

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

ANA PAULA JOTZ

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO DE
TROCADOR DE CALOR CASCO TUBO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientador: Dr. Matheus Felipe Pedrotti

FELIZ

2023

ANA PAULA JOTZ

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO DE
TROCADOR DE CALOR CASCO TUBO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Suyanne Angie Lunelli Bachmann

Profa. Dra. Luiza Pieta

ORIENTADOR

Prof. Dr. Matheus Felipe Pedrotti

Feliz, junho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todas pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e tornaram possível a conclusão desta etapa tão importante em minha jornada acadêmica.

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Feliz, pela oportunidade da realização deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Matheus Felipe Pedrotti, pela orientação, apoio e paciência ao longo de todo o processo. Seu conhecimento, criatividade e experiência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de expressar minha gratidão às professoras Suyanne Angie Lunelli Bachmann e Luiza Pieta, membros da banca examinadora do meu trabalho de conclusão de curso. Agradeço pelo cuidado, críticas construtivas e apoio fornecidos durante a avaliação do meu trabalho. Sua disponibilidade de tempo e comprometimento foram fundamentais para o sucesso desse processo.

Agradeço também a cada professor que cruzou o meu caminho ao longo desta jornada acadêmica. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental no meu desenvolvimento intelectual e na construção do meu conhecimento.

Meus agradecimentos se estendem aos meus colegas de curso, que compartilharam suas ideias, experiências e conhecimentos ao longo desses anos. Certamente, suas contribuições foram valiosas para o meu crescimento pessoal e profissional.

Não posso deixar de agradecer aos meus pais, João e Iloní. Pelo amor incondicional, apoio emocional e incentivo constante. Vocês são e sempre serão minha base. Sou eternamente grata por cada gesto de carinho, por cada palavra de encorajamento e por cada sacrifício que fizeram para me proporcionar as melhores oportunidades. Vocês me ensinaram a ser forte, persistente e acreditar em mim mesma, mesmo nos momentos de dificuldade.

Gostaria também de expressar minha sincera gratidão aos meus amigos por estarem ao meu lado durante essa jornada. Vocês foram a luz nos momentos mais escuros, o apoio nas horas difíceis e a alegria nas ocasiões de celebração. A todos vocês, meu sincero agradecimento por fazerem parte desta conquista.

RESUMO

Trocadores de calor são equipamentos utilizados para realizar o processo de troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas, separados por uma superfície sólida. Se apresentam em diferentes modelos, com diferentes geometrias e utilidades. Neste trabalho, teve-se como objetivo realizar a construção e avaliar o desempenho de um protótipo, em escala laboratorial, de um trocador de calor casco e tubo com dois passes nos tubos, para uso didático no Instituto Federal do Rio Grande do Sul - *Campus Feliz*. Para isso, foi empregada uma abordagem metodológica que envolveu a utilização do software AutoCAD para a concepção das peças do trocador de calor, seguida pela impressão tridimensional das peças em um material plástico do tipo acrilonitrila butadieno estireno (ABS). O protótipo foi montado utilizando um tubo de acrílico para representar o casco do trocador, enquanto doze tubos de alumínio foram inseridos em seu interior. Além disso, as flanges e chicanas necessárias foram impressas para completar a montagem do sistema operacional. Após a construção, avaliou-se o desempenho realizando testes em diferentes condições operacionais de vazão dos fluidos frio e quente, em que se variou a vazão do fluido frio de 1 a 8 L/min e a vazão do fluido quente em 4,8; 5,9 e 6,9 L/min. Com essas variações foi possível analisar parâmetros como a taxa de transferência de calor (Q), o coeficiente global de transferência de calor (U) e a diferença média logarítmica de temperatura entre os fluidos (DMLT). Os resultados obtidos neste trabalho foram concordantes com o que está disposto na literatura, sendo que se observou que o aumento de vazão do fluido frio de 1 a 8 L/min proporcionou um aumento na taxa de transferência de calor no casco e por consequência um aumento no coeficiente global experimental do casco. Por outro lado, a taxa de transferência de calor nos tubos não seguiu um padrão, sendo que na vazão constante de 1 L/min do fluido frio e a vazão do fluido quente variando de 4,8; 5,9 e 6,9 L/min observou-se uma taxa maior na vazão de 4,8 L/min e isso pode estar relacionado a perdas de calor ou formação de bolhas de ar durante o experimento. Apesar de alguns resultados terem apresentados desvios, foi possível desenvolver e disponibilizar à instituição um equipamento que poderá ser utilizado nas aulas experimentais. Através dessa implementação, os alunos terão a oportunidade de vivenciar na prática o que aprenderam na teoria, o que contribuirá significativamente para sua compreensão e assimilação dos conceitos.

Palavras-chave: Trocadores de calor. Casco e tubos. Protótipo. Impressão 3D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regime de escoamento paralelo.....	15
Figura 2 – Regime de escoamento contracorrente.	16
Figura 3 – Trocador de calor casco tubos de passe simples.....	17
Figura 4 – Trocador de calor casco tubos de passe duplo.....	17
Figura 5 – Arranjo dos tubos: (a) Arranjo triangular; (b) Arranjo quadrado.	18
Figura 6 – Rotâmetros e aquecedor utilizados.....	28
Figura 7 – Registrador de dados e controlador programável utilizado.	28
Figura 8 – Protótipo idealizado.....	29
Figura 9 – Diagrama de instrumentação do protótipo do trocador de calor.....	30
Figura 10 – Flanges desenhadas no AutoCAD.	34
Figura 11 – Desenhos do protótipo realizadas em software.	35
Figura 12 – Flange de suporte e anel <i>O'Ring</i>	35
Figura 13 – Impressão tridimensional de uma das flanges: (a) etapa inicial da impressão; (b) etapa mais avançada da impressão; (c) flange finalizada.	36
Figura 14 – Comparação do objeto projetado e do objeto impresso.	37
Figura 15 – Modificação no projeto e nova impressão da flange.	38
Figura 16 – Vazamentos através de falhas na impressão da flange.	39
Figura 17 – Flanges confeccionadas na impressora 3D.	40
Figura 18 – Flange com <i>O-ring</i> e sensores de temperatura.....	40
Figura 19 – Vedação com cola de silicone.....	41
Figura 20 – Chicanas.	42
Figura 21 – Protótipo do trocador de calor casco tubos com duas passagens nos tubos.	43
Figura 22 – Adição de conexões em formato 'T' nas flanges.	44
Figura 23 – Protótipo com as mangueiras e sensores conectados.....	44
Figura 24 – Calibração de sensores: (a) banho ultratermostático com os sensores; (b) registrador de dados FieldLogger.....	45
Figura 25 – Transferência de calor no casco versus vazão do fluido frio.....	48
Figura 26 – Coeficiente global externo em função da vazão do fluido frio.	49
Figura 27 – Transferência de calor em relação a vazão do fluido quente.....	50
Figura 28 – Bolhas de ar durante experimento.	51
Figura 29 – Coeficiente global interno em relação a vazão do fluido quente.	52

