódicas no trocador de calor, visando a diminuição das incrustações.

**Palavras-chave:** Indústria química, *pillows*. Trocadores de calor. Diferença de temperatura média logarítmica. Coeficiente global de transferência de calor. Efetividade-Nut.

## ABSTRACT

Heat exchangers are necessary equipment in chemical industries. They transferred heat from one body to another through three mechanisms: conduction, convection, and radiation. There are several types of heat exchangers and one of the most common and used are plate heat exchangers. To perform the analysis of heat exchangers, two methods are indicated, the logarithmic mean temperature difference ( $\Delta T_{ml}$ ) and the Nut-effectiveness ( $\epsilon$ -Nut). The  $\Delta T_{ml}$  is indicated for when the inlet and outlet temperatures and the process area are known, while the  $\epsilon$ -Nut is for when only the inlet temperatures of the fluids are known. The proposed work aims to evaluate the plate heat exchanger of an adhesive chemical industry in a pillows cooling process. The fluid in question for both streams is water, the inlet and outlet temperatures of the fluids were measured, and the area was obtained from the equipment specification sheet. It was calculated and performed an analysis of heat transfer rates, making a comparison between the design value was 139,789 kW and the real 9,903 kW. Actual  $\Delta T_{ml}$  was 0.577 °C and design  $\Delta T_{ml}$  5 °C. From the results of heat transfer rate and  $\Delta T_{ml}$ , it was noticed that there are inefficiencies in the cooling process. The results of the global heat transfer coefficient were also compared, it was a parameter obtained by calculating the heat rate and  $\Delta T_{ml}$ , the global coefficient with real fouling was 1290.733 W/m<sup>2</sup>.K and for the project with fouling 1470.069 W/m<sup>2</sup>.K. Therefore, the cooling system is deficient, and it is necessary to conduct projects to improve the process and periodically clean the heat exchanger, to reduce incrustations.

**Keywords:** Chemical industry, pillows. Heat exchangers. Logarithmic mean temperature difference. Global heat transfer coefficient. Effectiveness-Nut.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ramificações da indústria química em diversos setores. ....	14
Figura 2 - Saches – <i>Pillows</i> .....	16
Figura 3 - Regimes de escoamento contracorrente e paralelo e seus perfis de temperatura associados.....	21
Figura 4 - Trocador de calor de placas. ....	22
Figura 5 - Trocadores de calor de placas aletadas: (a) simples; (b) perfurado; (c) serrilhada; (d) espinha de peixe.....	23
Figura 6 - Trocadores de calor de tubos aletados: (a) aleta de tubo achatada; (b) aleta de tubo redondo.....	23
Figura 7 - Representação de transferência de calor através de uma parede.....	24
Figura 8 - Trocador de calor bitubular em contracorrente com as temperaturas dos fluidos de entrada e saída.....	28
Figura 9 - Esquemática do trajeto dos fluidos. Fonte: Da autora (2022). ....	31
Figura 10 - Mostradores de temperaturas analógicos.....	32
Figura 11 - Termômetro digital de espeto <i>Instrutherm</i> modelo TE-500.....	32
Figura 12 - Processo de resfriamento dos <i>pillows</i> .....	33
Figura 13 - Simulação dos perfis e temperatura. (a) real; (b) projeto. ....	39

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Relações de efetividade para diferentes fluxos.....	30
Quadro 2 - Fator de incrustação $R_d$ em equipamento de transferência de calor.....	36



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores aproximados do coeficiente convectivo de transferência de calor.....	18
Tabela 2 - Temperatura real do processo de troca térmica.....	33
Tabela 3 - Média das temperaturas de fluido quente e frio de entrada e saída e temperatura de saída do <i>chiller</i> .....	34
Tabela 4 - Vazões reais dos fluidos. ....	34
Tabela 5 - Condições de operações projetadas. ....	34
Tabela 6 - Dados da ficha de especificação.....	35
Tabela 7 - Calor específico e densidade para os fluidos frio e quente. ....	35
Tabela 8 - Taxa de troca térmica e capacidades para o projeto e real.....	38
Tabela 9 - Resultados para $\Delta T_{ml}$ .....	39
Tabela 10 - Valores de coeficientes globais reais e de projeto com incrustação. ....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Indústria química</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Adesivos industriais</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Adesivos hot melts</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Transferência de calor</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Condução</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Convecção</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Radiação</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Trocadores de Calor</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Tipos de trocadores de calor</b> .....	<b>20</b>
<b>3.4</b>	<b>Coeficiente global de transferência de calor</b> .....	<b>23</b>
<b>3.5</b>	<b>Fator de incrustação</b> .....	<b>25</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise de trocadores de calor</b> .....	<b>25</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Diferença de temperatura média logarítmica</b> .....	<b>27</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Efetividade-NUT</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Condições reais de operação</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Obtenção das temperaturas</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Vazões</b> .....	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Dados do projeto do trocador de calor</b> .....	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Calor específico e densidade dos fluidos</b> .....	<b>35</b>
<b>4.4</b>	<b>Fator de incrustação</b> .....	<b>35</b>
<b>4.5</b>	<b>Desenvolvimento dos cálculos</b> .....	<b>36</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Hipóteses adotadas para os cálculos</b> .....	<b>36</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Capacidade térmica (Cf e Cq)</b> .....	<b>37</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Taxa de calor trocado (q)</b> .....	<b>37</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Diferença de temperatura média logarítmica (<math>\Delta T_{ml}</math>)</b> .....	<b>37</b>

4.5.5	Coeficiente global de transferência de calor (U).....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
5.1	Comparação das diferenças de temperatura média logarítmica .....	39
5.2	Coeficiente global de transferência de calor .....	40
6	CONCLUSÃO .....	41
	REFERÊNCIAS .....	43

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1880, as indústrias químicas estavam em pleno desenvolvimento na Europa, principalmente no ramo têxtil e de corante, incentivado pela Revolução Industrial. Tanto na Europa como nos Estados Unidos da América, já proliferavam os complexos industriais. O crescimento numeroso das indústrias era facilitado pela rápida disseminação e acesso ao conhecimento químico. Devido ao vasto crescimento, conquistou um lugar de grande relevância na economia (RUBEGA; PACHECO, 2020).

A indústria química possui um papel central na economia de diversos países, ocupando a quinta posição de maior PIB mundialmente (BRAIN & COMPANY, 2021). As indústrias químicas globais nos últimos anos, desfrutaram de uma alta demanda e de margens elevadas, à medida em que os preços globais atingiram maiores valores em seus últimos dez anos (GALEMBECK *et al*, 2007). O segmento de produtos químicos fornece insumos para diversos setores da economia, sendo fundamental em diversos processos industriais.

O processo produtivo de uma indústria consiste em uma série de operações coordenadas, variando conforme o produto, ramo e tamanho da indústria. Na indústria química, os processos de transformação da matéria-prima podem conter processos físicos, químicos e bioquímicos. O processo físico compreende o transporte do material por tubulações, geralmente por meio de bombas, compressores ou sopradores, para fazer a transferência. Líquidos e gases, são aquecidos ou resfriados por trocadores de calor e torres de resfriamento. A separação é fundamental no processo físico, no qual pode ser empregado centrifugas, decantadores, filtros, secadores e outros a depender do produto. Os processos químicos são responsáveis pela transformação das matérias primas em produtos, por meio de reações químicas e bioquímicas usando os reatores.

Entre as diversas indústrias químicas encontra-se a indústria de adesivos, onde produzem variados tipos de adesivos/colas com uma vasta aplicação, como no mercado automotivo e rotulação. Atualmente no mercado brasileiro, os adesivos *hot melts*, tem sido uma das mais comercializadas e ela se apresenta ao mercado no formato de: pellets, bastões e sachês-*pillows*. Um processo de extrema importância para a formação destes tipos de adesivos, é o resfriamento, pois proporciona o formato final do produto. Para se ter um o devido resfriamento, é necessário o controle da temperatura para que se consiga atingir o objetivo final do processo.

A temperatura de operação dos processos é de suma importância, pois conta com a responsabilidade da ocorrência ou não de reações químicas, rendimentos e velocidades. Desta forma, um equipamento que possibilitam o estabelecimento de uma temperatura ideal em um

processo, do ponto de vista da segurança e eficiência da produção são os trocadores de calor (PROPEQ, 2020).

Os trocadores de calor promovem a transferência de calor. A transferência de calor, em conceito, é a energia térmica em trânsito devido a diferença de temperatura entre dois corpos (INCROPERA; DEWITT, 2008). Há três mecanismos pelos quais podem ocorrer a transferência: convecção, condução e radiação. É um aspecto predominante na maioria dos dispositivos de conservação e produção de energia, é aplicada em benefício da sociedade com a utilização de diversos tipos de equipamento, como o trocador de calor.

Conforme Incropera *et al.* (2008), trocadores de calor são equipamentos que proporcionam a transferência de calor entre dois fluidos escoando em diferentes temperaturas, geralmente separados por uma interface sólida.

Com o avanço do desenvolvimento tecnológico, os processos são otimizados e apresentam maior eficiência, exigindo uma melhor otimização dos equipamentos envolvidos naqueles processos. No quesito de área térmica, os trocadores de calor representam uma grande fatia aos quais esforços têm sido aplicados em termos de pesquisa e desenvolvimento (SILVA *et al.*, 2015).

Os trocadores de calor geralmente são classificados de acordo com o tipo de construção, tipo de contato e configuração dos escoamentos fluidos. No escoamento em paralelo, os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e deixam o trocador pelo mesmo lado. Já no escoamento contracorrente, os fluidos entram no sistema por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e saem do sistema por extremidade opostas (CHAVES *et al.*, 2015).

Em indústrias químicas, os trocadores de calor do tipo placas são comumente encontrados e proporcionam facilidade de acesso à superfície de troca, baixo custo operacional, fácil manutenção, permite alteração da área de troca térmica. Disposição de espaço é uma particularidade de grande atenção nas indústrias, devido a mudança/adaptação do *layout* para o processo, gerar custos ou até mesmo não ter espaço disponível e neste tipo de trocador temos a otimização de espaço.