Figura 30 – Desempenho do protótipo.....	53
Figura 31 – Imagens térmicas capturadas pela câmera infravermelho: (a) vazão a 1 L/min; (b) vazão a 2 L/min.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desvios obtidos dos sensores de temperatura.....	46
Tabela 2 – Faixa de variação das temperaturas de entrada dos fluidos.	46
Tabela 3 – Dados experimentais coletados no Experimento 1.....	61
Tabela 4 – Dados experimentais coletados no Experimento 2.....	61
Tabela 5 – Dados experimentais coletados no Experimento 3.....	62
Tabela 6 – Comportamento da taxa de transferência de calor no casco.	63
Tabela 7 – Comportamento da taxa de transferência de calor nos tubos.	63
Tabela 8 – Dados obtidos para o coeficiente global externo experimental.	64
Tabela 9 – Dados obtidos para o coeficiente global interno.....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	13
3.2 TROCADORES DE CALOR	14
3.3 TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS	16
3.3.1 Número de passes	17
3.3.2 Arranjo dos tubos	18
3.3.3 Chicanas	19
3.3.4 Distribuição dos fluidos	19
3.4 ANÁLISE TÉRMICA EM TROCADORES DE CALOR	20
3.4.1 Coeficiente global de transferência de calor	20
3.4.2 Taxa de transferência de calor	21
3.4.3 Método da diferença de temperatura média logarítmica	22
3.4.4 Eficiência	24
3.5 PROTÓTIPOS DE TROCADORES DE CALOR	24
3.6 IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D)	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	27
4.2 MÉTODOS	30
4.2.1 Calibração de sensores	31
4.2.2 Variação da vazão do fluido frio	31
4.2.3 Variação da vazão do fluido quente	31
4.2.4 Avaliação do desempenho do protótipo	31
4.2.5 Avaliação da temperatura superficial utilizando câmera infravermelho	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	33
5.1.1 Modelagem tridimensional	33
5.1.2 Impressão das peças na impressora 3D	36
5.1.3 Vedação do trocador de calor	40

5.1.4 Chicanas	42
5.1.5 Protótipo finalizado	42
5.2 MONTAGEM DO SISTEMA	43
5.3 AVALIAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS	46
5.3.1 Avaliação do efeito da vazão do fluido frio	47
5.3.2 Avaliação do efeito da vazão do fluido quente	49
5.3.3 Desempenho do trocador de calor	52
5.3.4 Análise da temperatura superficial do trocador de calor	54
6 CONCLUSÕES	56
7 SUGESTÕES E MELHORIAS.....	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS.....	61
APÊNDICE B – TAXAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR OBTIDAS	63
APÊNDICE C – COEFICIENTES GLOBAIS EXPERIMENTAIS OBTIDOS	64
ANEXO A – DIAGRAMA DE KERN PARA CORREÇÃO DA DTML	65

1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor desempenham um papel crucial na transferência de calor entre dois fluidos a diferentes temperaturas. São dispositivos que utilizam uma fronteira sólida, muitas vezes feita de materiais metálicos, para facilitar a condução e a convecção do calor. O fluido, com temperatura inicial mais baixa e final mais alta, é chamado de fluido frio, enquanto o fluido com temperatura inicial mais alta e final mais baixa, é chamado de fluido quente. A transferência de calor ocorre devido ao gradiente de temperatura entre os fluidos (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Os trocadores de calor são amplamente aplicados em diversos setores industriais, como processamento de alimentos, resfriamento de óleo, condensação de energia, recuperação de calor, aquecimento, refrigeração e processos químicos (MOHANTY, 2016). Eles são frequentemente usados para aproveitar a energia térmica que seria perdida, resultando em benefícios econômicos (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2004). A seleção adequada do tipo de trocador de calor é essencial para otimizar os processos industriais.

O modelo do trocador de calor mais comum na indústria é o trocador de calor casco e tubo (SALAHUDDIN; *et al.*, 2015). Esses trocadores de calor consistem em tubos dispostos dentro de um casco cilíndrico, e existem várias configurações dependendo do número de passagens no casco e nos tubos. São amplamente utilizados devido ao seu design e fabricação bem estabelecidos, longa vida útil, disponibilidade de peças e capacidade de operar em amplas faixas de temperatura e pressão.

Este trabalho tem como objetivo construir e avaliar a eficiência de um protótipo de um trocador de calor casco e tubo com passe duplo pelos tubos, utilizando a técnica de impressão tridimensional (3D) para a confecção de flanges e chicanas. Essas peças foram projetadas com o intuito de facilitar a visualização e montagem dos componentes de um trocador de calor. Após a construção do protótipo, foi avaliada a influência das vazões dos fluidos em sua eficiência. Foram analisados parâmetros como a taxa de transferência de calor, o coeficiente global de transferência de calor e a diferença média logarítmica de temperatura entre os fluidos.

Além disso, o protótipo desenvolvido ficará disponível para aulas experimentais, com o intuito de proporcionar aos estudantes a oportunidade de aplicar conceitos

teóricos de transferência de calor na prática, contribuindo para a sua formação acadêmica e ampliando a compreensão do funcionamento dos trocadores de calor. Deste modo, esse trabalho visou não apenas construir um protótipo funcional, mas também promover o aprendizado e a pesquisa no campo da transferência de calor, abrindo caminho para futuros aprimoramentos e aplicações práticas dessa tecnologia.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir e avaliar o desempenho de um protótipo de um trocador de calor do tipo casco tubos com passe duplo pelos tubos em escala laboratorial para posterior utilização em aulas práticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar algumas partes do trocador de calor em uma impressora tridimensional (3D);
- Proporcionar uma visualização básica dos principais componentes de um trocador de calor casco e tubo.
- Avaliar o desempenho do trocador de calor em diferentes vazões de fluido frio e quente;
- Obter e avaliar o comportamento do coeficiente global de transferência de calor experimental através da taxa de transferência de calor com dados experimentais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão apresentados estudos e pesquisas relacionadas à temática, visando identificar lacunas de pesquisa e contribuir para o avanço do conhecimento nessa área específica. A revisão bibliográfica abordará tanto os aspectos teóricos relacionados aos trocadores de calor e transferência de calor, como também os estudos e desenvolvimentos práticos envolvendo a utilização de impressão 3D na fabricação de componentes de trocadores de calor.

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é um fenômeno natural que ocorre quando há uma disparidade de temperatura entre dois corpos. Essa diferença de temperatura pode se manifestar em um corpo ao longo de sua extensão, entre dois corpos distintos ou entre um corpo e o ambiente ao seu redor (SOUZA, 2016). Esse desequilíbrio térmico resulta na ocorrência de um fluxo de calor, que de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, sempre flui do corpo com temperatura mais elevada para o corpo com menor temperatura.

Em qualquer situação em que haja discrepância de temperaturas em um meio ou entre diferentes meios, ocorrerá, sem exceção, a transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 2013). Essa transferência pode acontecer por três formas distintas: condução, convecção ou radiação.

A condução é caracterizada pela transferência de energia entre partículas, movendo-se de um estado com maior nível de energia para outro com menor nível de energia, por meio de sua interação. Essa forma de transferência de calor pode ocorrer em gases, líquidos e sólidos. A taxa de condução de calor em um meio é diretamente influenciada por sua geometria, espessura, tipo de material e pela diferença de temperatura à qual o meio está exposto (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

No caso da convecção, ela refere-se à transferência de energia entre uma superfície específica e um fluido em movimento sobre essa superfície. Esse processo envolve dois tipos de transferência de energia: advecção, que se relaciona ao movimento global do fluido, e condução, que envolve o movimento aleatório das moléculas do fluido. A convecção pode ocorrer de duas maneiras distintas: natural ou forçada (INCROPERA; DEWITT, 2013).

- Convecção natural: ocorre quando o fluxo do fluido ocorre sem a necessidade de intervenção externa, sendo impulsionado por forças de empuxo geradas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido.
- Convecção forçada: ocorre quando o fluxo do fluido requer intervenção externa, como bombas, ventiladores ou ventos atmosféricos, para ocorrer de forma adequada.

Já a radiação, é um processo de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas e não depende de um meio material para se propagar, sendo capaz de se propagar até mesmo no vácuo. A radiação térmica pode ser definida como a radiação eletromagnética emitida por um corpo devido à sua temperatura. (CAO, 2010).

3.2 TROCADORES DE CALOR

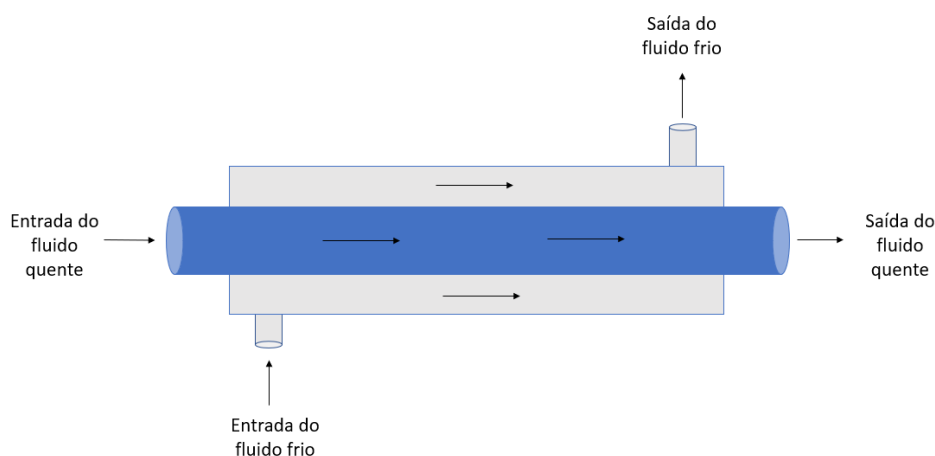
Os trocadores de calor são dispositivos projetados para promover a transferência de calor de maneira eficiente entre dois fluidos, caracterizados por diferentes temperaturas. Eles desempenham um papel fundamental em sistemas de aquecimento, resfriamento e troca de energia térmica, sendo essenciais para o funcionamento de diversos processos industriais e comerciais (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Existem diversas configurações de trocadores de calor disponíveis, como os trocadores de calor de placas, tubos e casco e tubos, entre outros. Cada tipo apresenta um projeto e uma estrutura específica, mas todos têm como objetivo maximizar a área de superfície de contato entre os fluidos, a fim de permitir uma transferência de calor eficiente.

A escolha adequada de um trocador de calor requer a consideração de fatores como temperatura, pressão, tipos e características dos fluidos envolvidos (ÇENGEL; GHAJAR, 2012), sendo que essa seleção criteriosa visa garantir a eficiência e o desempenho adequados do trocador de calor, levando em conta as propriedades térmicas dos fluidos e as demandas específicas do sistema. Além disso, o arranjo de escoamento escolhido também tem um impacto direto na eficiência do processo de transferência de calor.