Segundo Ristof e Mattjie (2013), para o estudo de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), que demonstra a contribuição da resistência do material e dos fluidos à transferência de calor. O fator de incrustação, é um fenômeno que também afeta o coeficiente global, sendo considerado um dos grandes problemas na indústria (SIQUEIRA; GUTIERREZ, 2015). A taxa de transferência de calor entre dois

fluidos no trocador de calor, depende da magnitude da diferença de temperatura no local, que varia ao longo do equipamento (CHAVES *et al.*, 2015).

Para a análise do desempenho dos trocadores de calor, corriqueiramente métodos têm sido publicados por diferentes autores, entretanto, os amplamente usados estão os da média logarítmica da diferença de temperatura ( $\Delta T_{ml}$ ) e efetividade-NUT ( $\epsilon$ -NUT). Sucintamente, estes métodos exploram a razão entre a taxa de transferência de calor real e taxa máxima possível (PERUSSI, 2010).

Uma ineficiência no processo de resfriamento de *pillows*, pode ocasionar má formação, blocagem, formato irregular entre outros. Portanto, o trabalho tem como objetivo principal analisar a eficiência do processo de resfriamento de *pillows* realizado pelo trocador de calor de placas em contracorrente, para evitar os problemas mencionados acima.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação do trocador de calor do tipo placas em contracorrente implementado na indústria em questão. No processo de resfriamento dos *pillows*, tendo como comparativo os dados de projeto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar as condições atuais do processo de troca térmica;
- Comparar com os dados com o de implementação fornecidos pela ficha de especificação do equipamento;
- Analisar a eficiência atual do trocador de calor pela diferença de temperatura média logarítmica e o coeficiente global de troca térmica em vista do que foi projetado.

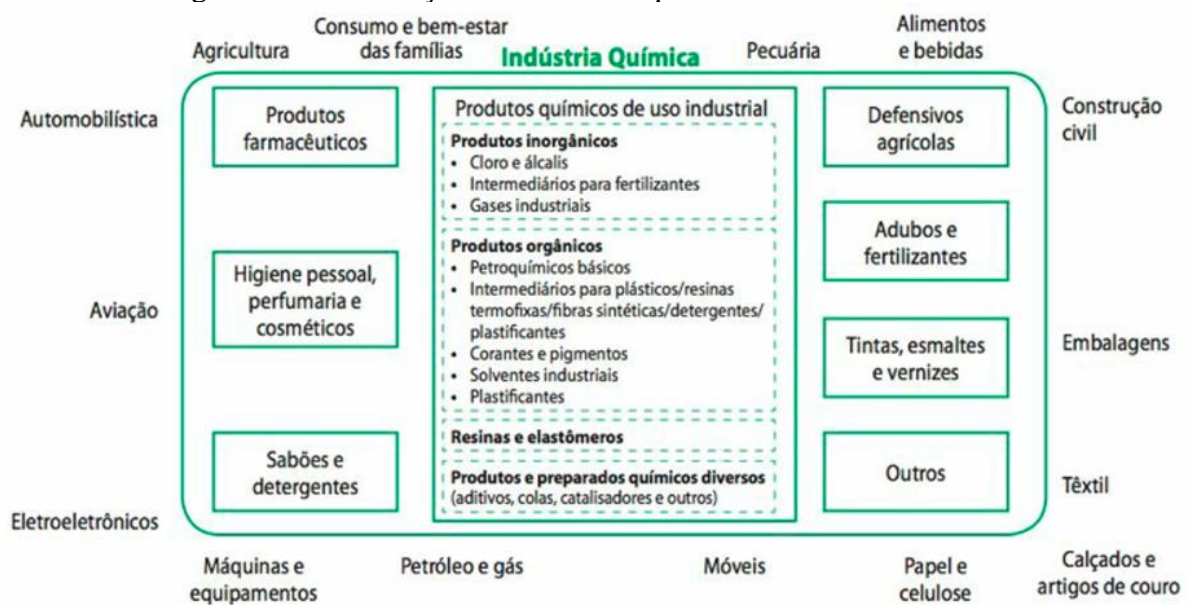
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Indústria química

Segundo Gauto e Rosa (2013), a indústria química é responsável por realizar transformações de substâncias em escala industrial, sendo possível transformar substâncias que se encontram na natureza, que não pode ser usada diretamente, em substâncias com característica desejáveis e comercializáveis.

A indústria química ocupa um dos maiores setores industriais mundialmente e no Brasil, o segundo maior setor da indústria de transformação. A grandiosidade deste setor é explicada pela onipresença dos produtos da indústria química e sua essencialidade em qualquer atividade humana, desde construções civis à produção de alimentos (GALEMBRECK, *et al.* 2007). Na Figura 1, temos uma representação da ampla gama de presença da indústria química.

Figura 1 - Ramificações da indústria química em diversos setores.



Fonte: Gauto e Rosa (2013).

Entre os diversos setores que a indústria química engloba, encontramos o setor de adesivos industriais advindos do grupo representada na Figura 1 por produtos químicos de uso industrial.



### 3.1.1 Adesivos industriais

O adesivo pode ser definido como um material no qual quando aplicado em superfícies de materiais pode uni-los e resistir à separação. O material em que o adesivo/cola é depositado, é chamado de substratos. Os adesivos possuem uma vasta aplicação, atendendo diversos mercados, tais como: automotivo, beleza, construção civil, eletrônicos, higiênico, embalagem, conversão de papel, madeira e compósitos, fitas e rótulos e, diversos outros (H.B. FULLER, 2022).

Alguns dos tipos de adesivos industriais estão mostrados abaixo:

- Adesivos instantâneos;
- *Hot melts*;
- Adesivos à base de solvente;
- Adesivos à base de água;
- Reativos químicos;
- Polímeros.

A linha de *hot melt* está entre as mais utilizada atualmente no mercado brasileiro, sendo ideais para uso em produtos criados em linhas de fabricação automatizadas que exigem rápida formação de ligação e será explorada no tópico a seguir.

### 3.1.2 Adesivos *hot melts*

Os adesivos *hot melts*, são materiais sólidos em temperatura ambiente que se fundem a temperaturas relativamente baixas (acima de 80 °C). São de colagem rápida, alto desempenho e fáceis de aplicar em uma ampla gama de aplicações. Os adesivos *hot melt* oferecem força de adesão rápida e não requerem secagem. Atualmente no mercado os adesivos *hot melts* podem ser encontrados na forma de saches, bastões e *pellets* (granulados).

Os *pellets* se caracterizam por pequenas esferas formadas pelo próprio composto do adesivo solidificado. Já os bastões, como próprio nome diz, são adesivos em forma de bastões, onde são usados com aplicadores, que possui o nome comercial de pistola. Os saches são comumente conhecidos como *pillow*, devido ao seu formato se assemelhar com um travesseiro, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Sachês – *Pillows*.



Fonte: H.B. Fuller (2022).

O processo para produção de adesivos em formato de *pillows*, geralmente são divididos em duas etapas: a primeira é a formulação do adesivo (consistindo o carregamento de matéria primas, homogeneização, fusão e reação) e a segunda é o envase (moldagem do formato, resfriamento, secagem e colocação na embalagem final).

O resfriamento é um típico processo em que ocorre a transferência de calor, essa transferência é de fundamental importância para a moldagem do formato necessário e um equipamento muito utilizado para este fim são os trocadores de calor.

### **3.2 Transferência de calor**

Há três maneiras de transferir energia: condução, convecção e radiação. Todo processo de transferência de calor envolve um ou mais desses modos. No trocador de calor, a transferência de energia por radiação que é proporcionada por meio de ondas eletromagnéticas, é considerada desprezível.

#### **3.2.1 Condução**

Segundo Welty, Rorrer e Foster (2017), a transferência de energia por condução acontece de duas formas: A primeira forma é que envolve interação molecular; em que uma grande agitação de uma molécula em um maior nível de energia (temperatura) transmite energia para moléculas adjacentes à níveis inferiores de energia. A condução, por menor que seja, está presente em todos os sistemas que possui um gradiente de temperatura e em que sólido, líquido ou gás, estejam presentes e a segunda forma de transferência de calor por condução é por elétrons livres; esse mecanismo é principalmente utilizado em sólidos metálicos puros. A capacidade de condução de calor dos sólidos varia diretamente com a concentração de elétrons livres (WELTY; RORRER; FOSTER, 2014).

Como a condução de calor é principalmente um fenômeno molecular, temos uma expressão similar à usada na transferência molecular de momento, logo a Equação 1 foi primeiro estabelecida em 1822 por Fourier na forma, a seguir.

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

Onde:

$q_x$  = Taxa de transferência de calor na direção  $x$  [W];

$A$  = Área normal à direção de transferência de calor [m<sup>2</sup>];

$\frac{dT}{dx}$  = Gradiente de temperatura na direção  $x$  [K/m];

$k$  = Condutividade térmica [W/m·K].

A razão da parte esquerda da Equação 1, com as dimensões de W/m<sup>2</sup>, é o fluxo de calor na direção  $x$ . Uma forma mais generalizada do fluxo de calor é a Equação 2, que expressa o fluxo como proporcional ao gradiente de temperatura.

$$\frac{q}{A} = -k \nabla T \quad (2)$$

O sinal negativo da Equação 2, indica que a taxa de calor acontece na direção de um gradiente negativo de temperatura. Esta equação é conhecida como a primeira Lei de Fourier da Condução de Calor.