Existem dois arranjos de escoamento comumente utilizados: escoamento paralelo e escoamento contracorrente. No escoamento paralelo, Figura 1, os fluidos entram no trocador de calor pelo mesmo lado e fluem na mesma direção, passando paralelamente um ao outro. Isso resulta em uma diferença de temperatura mais alta ao longo do trocador, o que pode aumentar a taxa de transferência de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). No entanto, geralmente apresenta uma eficiência menor em comparação com o escoamento contracorrente uma vez em que nesse tipo de escoamento a temperatura de saída do fluido frio nunca poderá ser superior à do fluido quente (INCROPERA; DEWITT, 2013).

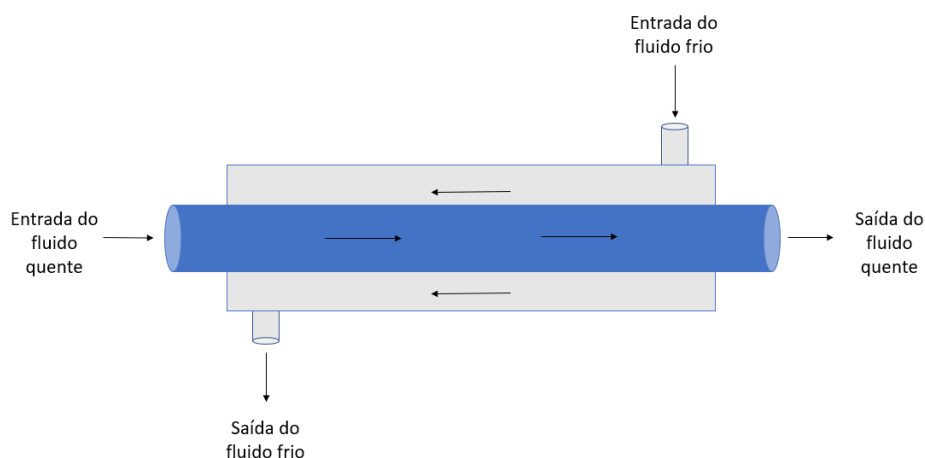
Figura 1 – Regime de escoamento paralelo.



Fonte: Adaptado de Çengel; Ghajar, p.630, 2012.

No escoamento contracorrente, Figura 2, os fluidos quente e frio fluem em direções opostas no trocador de calor, permitindo um contato direto em uma região inicial do trocador. Isso otimiza a utilização da área de superfície disponível, resultando em uma transferência de calor eficiente. Além disso, o escoamento contracorrente promove um aumento gradual da temperatura do fluido frio e uma diminuição da temperatura do fluido quente ao longo do trocador de calor, mantendo uma diferença média de temperatura e melhorando ainda mais a transferência de calor (INCROPERA; DEWITT, 2013). Por isso, o escoamento contracorrente é conhecido por fornecer a transferência de calor mais eficiente.

Figura 2 – Regime de escoamento contracorrente.



Fonte: Adaptado de Çengel; Ghajar, p.630, 2012.

Portanto, durante o projeto e a seleção de trocadores de calor, é fundamental considerar esses aspectos, como a configuração do trocador e o arranjo de escoamento, a fim de assegurar a operação eficiente e a otimização do desempenho térmico do sistema em questão.

3.3 TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS

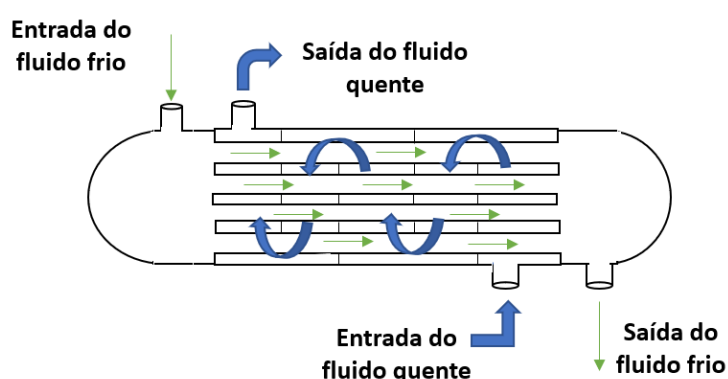
Os trocadores de calor do tipo casco e tubo são dispositivos amplamente utilizados na indústria para transferência de calor em diversos processos. Consistem em um conjunto de tubos circulares inseridos em um casco cilíndrico de maior diâmetro, com os eixos dos tubos alinhados ao do casco. Esses trocadores são especialmente empregados em aplicações de resfriamento de óleo de processos e desempenham funções importantes em usinas de energia, indústria química e outras áreas (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

No projeto dos trocadores de calor casco e tubo, um fluido flui através dos tubos internos, enquanto o outro flui ao redor dos tubos, no espaço do casco. Essa configuração permite uma área de transferência de calor eficiente entre os fluidos. Além disso, é possível realizar uma variação no número de passes pelos tubos, o que influencia diretamente na eficiência da transferência de calor (CAO, 2010).

3.3.1 Número de passes

O número de passes refere-se ao caminho percorrido pelos fluidos dentro dos tubos antes de saírem do trocador. Em um trocador de calor com apenas um passe, Figura 3, os fluidos entram pelo trocador e percorrem os tubos em um único trajeto, saindo pelo outro lado. Essa configuração é conhecida como passe simples e é amplamente utilizada em aplicações em que se busca uma transferência de calor eficiente com um único percurso pelos tubos.

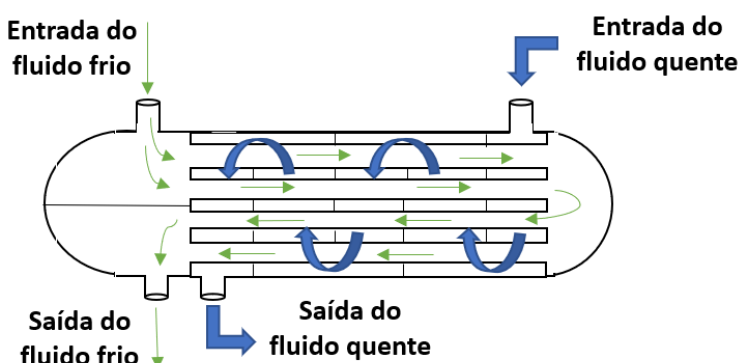
Figura 3 – Trocador de calor casco tubos de passe simples.