A condutividade térmica,  $k$ , dada pela Equação 1, é considerada independente da direção na Equação 2, sendo assim, essa expressão é usada somente a meio isotrópico. A condutividade térmica é uma propriedade de um meio condutor, é especialmente uma função da temperatura, tendo variações significativas com pressão somente em casos de gases sujeitos a altas pressões (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

### 3.2.2 Convecção

A transferência de calor em razão da convecção abrange a troca de energia entre uma superfície e um fluido próximo. Há dois tipos de convecção, a natural e a forçada. A convecção natural é quando um fluido mais quente ou mais frio, próximo a um contorno sólido causa circulação por causa da variação de densidade resultante da diferença de temperatura em toda região do fluido. Já a convecção forçada, é quando um fluido escoar por uma superfície sólida

impulsionada por um intermediário externo, como bombas ou ventiladores (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

De acordo com Welty, Rorrer e Foster (2017), a taxa de transferência de calor por convecção é conhecida também como equação de taxa de Newton ou por Lei de Resfriamento de Newton, apresentada pela Equação 3.

$$\frac{q}{A} = h\Delta T \quad (3)$$

Onde:

$q$  = Taxa de transferência convectiva [W];

$A$  = Área normal à direção de transferência de calor [m<sup>2</sup>];

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [K];

$h$  = Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>·K].

Mesmo quando um fluido está escoando de forma turbulenta sobre uma superfície, há uma camada, extremamente fina, próxima da superfície, escoando de forma laminar. Essa camada limiar é chamada de filme, o filme de fluido usualmente apresenta a resistência controladora da transferência de calor por convecção e o coeficiente  $h$  é frequentemente chamado de coeficiente de filme (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017). Na Tabela 1 está apresentada alguns intervalos de valores de  $h$  para mecanismos distintos de convecção.

Tabela 1 - Valores aproximados do coeficiente convectivo de transferência de calor.

Mecanismo	$h$ , Btu/h ft <sup>2</sup> °F	$h$ , W/ m <sup>2</sup> . K
Convecção livre, ar	1–10	5–50
Convecção forçada, ar	5–50	25–250
Convecção forçada, água	50–3000	250–15.000
Água em ebulição	500–5000	2500–25.000
Condensação de vapor de água	1000–20.000	5000–100.000

Fonte: Welty, Rorrer e Foster (2017).

### 3.2.3 Radiação

A transferência de calor por radiação, diferente da convecção e condução, não precisa de um meio para a sua propagação. Esse tipo de mecanismo de transferência de calor, é máximo

quando as duas superfícies que estão trocando energia são separadas por um vácuo perfeito (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).

A radiação térmica é associada a taxa, na qual a energia é emitida pela matéria como uma consequência de sua temperatura. O mecanismo está atrelado com a energia liberada como um resultado de oscilações ou transições de vários elétrons que compõe a matéria. As oscilações, são sustentadas pela energia interna e consequentemente pela temperatura da matéria. Desse modo, a emissão de radiação térmica é associada as condições excitadas termicamente no interior da matéria (BERGMAN; LAVINE, 2019).

De acordo com Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), a taxa de emissão de energia de um radiador perfeito ou corpo negro, é representado pela Equação 4.

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 \quad (4)$$

Onde:

$q$  = Taxa de emissão de radiação [W];

$A$  = Área de emissão da superfície [m<sup>2</sup>];

$T$  = Temperatura absoluta [K];

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann, igual a  $5,676 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>. K<sup>4</sup>].

### 3.3 Trocadores de Calor

Segundo Bergman e Lavine (2019), os trocadores de calor são equipamentos responsáveis por realizar o processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida. Os trocadores de calor diferem de câmaras de mistura, pois não permitem a mistura dos fluidos envolvidos. A transferência de calor nesses equipamentos frequentemente compreende a convecção em cada fluido e condução através da parede ou placa que os separa (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

Para se realizar análise de trocadores de calor, é adequado trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor  $U$ , que indica a contribuição de todos os efeitos sobre a transferência de calor. A taxa de transferência de calor depende da magnitude da diferença de temperaturas entre os fluidos no local, que varia ao longo do trocador de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

### **3.3.1 Tipos de trocadores de calor**

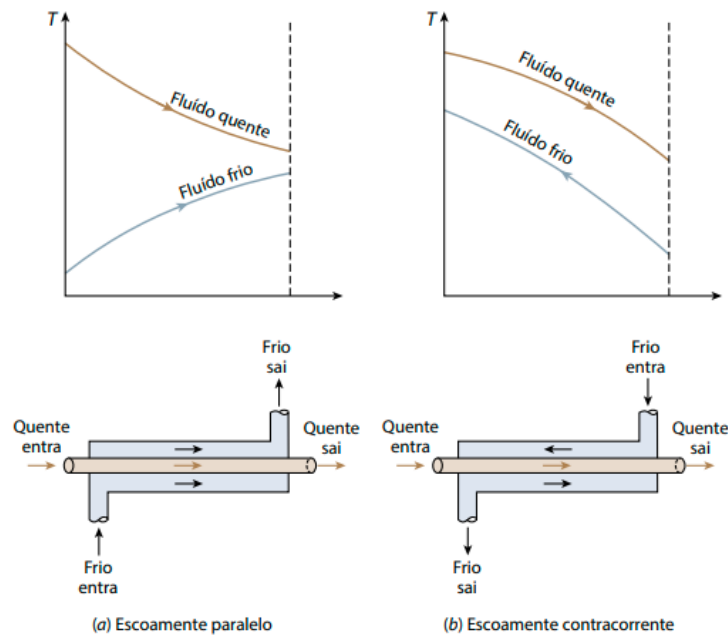
Há diversos tipos de trocadores de calor, os quais são classificados conforme a configuração do escoamento, tipo de contato e o tipo de construção (INCROPERA *et al*, 2008).

#### **3.3.1.1 Tubular**

São construídos de tubos circulares, tipicamente constituídos por um tubo inserido concentricamente em outro de diâmetro maior com medidas apropriadas, de forma a direcionar o fluxo, fazendo com que um fluido flua por dentro do tubo e o outro por fora dos tubos. São considerados de design flexíveis, podendo ser classificados como: bitubular, casco e tubo e tipo tubo espiral.

Dessa forma, existem dois tipos de configuração de fluxo, escoamento paralelo se os fluidos escoam na mesma direção; escoamento contracorrente se os fluidos escoam em sentidos opostos e escoamento cruzado se ambos os fluidos escoam em ângulos retos em relação ao outro (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Na Figura 3, é possível notar o comportamento da temperatura ao longo do comprimento do trocador de calor, para as diferentes configurações. A partir dos perfis, pode-se analisar que a configuração contracorrente é mais efetiva, devido a temperatura de saída do fluido frio ultrapassar a do fluido quente, enquanto na configuração em paralelo, os fluidos na saída tendem a sair na mesma temperatura.

Figura 3 - Regimes de escoamento contracorrente e paralelo e seus perfis de temperatura associados.



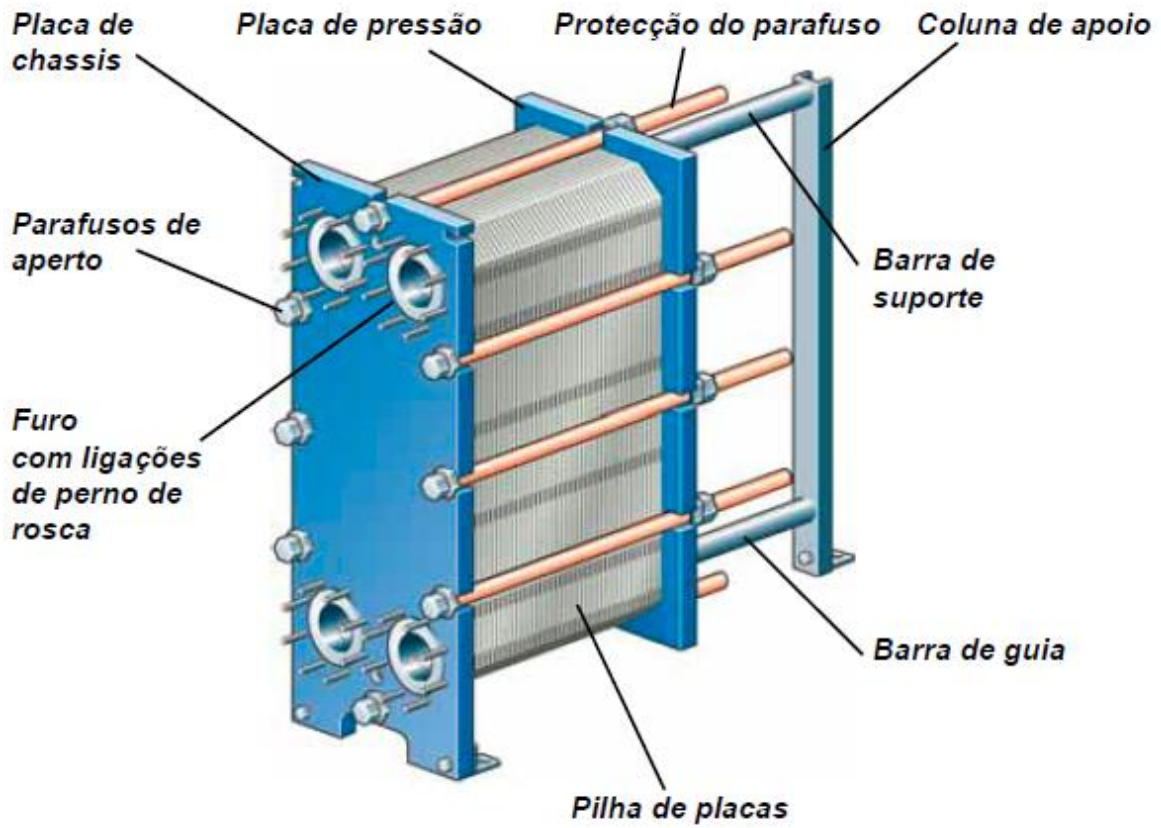
Fonte: Çengel e Cimbala (2015).