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2003.

Por outro lado, nos trocadores de calor com múltiplos passes, os fluidos são direcionados para percorrer os tubos mais de uma vez antes de deixarem o trocador. Essa configuração oferece um caminho de fluxo mais longo para os fluidos, aumentando a área de contato e melhorando a eficiência da transferência de calor. Quando os fluidos fluem pelos tubos em duas passagens separadas, Figura 4, isto é chamado de passe duplo.

Figura 4 – Trocador de calor casco tubos de passe duplo.



Fonte: Adaptado de Geankoplis, 2003.

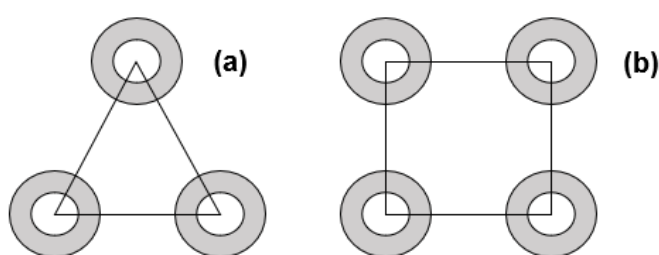
A escolha entre o passe simples e passe duplo pelos tubos depende das exigências específicas de cada aplicação, levando em consideração fatores como a carga térmica, queda de pressão, custos e outras considerações de projeto.

3.3.2 Arranjo dos tubos

O arranjo dos tubos em um trocador de calor pode adotar diferentes configurações, sendo o arranjo triangular e o arranjo quadrado exemplos comuns. Essas configurações possuem características distintas em termos de eficiência, compactação e facilidade de limpeza.

No arranjo triangular, Figura 5 (a), os tubos são dispostos de forma que formam um padrão triangular, em que cada tubo é adjacente a três outros tubos. Esse arranjo proporciona uma alta eficiência de transferência de calor, devido à grande área de superfície disponível para o contato entre os fluidos. Além disso, o arranjo triangular favorece a formação de turbulência no fluxo dos fluidos, o que melhora a transferência de calor. No entanto, esse arranjo pode resultar em uma menor compactação, pois há mais espaço vazio entre os tubos, ocupando uma área maior (KUPPAN, 2000).

Figura 5 – Arranjo dos tubos: (a) Arranjo triangular; (b) Arranjo quadrado.



Fonte: Adaptação de Kuppan, 2000.

Já no arranjo quadrado, Figura 5 (b), os tubos são dispostos de forma perpendicular tanto no sentido horizontal quanto vertical, formando uma grade quadrada. Essa configuração também proporciona uma alta eficiência de transferência de calor, devido à grande área de superfície de contato. Além disso, o arranjo quadrado oferece uma boa compactação dos tubos, permitindo otimizar o espaço físico ocupado pelo trocador de calor. A disposição ordenada e regular dos tubos facilita a limpeza individual dos mesmos (KUPPAN, 2000).

Ao selecionar o arranjo dos tubos, é necessário considerar as características específicas do trocador de calor, como a aplicação, as restrições de espaço e as condições operacionais. Cada arranjo tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha adequada dependerá das necessidades e requisitos do projeto.

3.3.3 Chicanas

Para aumentar a eficiência da transferência de calor no lado do casco, são comumente utilizados defletores ou chicanas. Esses dispositivos são inseridos no espaço do casco entre os tubos, direcionando o fluxo do fluido e promovendo turbulência adicional. Isso aumenta o coeficiente de transferência térmica e melhora o desempenho do trocador de calor. Os defletores também têm a função de suportar os tubos, evitando a vibração excessiva (KAKAÇ; LIU, 2002).

Ao aumentar a turbulência do fluxo, as chicanas também contribuem para a melhoria da transferência de calor em regiões de baixa velocidade do fluido, onde a transferência de calor convectiva pode ser limitada. Elas aumentam a agitação do fluido nessas regiões, melhorando a transferência de calor por convecção e otimizando o desempenho do trocador de calor (KUPPAN, 2000).

No entanto, é importante considerar que as chicanas também podem resultar em um aumento das perdas de carga no sistema, pois introduzem obstáculos ao fluxo dos fluidos. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a eficiência da transferência de calor e as perdas de carga, selecionando o tipo de chicanas adequado e dimensionando corretamente o trocador de calor (BICHKAR; *et al.*, 2018).

3.3.4 Distribuição dos fluidos

A distribuição adequada de fluidos em um trocador de calor é de extrema importância para garantir uma boa eficiência na transferência de calor. A forma como o fluido é distribuído pelo trocador de calor influencia diretamente na capacidade de troca térmica entre os meios envolvidos.

A distribuição uniforme de fluidos permite que todos os tubos ou canais do trocador de calor sejam percorridos de maneira eficiente pelo fluido, garantindo que

toda a superfície de troca térmica seja aproveitada. Isso resulta em uma maior área de contato entre os fluidos, aumentando a transferência de calor (KAKAÇ; LIU, 2002).

Por outro lado, uma distribuição não uniforme de fluidos pode levar a regiões com fluxo insuficiente, conhecidas como zonas mortas, onde ocorre uma transferência de calor ineficiente. Essas áreas podem resultar em baixa eficiência térmica e diminuição do desempenho geral do trocador de calor. A distribuição adequada de fluidos ajuda a minimizar essas zonas mortas e garantir uma distribuição homogênea do fluxo.

Minimizar as perdas de carga é crucial na distribuição de fluidos para um trocador de calor eficiente. Uma distribuição adequada evita desequilíbrios de fluxo, reduzindo as perdas de carga e o consumo de energia. Assim, uma distribuição uniforme de fluidos contribui para a otimização da eficiência energética e da transferência de calor no trocador (KAKAÇ; LIU, 2002).

3.4 ANÁLISE TÉRMICA EM TROCADORES DE CALOR

A análise térmica de trocadores de calor desempenha um papel crucial no projeto e na avaliação de desempenho desses dispositivos essenciais em diversos setores industriais. Essa análise visa compreender e quantificar a transferência de calor entre os fluidos envolvidos, considerando fatores como propriedades térmicas, geometria do trocador, arranjo de escoamento e perdas térmicas.

3.4.1 Coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor (U) é um parâmetro importante na análise e projeto de trocadores de calor. Ele representa a taxa global de transferência de calor por unidade de área entre os fluidos quente e frio através do trocador de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). A relação entre essas grandezas pode ser estabelecida pela Equação 1, sendo esse coeficiente de suma importância para compreender e avaliar o desempenho térmico dos trocadores de calor.

$$U = \frac{Q}{A * \Delta T_{DTML}} \quad (1)$$

Em que:

U – Coeficiente global de transferência de calor [$W/m^2 \cdot K$];

Q – Taxa de transferência de calor entre os fluidos [W];

A – Área de transferência de calor entre os fluidos [m^2];

ΔT_{DTML} – Diferença de temperatura média logarítmica (DTML) entre os fluidos, [K].

Essa equação mostra que a taxa de transferência de calor é diretamente proporcional ao coeficiente global de transferência de calor, isto é, quanto maior o valor de U , maior será a Q . Além disso, U é influenciado por diversos fatores, incluindo as propriedades dos fluidos, o tipo de escoamento, a geometria do trocador de calor e a resistência térmica dos materiais envolvidos.

Outro fator importante que se deve considerar é que a área de transferência de calor (A) também desempenha um papel significativo na relação entre U e Q . Uma área maior de transferência de calor resultará em uma maior Q , desde que os outros parâmetros se mantenham constantes.

Portanto, para aumentar a Q em um trocador de calor, é possível melhorar o U através de otimização do design, seleção de fluidos com propriedades térmicas favoráveis e controle adequado do escoamento (KAKAÇ; LIU, 2002). Além disso, aumentar a área de transferência de calor também pode aumentar a Q .

3.4.2 Taxa de transferência de calor

A taxa de transferência de calor (Q) refere-se à medida direta da quantidade de calor transferida entre dois meios ou superfícies em um sistema de troca térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012)

Pode ser determinada a partir de diferentes técnicas, dependendo do sistema e das condições específicas. Alguns métodos comuns incluem a medição da diferença de temperatura entre os meios envolvidos, a utilização de sensores de temperatura e fluxo de calor, a análise da variação de temperatura em diferentes pontos do sistema, entre outros.

A taxa de transferência de calor é essencial na análise térmica de sistemas de troca de calor, que são projetados para transferir eficientemente o calor entre os fluidos envolvidos. Em trocadores de calor, em que ocorre a transferência de calor entre dois fluidos, a taxa de transferência de calor pode ser descrita levando em

consideração a vazão mássica, o calor específico dos fluidos e a diferença de temperatura entre eles (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011). Essa relação pode ser expressa através da Equação 2.

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (2)$$

Em que:

Q – Taxa de transferência de calor, [W];

m – Vazão mássica do fluido, [kg/s];

C_p – Calor específico a pressão constante do fluido, [J/(kg·K)];

ΔT – Diferença de temperatura entre o fluido quente e o fluido frio, [K].

A vazão mássica indica a quantidade de massa de fluido que passa pelo trocador de calor por unidade de tempo. Quanto maior a vazão mássica, maior será a quantidade de calor transferida entre os fluidos. O calor específico a pressão constante (C_p) é uma propriedade física do fluido que indica a quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa do fluido em uma unidade de temperatura, mantendo a pressão constante. Quanto maior o calor específico, maior será a capacidade do fluido de absorver calor.

E a diferença de temperatura (ΔT) entre os fluidos quente e frio é uma medida da variação de temperatura ao longo do trocador de calor. Quanto maior a diferença de temperatura, maior será a taxa de transferência de calor.

3.4.3 Método da diferença de temperatura média logarítmica

O método da diferença de temperatura média logarítmica (DTML) é um método amplamente utilizado para o cálculo de trocadores de calor. Esse método permite estimar a taxa de transferência de calor e a área de troca térmica necessária para alcançar determinado desempenho térmico no trocador (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

O DTML relaciona a taxa total de transferência de calor com as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área superficial disponível para a troca de calor. Para aplicação do método é necessário conhecer as temperaturas de entrada e saída tanto do fluido quente quanto do fluido

frio. Essas temperaturas são geralmente medidas ou estimadas com base nas condições de operação do sistema.

A partir das temperaturas de entrada e saída dos fluidos, calcula-se a diferença de temperatura média logarítmica utilizando-se a Equação 3.

$$DTML = \frac{(\Delta T_1) - (\Delta T_2)}{\ln \frac{(\Delta T_1)}{(\Delta T_2)}} \quad (3)$$

Em que:

ΔT_1 – Diferença de temperatura entre o fluido quente na entrada e o fluido frio na saída, [K];

ΔT_2 – Diferença de temperatura entre o fluido quente na saída e o fluido frio na entrada, [K].

A Equação 3 é aplicável para determinar a DTML em um fluxo ideal em trocadores de calor. No entanto, em trocadores de calor com passagens múltiplas, o fluxo ideal não é alcançado.

Quando um trocador de calor apresenta dois passes pelos tubos, por exemplo, ocorre inicialmente um fluxo em paralelo, mas ao retornar no segundo passe, ocorre um fluxo contracorrente em relação ao casco, dependendo das entradas e saídas dos fluidos. Portanto, é necessário determinar o fator de eficiência de temperatura (F_t) para considerar esses diferentes sentidos de fluxo no mesmo equipamento, o qual é essencial para correção da DTML no casco do trocador de calor (NITSCHE; GBADAMOSI, 2015).