### 3.3.1.2 Placas

O trocador de calor do tipo placas tem uma ampla utilização, ele consiste em uma série de placas planas corrugadas com passagens para o escoamento, como mostra na Figura 4. O escoamento dos fluidos quentes e frios, acontecem de forma alternadas, sendo assim, cada escoamento de fluido frio é cercado por dois escoamentos quente, originando uma transferência de calor muito eficiente (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Configurações de projeto e vedações apropriadas permitem que uma pilha de placas seja mantida unida por um parafuso de compressão juntando as placas finas. As vedações evitam a mistura dos dois fluidos e o vazamento para fora, bem como o direcionamento dos fluidos nas placas conforme desejado (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012). Ainda, o trocador de calor de placas pode ser acrescido de placas com o aumento da demanda de transferência de calor.

As principais características de acordo com Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), são as limitações dos fluxos de fluidos com pressões abaixo de 25 bar e temperatura a cerca de 250 °C, altos coeficientes de troca térmica, elevadas queda de pressão e uma alta tensão de cisalhamento local, o que faz diminuir as incrustações.

Figura 4 - Trocador de calor de placas.



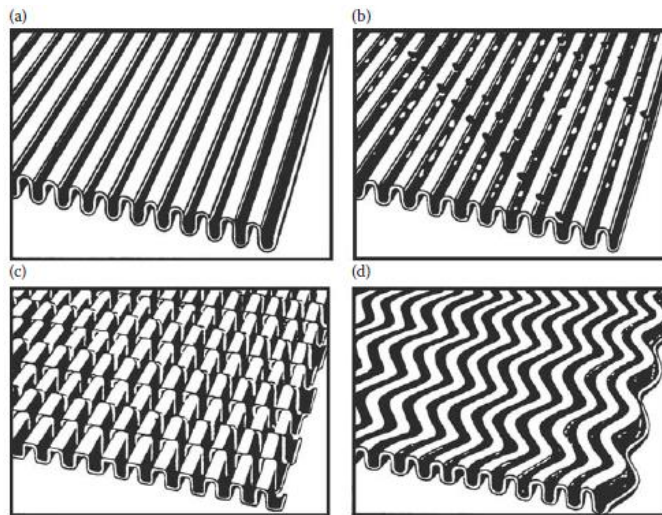
Fonte: Alfa Laval (2012).

### 3.3.1.3 Superfície estendida

São dispositivos com aletas na superfície primária de transferência de calor podendo ser tubular ou de placas, apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente, com o objetivo de aumentar a área de transferência de calor. Como é sabido, o coeficiente de transferência de calor do lado do gás é menor do que os do lado do líquido, a transferência de calor por superfícies aletadas são usadas no lado do gás para aumentar a área de transferência de calor. As aletas são amplamente utilizadas em trocadores de calor gás-gás e gás-líquido sempre que o coeficiente de transferência de calor em um ou ambos os lados são baixos e há necessidade de um trocador de calor compacto (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).

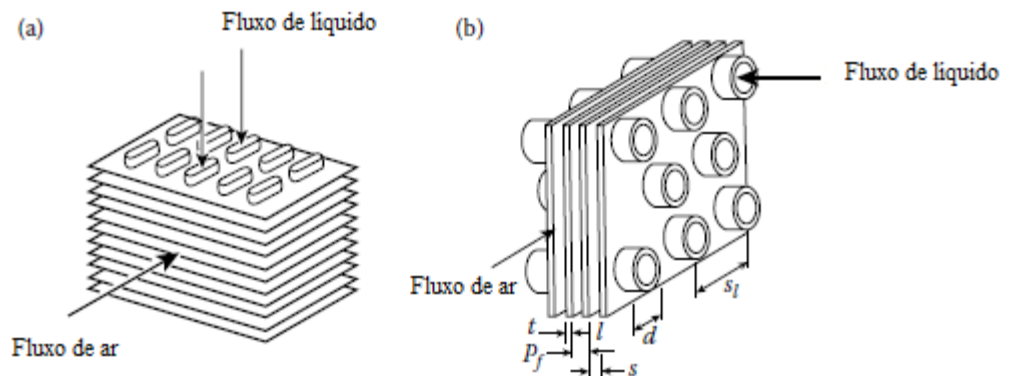


Figura 5 - Trocadores de calor de placas aletadas: (a) simples; (b) perfurado; (c) serrilhada; (d) espinha de peixe.



Fonte: Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012).

Figura 6 - Trocadores de calor de tubos aletados: (a) aleta de tubo achatada; (b) aleta de tubo redondo.



Fonte: Adaptada de Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012).

Trocadores de calor geralmente são nomeados de modo a refletir a aplicação. Um condensador é um trocador de calor em que um dos fluidos é resfriado e condensado ao escoar. Uma caldeira é um tipo de trocador de calor em que um dos fluidos absorve o calor e vaporiza (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

### 3.4 Coeficiente global de transferência de calor

Como citado anteriormente, um trocador de calor usualmente envolve dois escoamentos de fluidos separados por uma parede sólida. Primeiro, o calor é transferido do fluido para a

parede por convecção, através da parede por condução e através da parede para o fluido frio por convecção novamente.

A partir da distribuição citada, a rede de resistência térmica associado ao processo de transferência de calor envolve uma resistência de condução e duas de convecção. A resistência térmica da parede da placa, considerando um trocador de calor de placas, é dado pela Equação 5 e representada pela Figura 7 (ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

$$R_{t\acute{e}rmica} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (5)$$

Onde:

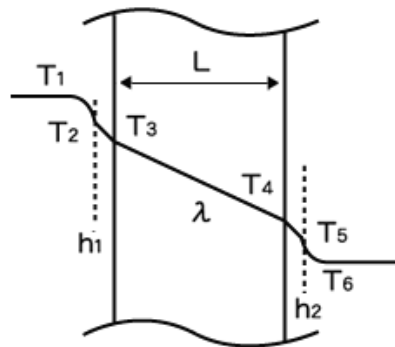
$R_{t\acute{e}rmica}$  = Resistência térmica [W/m<sup>2</sup>.K];

$h$  = Coeficiente de transferência de calor por convecção, [W/ m<sup>2</sup>.K];

$L$  = Espessura da parede [m];

$k$  = Condutividade térmica, [W/m.K].

Figura 7 - Representação de transferência de calor através de uma parede.



Fonte: TVL (2022).

De posse da resistência térmica, é possível calcular o coeficiente global de transferência de calor usando a Equação 6.

$$U = \frac{1}{R_{t\acute{e}rmica}} \quad (6)$$

Onde:

$U$  = Coeficiente global de transferência de calor [W/m<sup>2</sup>.K];

$R_{t\acute{e}rmica}$  = Resistência térmica [W/m<sup>2</sup>.K].

### 3.5 Fator de incrustação

A eficiência dos trocadores de calor normalmente se deteriora com o passar do tempo devido ao acúmulo de material nas superfícies de transferência de calor. A camada de depósitos causa uma resistência adicional a transferência de calor, o que ocasiona uma resistência na taxa de transferência de calor. Esses acúmulos que afetam a transferência de calor são representados pelo fator de incrustação,  $R_d$  (ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

Em um trocador de calor novo, o fator de incrustação é zero, porém à medida que é usado, surgem os depósitos sólidos nas superfícies. O fator de incrustação depende da temperatura de funcionamento, velocidade dos fluidos e com o tempo de uso. A incrustação é proporcional ao aumento da temperatura e inversamente proporcional a velocidade. Conforme, Kreith e Bohn (2003), o fator de incrustação pode ser determinado a partir da Equação 7.

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U} \quad (7)$$

Onde:

$R_d$  = Fator de incrustação (ou resistência térmica unitária) [ $m^2.K/W$ ];

$U_d$  = Coeficiente global de transferência de calor do trocador com incrustação [ $W/m^2.K$ ];

$U$  = Coeficiente global de transferência de calor do trocador não incrustado [ $W/m^2.K$ ].

Os valores de fatores de incrustação são encontrados em manuais, como esperado, há uma considerável incerteza nesses valores e eles devem ser usados como guia na seleção e avaliação de trocadores de calor, para considerar os efeitos previsíveis das incrustações sobre a transferência de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

### 3.6 Análise de trocadores de calor

Os trocadores de calor são comumente utilizados, muitas das vezes é necessário escolher qual o melhor trocador de calor que permite alcançar as especificações do processo, para isso, são utilizados dois métodos: Diferença de temperatura média logarítmica (LMDT ou  $\Delta T_{ml}$ ) e Efetividade-NUT ( $\epsilon$ -NUT) (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Conforme Bergamn e Lavine (2019), para analisar o desempenho de um trocador de calor, é fundamental relacionar a taxa total de transferência de calor a temperaturas de entradas e saídas dos fluidos, coeficiente global de transferência de calor e a área superficial total

disponível para transferência. A partir da aplicação de balanços globais de energia nos fluidos frio e quente, tem-se a relação apresentada pela Equação 8.

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (8.a)$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (8.b)$$

Onde:

$q$  = Taxa de transferência de calor [W];

$\dot{m}_q$  e  $\dot{m}_f$  = vazão mássica do fluido quente e frio [kg/s];

$c_{p,q}$  e  $c_{p,f}$  = calor específico do fluido quente e frio [kJ/kg.K];

$T_{q,ent}$  e  $T_{f,ent}$  = temperatura de entrada do fluido quente e frio [K];

$T_{q,sai}$  e  $T_{f,sai}$  = temperatura de saída do fluido quente e frio [K].

As expressões  $\dot{m}_q c_{p,q}$  pode ser chamada de  $C_q$  e a  $\dot{m}_f c_{p,f}$  de  $C_f$ , sendo as taxas de capacidade térmica dos fluidos, quente e frio respectivamente (ÇENGEL; GHAJAR, 2015). Ressalta-se que para as equações acima, assumiu-se que os fluidos não mudam de fase e os calores específicos constantes.

Nota-se que é apresentado as temperaturas médias dos fluidos, então é proporcional dizer que a variação de temperatura é a diferença da temperatura quente e fria, obtendo-se uma expressão de extensão da lei de resfriamento de Newton, com o coeficiente global de transferência de calor  $U$  usado no lugar de um único coeficiente de transferência de calor  $h$ . exposta na Equação 9.

$$q = UA(\Delta T_m) \quad (9)$$

Onde:

$q$  = Taxa de transferência de calor [W];

$U$  = Coeficiente global de transferência de calor do trocador não incrustado [W/m<sup>2</sup>.K];

$A$  = área [m<sup>2</sup>];

$\Delta T_m$  = Média de diferenças de temperatura [K].

Contudo, antes de poder realizar a análise, se faz necessário especificar o  $\Delta T_m$  de forma apropriada.

### 3.6.1 Diferença de temperatura média logarítmica

Trocadores de calor em situações reais, não mantêm a temperatura entre os fluidos de trabalho constante por todo comprimento do equipamento, pois conforme o fluido percorre uma distância, maior a troca térmica, conseqüentemente a temperatura muda, devido a isso, se faz necessário utilizar uma análise diferente da variação de temperatura e não somente a temperatura do fluido quente decrescida do fluido frio (GARDENAL; SGUARIO, 2016).

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), a diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{ml}$ ), é um método que melhor estima a temperatura do fluido, considerando todas as seções do trocador. A temperatura corrigida se dá pela Equação 10.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (10)$$

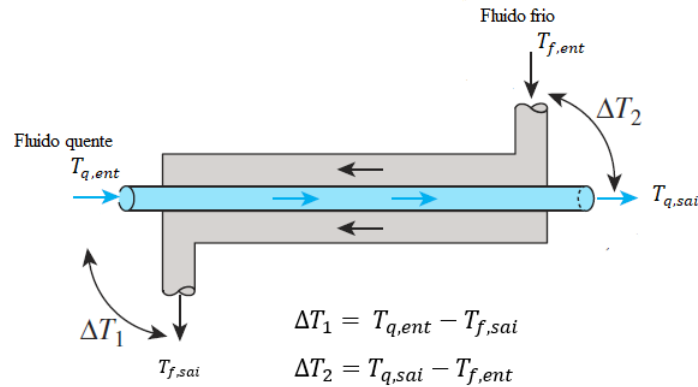
Vale ressaltar que a Equação 10 é aplicável para trocadores de calor tanto em correntes paralelas quanto em contracorrente, fazendo devidas adaptações à forma de calcular  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ . Nas Equações 11 e 12, estão representadas.

$$\begin{aligned} \text{Corrente paralela: } \Delta T_1 &= T_{q,e} - T_{f,e} \\ \Delta T_2 &= T_{q,s} - T_{f,s} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Contracorrente: } \Delta T_1 &= T_{q,e} - T_{f,s} \\ \Delta T_2 &= T_{q,s} - T_{f,e} \end{aligned} \quad (12)$$

Na Figura 8, é possível observar uma representação das entradas e saídas do fluido quente e frio, de um trocador de calor bitubular com o escoamento em contracorrente. Na extremidade superior a direita o fluido frio entra e sai na extremidade inferior oposta, já o fluido quente entra na lateral esquerda e sai na lateral oposta.

Figura 8 - Trocador de calor bitubular em contracorrente com as temperaturas dos fluidos de entrada e saída.



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2015).

Çengel e Ghajar (2015), salientam a importância de se usar a diferença de temperatura média logarítmica, pois são obtidas através do perfil de temperatura dos fluidos ao longo do trocador, sendo assim uma representação exata da diferença das temperaturas média do fluido frio e quente, refletindo fielmente o decaimento exponencial da diferença local de temperatura.

A vista disso, tendo disponível o valor da taxa de transferência de calor e a área de troca térmica, é possível calcular o coeficiente global de troca térmica, pela Equação 13.

$$U = \frac{q}{A_s \cdot \Delta T_{ml}} \quad (13)$$

Onde:

$U$  = Coeficiente global de troca térmica [W/m<sup>2</sup>.K];

$q$  = Taxa de transferência de calor real [W];

$A_s$  = Área superficial de troca térmica [m<sup>2</sup>];

$\Delta T_{ml}$  = Diferença de temperatura média logarítmica [K].

Para outros tipos configuração em diferentes arranjos, como o multipasse e cruzado, é utilizado um fator de correção F, como mostra a Equação 14, com o objetivo de corrigir a relação entre as temperaturas terminais e a diferença de temperatura média para estes trocadores de calor.

$$F = \frac{q}{U \cdot A_s \cdot \Delta T_{ml}} \quad (14)$$

O fator deve ser aplicado como base o cálculo de  $\Delta T_{ml}$  para condições contracorrentes. A obtenção de F se faz por meio de gráficos, para encontrá-lo é necessário encontrar os

parâmetros admissionais S e R. O parâmetro S representa a eficiência térmica do fluido no lado dos tubos variando de zero a um, já o valor de R varia de zero a infinito. Esses parâmetros são obtidos por:

$$R = \frac{T_{q,e} - T_{q,s}}{T_{f,e} - T_{f,s}} \quad (15)$$

$$S = \frac{T_{f,s} - T_{f,e}}{T_{q,e} - T_{q,s}} \quad (16)$$

A diferença das temperaturas média é facilmente utilizada quando as temperaturas do fluido de entrada são conhecidas e as temperaturas de saída são especificadas ou podem ser determinadas pelas expressões de balanço de energia (BERGAMN; LAVINE, 2019).

### 3.6.2 Efetividade-NUT

O método da Efetividade-NUT ou  $\epsilon$ -NUT, foi uma forma de simplificar as análises do trocador de calor quando apenas a temperatura de entrada dos fluidos é conhecida, sendo necessário usar iterações no método da Diferença de Temperatura Média Logarítmica, não sendo prático.

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), o método é baseado no parâmetro adimensional de efetividade da transferência de calor  $\epsilon$ , representado pela Equação 12.

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (12)$$

Onde:

$q$  = Taxa de transferência de calor real [W];

$q_{max}$  = Taxa de transferência de calor máximo possível [W].

A taxa de transferência de calor real pode ser obtida através da equação de balanço de energia para o fluido quente ou frio, conforme as Equações 8.a e 8.b.

Para a transferência de calor máxima possível, é necessário analisar onde há a maior diferença de temperatura dos fluidos. Em um trocador de calor, a transferência de calor máxima, é quando a temperatura do fluido frio atinge a temperatura do fluido quente da entrada ou o fluido quente é resfriado até a temperatura de entrada do fluido frio. As condições citadas não podem ser alcançadas simultaneamente, somente se as taxas de capacidade térmica dos fluidos quente e frio sejam iguais, ou seja,  $C_f = C_q$  (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). Para  $C_f \neq C_q$ , no caso

mais usual, o fluido que pode sofrer a máxima diferença de temperatura, é o fluido com a taxa de capacidade térmica mínima,  $C_{\min}$ . Portanto, a possibilidade máxima de transferência de calor, é expressa pelas duas Equações 13.a e 13.b.

$$q_{max} = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \text{ se } C_f < C_q; \quad (13.a)$$

$$q_{max} = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \text{ se } C_q < C_f. \quad (13.b)$$

De posse da taxa máxima de transferência de calor, tem-se a Equação 14.

$$\varepsilon = \frac{C_q(T_{q,ent} - T_{q,sai})}{C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})} = \frac{C_f(T_{f,sai} - T_{f,ent})}{C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent})} \quad (14)$$

Sendo a primeira definição para  $C_q = C_{\min}$  e a segunda para  $C_f = C_{\min}$ . A Equação 14, é válida para todos os arranjos de fluxos de trocador de calor. O valor de  $\varepsilon$  varia de 0 a 1.

A efetividade do trocador de calor permite determinar a taxa de transferência de calor mesmo sem as temperaturas de saída dos fluidos. Ela depende da geometria do trocador de calor e arranjo de escoamento. Normalmente envolve grupos adimensional  $UA_s/C_{\min}$ , sendo chamado de número de unidades de transferência, NUT (ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

Na análise de trocadores, é conveniente definir o  $C^*$ , referindo-se a razão da  $C_{\min}$  por  $C_{\max}$ . Foram desenvolvidas relações de efetividades, no Quadro 1, estão apresentadas algumas, sugeridas por Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012).

Quadro 1 - Relações de efetividade para diferentes fluxos.

Tipo de trocador de calor	$\varepsilon$ (NTU, $C^*$ )	NTU ( $\varepsilon$ , $C^*$ )	$C^* = 0$
Fluxo contracorrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-(1 - C^*)NTU]}{1 - C^* \exp[-(1 - C^*)NTU]}$	$NTU = \frac{1}{1 - C^*} \ln\left(\frac{1 - \varepsilon C^*}{1 - \varepsilon}\right)$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$
Fluxo paralelo	$\varepsilon = \frac{1}{1 + C^*} [1 - \exp[-(1 + C^*)NTU]]$	$NTU = -\frac{1}{1 + C^*} \ln[1 + \varepsilon(1 + C^*)]$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$
Fluxo cruzado, $C_{\min}$ misturado e $C_{\max}$ sem misturar	$\varepsilon = 1 - \exp\left[-\frac{1 - \exp(-C^*NTU)}{C^*}\right]$	$NTU = -\frac{1}{C^*} \ln[1 + C^* \ln(1 - \varepsilon)]$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$
Fluxo cruzado, $C_{\max}$ misturado e $C_{\min}$ sem misturar	$\varepsilon = \frac{1}{C^*} [1 - \exp\{-C^*[1 - \exp(-NTU)]\}]$	$NTU = -\ln\left[1 + \frac{1}{C^*} \ln(1 - \varepsilon C^*)\right]$	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Fonte: Adaptada de Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012).