A Equação 4 é utilizada para obter a DTML real no casco, levando em conta o fator de correção F_t . Essa abordagem é fundamental para garantir a precisão dos cálculos em trocadores de calor com múltiplas passagens.

$$DTML_{real} = F_t * DTML \quad (4)$$

Para obter o fator de eficiência de temperatura (F_t), é necessário utilizar o diagrama de Kern (1987, p.828), que leva em consideração constantes que relacionam os fluidos de entrada e saída. O Diagrama 1 pode ser encontrado no Anexo A.

3.4.4 Eficiência

A eficiência de um trocador de calor é definida como a razão entre a quantidade de calor transferido efetivamente e a quantidade de calor disponível para transferência. Para calcular a eficiência de um trocador de calor, é necessário levar em consideração a quantidade de calor transferido pelos fluidos, bem como as temperaturas de entrada e saída dos fluidos (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011). Um método comum para calcular a eficiência é utilizando a diferença de temperaturas médias logarítmicas (DTML) entre os fluidos.

A Equação 5 pode ser utilizada para calcular a eficiência de um trocador de calor usando a DTML.

$$Eficiência = \frac{Q_{transferido}}{Q_{disponível}} * 100 \quad (5)$$

Em que:

$Q_{transferido}$ – Quantidade de calor transferida entre os fluidos [W];

$Q_{disponível}$ – Quantidade máxima de calor que poderia ser transferida, considerando as temperaturas de entrada e saída dos fluidos [W].

É importante lembrar que o cálculo da eficiência de um trocador de calor pode variar dependendo do tipo específico de trocador, das propriedades dos fluidos envolvidos e das condições de operação.

3.5 PROTÓTIPOS DE TROCADORES DE CALOR

Na literatura, é possível encontrar alguns protótipos de trocadores de calor casco e tubo abordados em estudos recentes. Neto (2019) desenvolveu um protótipo em escala reduzida com o objetivo de avaliar a eficiência energética do trocador de calor casco e tubo nos fluxos paralelo e contracorrente. O protótipo consistiu em um tubo de acrílico de 100 mm de diâmetro e 1,00 metro de comprimento, além de 12 tubos de alumínio com diâmetro externo de 12,7 mm e 1,00 metro de comprimento. A temperatura de entrada do fluido quente foi fixada em 40 °C, enquanto a vazão do fluido frio foi variada de 3,32 L/min a 0,55 L/min nos testes de fluxo paralelo. Nos testes de fluxo contracorrente, a vazão do fluido quente foi mantida constante em 3,44 L/min,

e a vazão do fluido frio variou de 3,27 L/min a 0,64 L/min. Observou-se que em vazões menores do fluido frio, houve uma maior troca térmica, resultando em um aumento mais significativo da temperatura do fluido frio. A eficiência do trocador de calor foi constatada como sendo maior no sentido contracorrente (NETO, 2019).

Outro estudo relevante foi realizado por dos Santos *et al.* (2021), que desenvolveram um protótipo de trocador de calor casco e tubo para aquecer caldo decantado no processo de produção de açúcar. O protótipo consistiu em um tubo externo de alumínio e tubos internos de cobre. A vazão do fluido frio foi fixada em 0,45 L/min, e a temperatura de entrada do fluido quente foi de aproximadamente 93 °C. Para avaliar a eficiência do protótipo, utilizou-se o cálculo da DTML. Os resultados indicaram que o protótipo foi capaz de elevar a temperatura do fluido frio em cerca de 40 °C em relação à temperatura inicial. Além disso, os resultados obtidos foram superiores aos valores esperados, quando comparados com dados encontrados na literatura para condições semelhantes.

Martinelli *et al.* (2017) desenvolveram dois protótipos de trocadores de calor casco e tubo, compostos por tubos de cobre e cascos de PVC. Os protótipos foram colocados em série, e o teste foi conduzido utilizando água em diferentes temperaturas como fluidos quente e frio. Para controlar as temperaturas de entrada do fluido quente, utilizaram-se dois banhos termostáticos operando a 40 °C e 60 °C, com vazões de 1,07 kg/min e 1,89 kg/min, respectivamente. O fluido frio, passando pelos tubos de cobre, era água da torneira a 22 °C, com vazão de 0,54 kg/min. Ao final do processo, o fluido frio saiu do trocador de calor aquecido a 41 °C.

Considerando os aspectos de crescimento em aplicações industriais e a importância de compreender o funcionamento do processo de transferência de calor em trocadores de calor, surge a proposta de desenvolver um protótipo com características semelhantes, mas com a incorporação da tecnologia tridimensional. Sendo que a escolha da impressão 3D foi o fato de conciliar o avanço dessa área com o fato de querer obter maiores conhecimentos sobre a técnica. Posteriormente o protótipo será destinado ao uso educacional por estudantes, visando aprimorar seu aprendizado.

3.6 IMPRESSÃO TRIDIMENSIONAL (3D)

A impressão 3D é uma tecnologia que permite a fabricação de objetos tridimensionais com base em modelos digitais. É comumente utilizada a técnica de modelagem por fusão e deposição (FDM), na qual um material polimérico fundido é extrudado por uma cabeça móvel de impressão sobre uma mesa aquecida (GEBHARDT; HÖTTER, 2016). O processo ocorre em sucessivas camadas, com a altura da camada geralmente variando de 0,05 a 0,4 mm. Os materiais poliméricos são fornecidos em forma de filamentos com diâmetro de 1,75 mm e são alimentados no sistema de extrusão através de bobinas e um mecanismo de tracionamento. A extrusão ocorre por meio de um bico aquecido, normalmente a temperaturas acima de 200 °C (GIBSON, 2014).

A configuração dos parâmetros operacionais é essencial na impressão 3D por FDM. As temperaturas do bico e da mesa de impressão variam de acordo com o material polimérico utilizado, geralmente entre 200-275 °C para o bico e 50-110 °C para a mesa (SHAHRUBUDIN *et al.*, 2019). A velocidade de impressão depende das propriedades do material, como viscosidade (GELHAUSEN *et al.*, 2018), e a altura da camada é determinada pela resolução desejada para o objeto final (GAO *et al.*, 2015).