## 4 METODOLOGIA

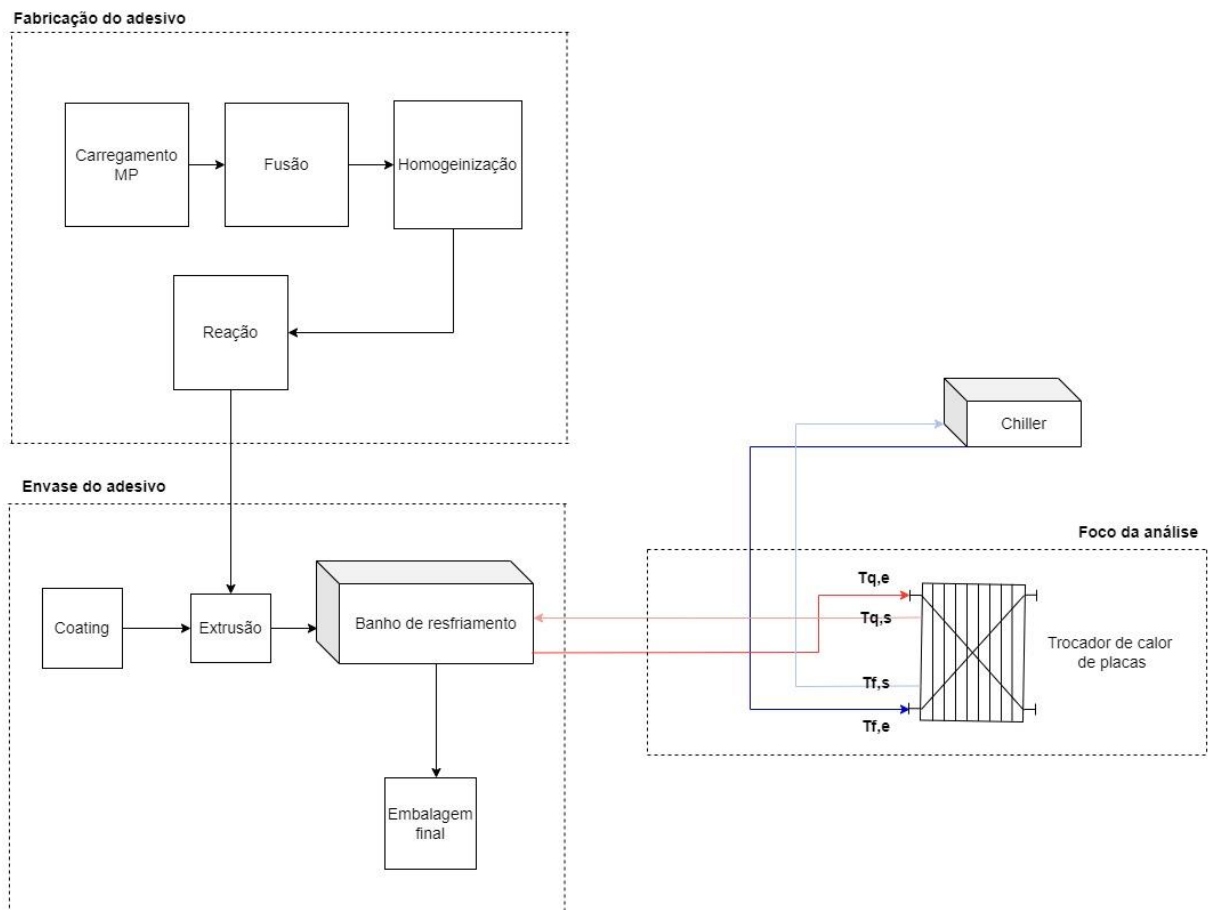
O trocador de calor analisado é do tipo placas com o fluxo contracorrente.

### 4.1 Condições reais de operação

#### 4.1.1 Obtenção das temperaturas

Foram coletadas 16 medidas em um intervalo de tempo de 30 minutos nas partes indicadas no esboço abaixo, Figura 10.

Figura 9 - Esquemática do trajeto dos fluidos.



Fonte: Da autora (2022).

As temperaturas do fluido frio são advindas do *chiller*, sendo  $T_{f,e}$  a temperatura de entrada no trocador de calor,  $T_{s,e}$  a temperatura de saída do trocador de calor. Para as temperaturas do fluido frio, são medidas por termômetro analógico, como mostrado na Figura 11.

Figura 10 - Mostradores de temperaturas analógicos.



Fonte: Da autora (2022).

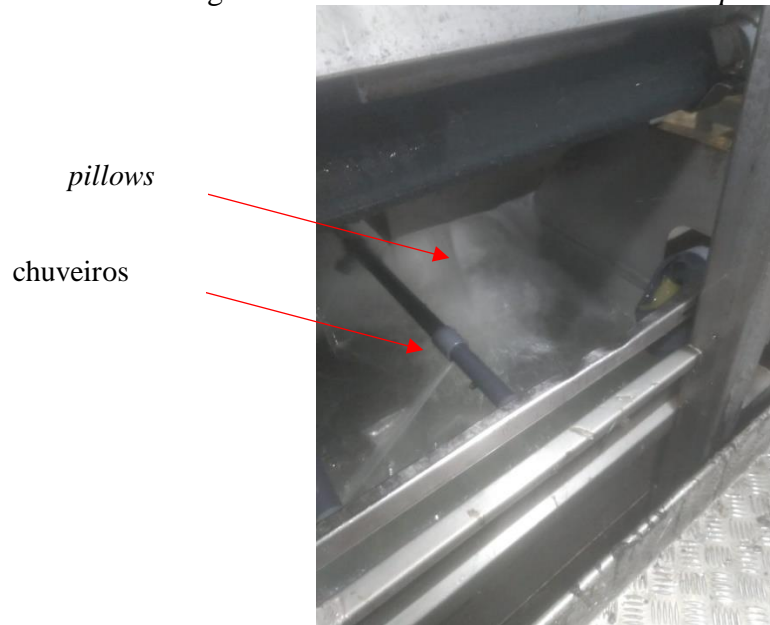
A temperatura de fluido quente de entrada,  $T_{q,e}$ , foi coletada no painel da máquina de envase de produtos, ou seja, ela é obtida digitalmente. Por fim, a  $T_{q,s}$  foi medida com o auxílio de um termômetro digital de espeto (marca *Instrutherm* modelo TE-500), devidamente calibrado, apresentado na Figura 11, nos chamados chuveiros inferior, que são utilizados para o resfriamento dos *pillows* assim que saem do processo de formação, mostrado na Figura 12.

Figura 11 - Termômetro digital de espeto *Instrutherm* modelo TE-500.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 12 - Processo de resfriamento dos *pillows*.



Fonte: Da autora (2022).

Os dados obtidos estão expostos na Tabela 2 e subsequente, na Tabela 3, a média das temperaturas da Tabela 2.

Tabela 2 - Temperatura real do processo de troca térmica.

<b>Tf, e (°C)</b>	<b>Tf, s (°C)</b>	<b>Tq, e (°C)</b>	<b>Tq, s (°C)</b>
11,0	12,7	13,1	11,2
11,0	12,6	13,3	11,2
11,0	12,7	13,3	11,3
11,2	12,7	13,5	11,3
11,1	12,6	13,5	11,4
11,2	12,7	13,5	11,3
11,0	12,6	13,5	11,3
11,0	12,7	13,5	11,3
11,1	12,7	13,5	11,3
10,9	12,6	13,5	11,3
11,0	12,7	13,6	11,4

Tabela 3 - Temperatura real do processo de troca térmica (continuação).

10,9	12,6	13,6	11,4
10,9	12,7	13,6	11,5
11,0	12,7	13,7	11,6
11,1	12,6	13,7	11,8
11,1	12,7	13,8	11,8

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 4 - Média das temperaturas de fluido quente e frio de entrada e saída e temperatura de saída do *chiller*.

$T_{q, e}$ (°C)	$T_{q, s}$ (°C)	$T_{f, e}$ (°C)	$T_{f, s}$ (°C)	$T_{chiller}$ (°C)
13,5	11,4	11,0	12,7	4,5

Fonte: Da autora (2022).

#### 4.1.2 Vazões

As vazões ( $Q_f$ ) foram coletadas em mostradores analógicos localizados nas saídas do trocador de calor. Na Tabela 4, estão apresentados os valores para ambas as vazões.

Tabela 5 - Vazões reais dos fluidos.

$Q_{f, q}$ (m <sup>3</sup> /h)	$Q_{f, f}$ (m <sup>3</sup> /h)
4,05	5,00

Fonte: Da autora (2022).

#### 4.2 Dados do projeto do trocador de calor

Para a comparação dos dados atuais, foram utilizados os dados fornecidos pelo fornecedor do equipamento. Na Tabela 5, estão dispostos tais valores para as temperaturas dos fluidos, vazões ( $Q$ ) e calor trocador ( $q$ ).

Tabela 6 - Condições de operações projetadas.

$Q_f$ (quente e frio) m <sup>3</sup> /h	$T_{q, e}$ (°C)	$T_{q, s}$ (°C)	$T_{f, e}$ (°C)	$T_{f, s}$ (°C)	Calor trocado ( $q$ ) (kW)
30	14	10	5	9	139,82

Fonte: Alfa Laval (2012).

Além dos dados da Tabela 5, foram fornecidos também os valores para o coeficiente global considerando o trocador de calor limpo, a área total, a área efetiva e o número de placas, apresentados na Tabela 6.

Tabela 7 - Dados da ficha de especificação.

<b>U de projeto (W/m<sup>2</sup>.K)</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área efetiva (m<sup>2</sup>)</b>	<b>N° de placas</b>
6656	4,368	4,2	52

Fonte: Alfa Laval (2012).

### 4.3 Calor específico e densidade dos fluidos

Para a realização dos cálculos foram necessários os dados de calor específico ( $C_p$ ) e densidade ( $\rho$ ) para o fluido quente e frio. Com isso, foi feita a média das temperaturas quente e fria, sendo 12,45 °C e 11,85 °C, respectivamente. A partir das temperaturas médias, foi realizado uma interpolação, a partir da Tabela A-2 do livro Çengel e Ghajar (2012), encontrando os valores para o calor específico e a densidade, dispostos na Tabela 7.

Tabela 8 - Calor específico e densidade para os fluidos frio e quente.

<b><math>C_{p,q}</math> (kJ/kg.K)</b>	<b><math>C_{p,f}</math> (kJ/kg.K)</b>	<b><math>\rho_q</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_f</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
4,2	4,2	998,5	998,6

Fonte: Çengel e Ghajar (2012).

### 4.4 Fator de incrustação

Como citado anteriormente, o fator de incrustação ( $R_d$ ) pode ser encontrado em manuais. No Quadro 2, estão representados este parâmetro para alguns tipos de água e para temperaturas abaixo de 52 °C.

Quadro 2 - Fator de incrustação Rd em equipamento de transferência de calor.

	Temperatura da água, 52°C ou menos	
	Velocidade da água 1 m/s ou menos	Velocidade da água superior a 1 m/s
	$m^2 \cdot ^\circ C/W$	$m^2 \cdot ^\circ C/W$
<b>Tipos de água:</b>		
Água do mar	0,000088	0,000088
Destilada	0,000088	0,000088
Água tratada para alimentação de caldeira	0,00018	0,000088
Camisa de motor	0,00018	0,00018
Grandes Lagos (EUA)	0,00018	0,00018
<i>Torre de resfriamento e tanque de aspersão</i>		
Água de reposição tratada	0,00018	0,00018
Água sem tratamento	0,00053	0,00053
Sangria de caldeira	0,00035	0,00035
Água salobra	0,00035	0,00018
<i>Água de rio</i>		
Mínimo	0,00036	0,00018
Mississippi	0,00053	0,00035
Delaware, Schuylkill	0,00053	0,00035
East River e Baía de Nova Iorque	0,00053	0,00035
Canal sanitário de Chicago	0,0041	0,00106
Lamacenta ou lodosa	0,00053	0,00035
Dura (acima de 15 grãos/galão)	0,00053	0,00053

Fonte: Adaptado de Pereira (2022).

Analisando o Quadro 2, observa-se que a água que se enquadra ao processo é a água sem tratamento para velocidade 1 m/s ou menos, sendo o valor de  $0,00053 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ .

#### 4.5 Desenvolvimento dos cálculos

De posse dos dados apresentados acima, foi possível realizar o desenvolvimento dos cálculos para analisar a situação real do trocador de calor e como foi projetado. Para título de identificação, foi utilizado o subscrito real e projeto.

##### 4.5.1 Hipóteses adotadas para os cálculos

- O processo de transferência de calor ocorre em regime permanente;
- A troca de calor com a vizinhança pode ser desprezada;
- Não há geração de calor nos fluidos e nem nas paredes do trocador de calor;
- As propriedades de transporte e termo físicas dos fluidos, assim como os coeficientes de transferência de calor, são consideradas constantes ao longo do trocador de calor;
- Não há mudança de fase em ambos os fluidos.

#### 4.5.2 Capacidade térmica (Cf e Cq)

As capacidades térmicas foram obtidas através da multiplicação das vazões mássicas com os calores específicos, podendo assim descobrir os valores para ambos os fluidos nos dois casos e com isso, conhecendo o valor de  $C_{\text{mín}}$  e  $C_{\text{máx}}$ , sendo a capacidade térmica mínima e máxima, respectivamente.

#### 4.5.3 Taxa de calor trocado (q)

Utilizando as densidades apresentados na Tabela 8, foi possível realizar a conversão de vazão volumétrica para mássica. Os valores para as vazões volumétrica se encontram na Tabela 5 para a real e a Tabela 6 para de projeto. Após a conversão, calculou-se a taxa de calor trocado pelo balanço global de energia pelas equações 8.a e 8b, usando os valores para calor específico apresentado na Tabela 7,  $T_{\text{real}}$  na Tabela 3 e  $T_{\text{projeto}}$  na Tabela 6.

#### 4.5.4 Diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{\text{ml}}$ )

Para o cálculo do  $\Delta T_{\text{ml}}$ , é necessário calcular o  $\Delta T_1$  e o  $\Delta T_2$  em contracorrente. A partir dos valores encontrados na Tabela 4 para o real e na Tabela 6 para o projeto, foi possível encontrar os valores para os  $\Delta T$  e realizar o cálculo de  $\Delta T_{\text{ml}}$  através da Equação 10.

#### 4.5.5 Coeficiente global de transferência de calor (U)

Depois de calculado a taxa de calor trocado (q) e a diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{\text{ml}}$ ), fazendo uso da área efetiva fornecida pela ficha de especificação do equipamento, pode-se calcular o coeficiente global de transferência de calor a partir da Equação 11.

##### 4.5.5.1 Coeficiente global de transferência de calor considerando o fator de incrustação ( $U_d$ )

A partir da Equação 7, isolando o  $U_d$  e conhecendo o valor de  $R_d = 0,00053 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ , como citado anteriormente, encontrou-se o coeficiente global de transferência de calor considerando o fator de incrustação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da ficha de especificação do equipamento, foi possível realizar a comparação entre os dados de projeto com os dados reais obtidos na análise do equipamento.

O principal ponto de interesse na análise de transferência de calor de trocadores de calor, é a taxa total de transferência de calor ( $q$ ). Portanto, inicialmente calculou-se a taxa de calor de troca térmica e a capacidade máxima e mínima para o projeto e a situação real. Na Tabela 8, estão dispostos os resultados.

Tabela 9 - Taxa de troca térmica e capacidades para o projeto e real.

	<b>Projeto</b>	<b>Real</b>
<b>q (kW)</b>	139,789	9,903
<b>C<sub>q</sub> (kW/K)</b>	34,947	4,716
<b>C<sub>f</sub> (kW/K)</b>	34,947	5,825

Fonte: Da autora (2022).

Verifica-se que a equação que define a taxa de troca térmica (equação 8.a e 8.b) é diretamente proporcional as variáveis de vazão, diferença de temperatura e o calor específico do fluido. Isto significa que quanto maior a vazão ou diferença de temperatura ou calor específico do fluido, mantendo as demais variáveis constantes, maior a taxa de troca térmica. A diminuição da taxa de transferência de calor ocorre devido, principalmente, a diminuição da temperatura e da vazão comparados ao projeto, o mesmo acontece para as capacidades térmicas do fluido ( $C_q$  e  $C_f$ ), que por serem diretamente proporcionais a vazão, ocorre a diminuição.

Uma menor taxa de transferência de calor resulta em uma menor eficiência de troca térmica, implicando em uma ineficiência de processo, aumentando a necessidade do uso de utilidades e desfavorecendo o uso das energias de outras correntes.

Como no projeto temos as vazões ( $Q_q$  e  $Q_f$ ) dos fluidos quente e frio são iguais, as capacidades térmicas ( $C_q$  e  $C_f$ ) são as mesmas. Já para o real, temos uma capacidade máxima para o fluido frio e mínima para o fluido quente, isso se dá devido a vazão do fluido frio ser maior que do fluido quente.

Tendo conhecimento de todas as temperaturas e área superficial de troca térmica, a análise indicada para o trocador de calor, por Çengel e Ghajar (2012), é a diferença de temperatura média logarítmica. Com o valor do coeficiente global de transferência de calor encontrado na ficha de especificação, realizou-se uma avaliação da discrepância dos valores para o real.



## 5.1 Comparação das diferenças de temperatura média logarítmica

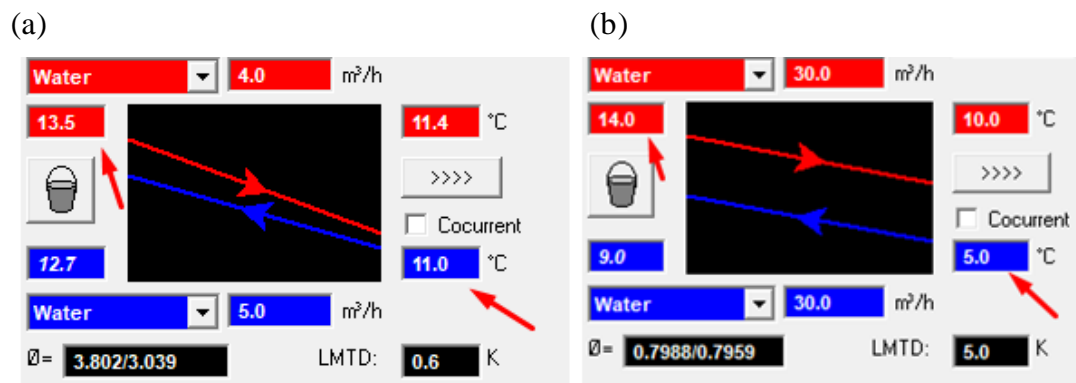
De posse das todas as temperaturas, os resultados para  $\Delta T_{ml}$ , estão dispostos na Tabela 9 e na Figura 14 a simulação dos perfis de temperatura fornecidos pela empresa VM Brasil, 2022.

Tabela 10 - Resultados para  $\Delta T_{ml}$ .

$\Delta T_{ml, \text{real}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{ml, \text{projeto}} (^{\circ}\text{C})$
0,577	5,000

Fonte: Da autora (2022).

Figura 13 - Simulação dos perfis e temperatura. (a) real; (b) projeto.



Fonte: VM Brasil, 2022.

Apesar da temperatura do fluido frio da saída do *chiller* ser de 4,5 °C, a temperatura real de entrada do fluido frio no trocador é de 11 °C, conforme a Tabela 3. Observando o comportamento das temperaturas nas figuras e dados acima, a variação de temperatura no estado real para o projeto é nitidamente alta. A diferença de temperatura atua como *driving-force* ou força-motriz para o processo de transferência de calor, como a diferença temperatura real é muito baixa, resulta em uma transferência de calor inferior para o processo.

Devido as proximidades das temperaturas reais, teoricamente, a área de troca térmica necessária utilizando o mesmo equipamento seria de aproximadamente nove vezes maior que a área atual.

## 5.2 Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor para o projeto, foi de 6656 (W/m<sup>2</sup>.K), como disposto na Tabela 6. Na Tabela 10, os dados para o coeficiente global real considerando sem e com incrustação para os dois casos.

Tabela 11 - Valores de coeficientes globais reais e de projeto com incrustação.

$U_{\text{real}}$ (W/m <sup>2</sup> . K)	$U_{\text{real com incrustação}}$ (W/m <sup>2</sup> . K)	$U_{\text{projeto com incrustação}}$ (W/m <sup>2</sup> . K)
4085,741	1290,733	1470,069

Fonte: Da autora (2022).

A partir dos resultados, observou-se uma significativa discrepância do coeficiente global de projeto para o real, onde o  $U_{\text{projeto}}$  é 6656 W/m<sup>2</sup>.K e o  $U_{\text{real}}$  foi 4085,741 W/m<sup>2</sup>.K. Analisando a equação 13, nota-se que o coeficiente global é diretamente proporcional a taxa de transferência de calor, portanto, infere-se que o fator que mais impacta para essa diferença é a vazão, já que ela é 83,3% menor que a vazão dimensionada no projeto.

Como esperado, o coeficiente global com incrustação real é menor que o coeficiente global com incrustação de projeto. O equipamento se apresenta ainda mais sensível a redução do coeficiente global de transferência de calor, estimamos que a perda causada pela vazão e temperatura reais, é da ordem de 2570 W/m<sup>2</sup>.K e a perda que pode ser causada pela incrustação é da ordem 2796 W/m<sup>2</sup>.K. Portanto a limpeza regular do equipamento se faz extremamente necessária, pois o fluido se trata de uma água não tratada que é recirculada de outros processos da indústria, podendo haver presença de sujidades causando severas incrustações, ocasionando a diminuição do coeficiente e a ineficiência do equipamento.

## 6 CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se afirmar que existem ineficiências no processo de resfriamento de *pillows* realizado pelo trocador de calor de placas em escoamento contracorrente. Conforme discutido, as possíveis ineficiências estão atreladas a vazões dos fluidos frio e quente, a temperaturas e área de troca.

Para a vazão dos fluidos encontrou-se que a diferença entre a dimensionada em projeto e a real variação em até 83,3%, onde a vazão de projeto tanto para o fluido quente e para o frio é de 30 m<sup>3</sup>/h, descrita na ficha de especificação. A vazão real para o fluido frio foi de 5,00 m<sup>3</sup>/h e para fluido quente foi de 4,05 m<sup>3</sup>/h. Estes resultados indicam que a troca térmica pode ser inferior ao dimensionado por projeto. Dessa maneira indicasse que o aumento da vazão dos fluidos para a vazão de projeto poderia melhorar a eficiência do equipamento.

Sobre as temperaturas observou-se que as temperaturas de projeto do fluido quente eram de 14 e 10 °C e para o fluido frio de 5 e 9 °C, já as temperaturas encontradas na análise foram de 13,5 e 11,4 °C para o fluido quente e 11 e 12,7 °C para o fluido frio, indicando principalmente que o fluido frio não está dentro do esperado pelo projeto. Encontrou-se que o *chiller* envia o fluido frio para o trocador a 4,5 °C o que está de acordo com o dimensionado do projeto. Porém existem perdas até a chegada do fluido no equipamento que causam uma ineficiência na troca térmica realizada no trocador analisado. Algumas alternativas para uma possível melhoria na troca térmica seria a substituição do atual *chiller* por um de maior capacidade, para ser capaz de alcançar uma menor temperatura. Vale ressaltar que o *chiller* é usado para o resfriamento geral da fábrica. Outra opção seria um *chiller* totalmente dedicado para o processo de resfriamento de *pillows*, o que demandaria menos energia do equipamento, conseguindo uma maior diminuição da temperatura do fluido. Acredita-se que a alternativa mais adequada é a realização de um estudo para a identificação das causas da perda de energia do fluido entre a saída do *chiller* e entrada do trocador de calor e posteriormente a mitigação dessas perdas.

Defronte das condições atuais de processo, temperaturas e vazões, em relação à área de troca fornecida pela ficha de especificação de 4,2 m<sup>2</sup>, seria necessário aumentar em nove vezes, para se ter um maior contato entre os fluidos. Porém, se faz indispensável realizar um estudo da viabilidade de aumento da área devido o espaço físico, já que não seria um equipamento tão compacto quanto atual.

Conforme consta na ficha de especificação do equipamento, para mantê-lo em boas condições, é necessária e até imprescindível uma manutenção periódica. As placas precisam ser limpas regularmente, assim como também a limpeza e lubrificação das barras de suporte, barra

guia e dos parafusos de aperto. Com estes procedimentos, poderia resultar em melhores valores para o coeficiente global de transferência de calor, já que diminuiria as sujeiras do equipamento, ou seja, atingindo um melhor desempenho.

Por fim, o presente trabalho contemplou os objetivos propostos, com foco em aplicar conhecimentos técnicos de engenharia química para proposição de um projeto executável em uma indústria química de adesivos.

## REFERÊNCIAS

- ALFA LAVAL LTDA. **Prontuário do Vaso de Pressão Trocador de Calor a Placas**. Fev. 2012.
- BERGMAN, Theodore L., LAVINE, Adrienne S. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8 ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2019.
- BRASIL, VM. **Informações sobre Trocador de Calor**. Mensagem recebida por <engenharia@vmbrasil.com> em 19 de mai. 2022.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4 ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2012.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications**. 5 ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Brasil: AMGH Editora, 2015.
- CHAVES, Filipe José Ferreira; MISAEL, Carla Gabriela Azevedo; FERNANDES, Caroline Vasconcelos; SANTOS, Josiele Souza Batista; CAVALCANTE, Juan Nicolas Andrade; VASCONCELOS, Suênia Fernandes de; "Análise Técnica da Eficiência de um Trocador de Calor do Tipo Casco-Tubos", p. 905-914. In: **Anais do V Encontro Regional de Química & IV Encontro Nacional de Química [Blucher Chemistry Proceedings]**. São Paulo: Blucher, 2015.
- GALEMBECK, F.; SANTOS, A.C.M.; SCHUMACHER, H.C.; RIPPEL, M.M.; ROSSETO, R. **Indústria química: evolução recente, problemas e oportunidades**. Química Nova, Vol. 30, No. 6, 1413-1419, 2007.
- GARDENAL, A. L.; SGUÁRIO, M. K. **Avaliação do desempenho de trocadores de calor**. 2016. Dissertação (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- GAUTO, Marcelo Antunes; ROSA, Gilber Ricardo. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. Editora Ciência Moderna, 2011; 440 p
- H.B. FULLER. **Hot Melt Mega Pillows**. Disponível em: <https://www.hbfuller.com/pt/eimea/campaign-pages/hot-melt-mega-pillows/>. Acesso em: 07 ago. 2022.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, Anchasa. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. Boca Raton: Crc Press, 2012.
- KREITH, Frank; BOHN, Mark S. **Princípios de Transferência de Calor**. São Paulo: Thomson, 2003.

MÁS, Rodrigo. **Indústria Química: importância, fatores de competitividade e implicações para o Brasil.** Bain & Company, 2021. Disponível em: <[https://www.bain.com/contentassets/5193e8cf790a4cab8cdd069b0f7b0da7/bain\\_industria\\_quimica\\_digital.pdf](https://www.bain.com/contentassets/5193e8cf790a4cab8cdd069b0f7b0da7/bain_industria_quimica_digital.pdf)>. Acesso em: 13 de jun. de 2022.

PEREIRA, Félix. **Trocadores de Calor.** Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/14243459/>. Acesso em: 10 jul. 2022.

PERUSSI, R. **Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica.** 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PROPEQ. **Trocadores de calor: quais os tipos e por que são importantes?** 2020. Disponível em: <<https://propeq.com/trocadores-de-calor/#:~:text=Ademais%2C%20como%20mencionamos%2C%20o%20trocador,de%20torn%C3%A1%2Dlo%20mais%20sustent%C3%A1vel>>. Acesso em: 13 de jun. de 2022.

REVISTA DESKTOP. **Pillow ou Pellet: qual o melhor formato para o Hotmelt?** Disponível em: <https://www.revistadesktop.com.br/noticias/pillow-pellet-melhor-formato-hotmelt/>. Acesso em: 09 ago. 2022.

RISTOF, R., MATTJIE, C. A., **Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira.** Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica - Faculdade Horizontina (FAHOR), Horizontina-RS, 2013.

RUBEGA, Cristina. PACHECO, Décio. A formação da mão-de-obra para a indústria química: uma retrospectiva histórica. **Ciência & Educação**, v. 6, n. 2, p. 151-166, 2000.

SILVA, J. M. A. R.; PAULA, J. T. S.; MANZELA, A. A. **Otimização de Desempenho de Trocadores de Calor Compactos.** Revista de Engenharia da Faculdade Salesiana n.1 (2015) pp. 21-32.

SIQUEIRA, L. V.; GUTIERREZ, C. G. C. C.; **"Estudo experimental de incrustação em trocadores de calor no processo de pasteurização do leite"**, p. 1980- 1985. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica [Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.3].

TLV. **Coefficiente Global de Transferência de Calor.** Disponível em: <[https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/overall-heat-transfer-coefficient.html#:~:text=O%20coeficiente%20global%20de%20transfer%C3%Aancia,ft2%C2%B0F\)%5D](https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/overall-heat-transfer-coefficient.html#:~:text=O%20coeficiente%20global%20de%20transfer%C3%Aancia,ft2%C2%B0F)%5D)>. Acesso em: 17 de maio de 2022.

WELTY, James R., RORRER, Gregory L., FOSTER, Foster G. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa.** 6 ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1997.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**, 6ª edição. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2017. 9788521634201. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>>. Acesso em: 13 jun. 2022.