Atualmente, existem várias opções de impressoras 3D disponíveis no mercado, e a técnica de FDM é amplamente adotada devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência. Os arquivos de projeto são desenvolvidos em software de modelagem assistida por computador, como o AutoCAD, e a impressão 3D oferece flexibilidade e rapidez na modificação de componentes. Essa tecnologia tem ganhado destaque em diversos campos de aplicação devido à sua versatilidade e capacidade de produção de peças personalizadas de forma ágil e econômica (GOLDBERG; *et al.*, 2022; VIJAYAN, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será abordado em detalhes os materiais utilizados na construção do protótipo, incluído equipamentos, componentes e recursos específicos. Além disso, serão apresentados os métodos experimentais adotados para os testes de eficiência do protótipo, incluindo os parâmetros operacionais variados durante os testes.

4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O protótipo do trocador de calor foi construído a partir de um tubo de acrílico de 100 mm de diâmetro externo e 500 mm de comprimento, representando o casco do trocador. Internamente, foram utilizados 12 tubos de alumínio com diâmetro externo de 12,6 mm, diâmetro interno de 9,6 mm e comprimento de 568 mm. As flanges, nas extremidades do trocador, foram confeccionadas em uma impressora 3D disponível no Laboratório de Engenharia Química do IFRS - Campus Feliz.

A impressora do tipo FDM (Core A3 V2, GTMaX 3D, Brasil), contém uma câmara fechada de impressão 300 x 300 x 300 mm. Para alimentar o filamento é utilizado um sistema de extrusão tipo Bowden com bico (em metal) de 0,5 mm de diâmetro. As flanges e chicanas foram impressas a partir do plástico acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Elas ainda são compostas por entradas e saídas de água, e as mesmas foram fixadas ao tubo de acrílico com hastes roscadas. Além disso, foram adicionadas cinco chicanas no trocador de calor que também foram confeccionadas na impressora 3D.

Os dois fluidos utilizados foram água, sendo que para o aquecimento do fluido quente utilizou-se um aquecedor a gás (KO 12M 1BNLP1, Komeco, Brasil). Para a medição da vazão, foram utilizados dois rotômetros (Série AP, Aplitech, Brasil) que apresentam faixa de medição de 1 a 8 L/min, um deles medindo a vazão correspondente ao fluido frio e o outro medindo a vazão correspondente ao fluido quente. Tanto o aquecedor quanto os rotômetros fazem parte da bancada do trocador de placas existente no laboratório do campus, conforme Figura 6, e foram aproveitados na montagem do sistema final para avaliação dos parâmetros necessários. A variação da vazão foi obtida por meio do ajuste das válvulas responsáveis pela regulação do fluxo, permitindo assim a leitura da vazão nos rotômetros.

Figura 6 – Rotômetros e aquecedor utilizados.



Fonte: A autora, 2023.

Em cada uma das entradas e saídas das flanges foram adicionadas mangueiras para entrada e saída de água e os sensores de temperatura do tipo Pt100, que auxiliaram na medição das temperaturas. Os sensores foram conectados em um registrador de dados e controlador programável (FieldLogger, Novus, Brasil), conforme Figura 7.

Figura 7 – Registrador de dados e controlador programável utilizado.



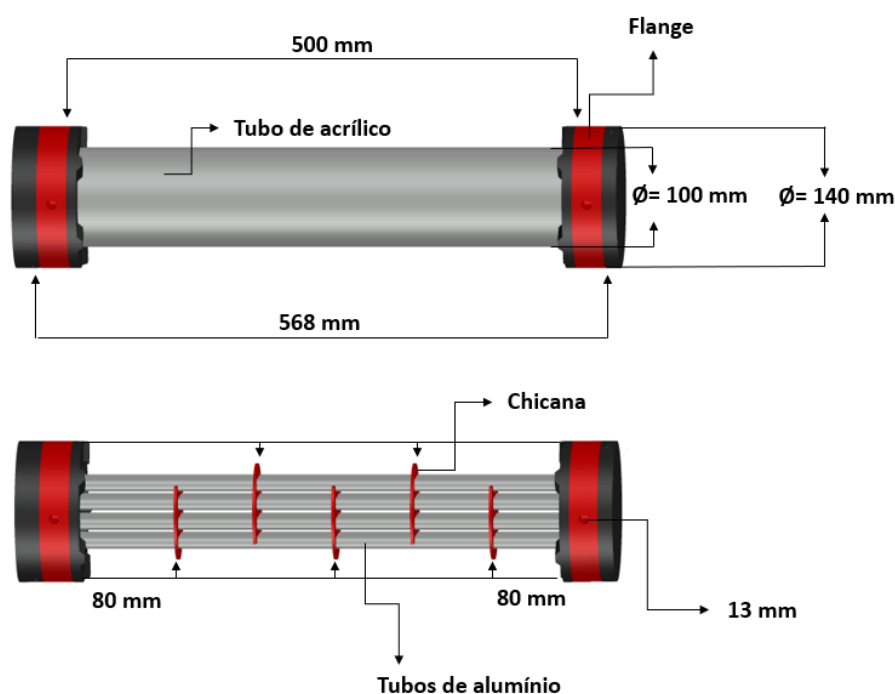
Fonte: A autora, 2023.

Para a construção do protótipo foi necessário realizar algumas projeções das peças que seriam impressas na impressora tridimensional. Para isso utilizou-se o software de desenho auxiliado por computador AutoCAD® 2022 (AutoDesk Inc., EUA).

Para o processo de preparação da peça para impressão foi utilizado o software Simplify 3D® (Simplify 3D Inc., EUA). Nesse software utilizado, é viável personalizar vários parâmetros operacionais da impressão, tais como velocidade, altura de camada, preenchimento, suporte e outros aspectos.

A Figura 8, elaborada no AutoCAD, apresenta o modelo final para a construção do protótipo. O desenho mostra as flanges e chicanas que se conectam ao acrílico e aos tubos de alumínio. Esse modelo serviu como referência para a montagem e construção do protótipo.

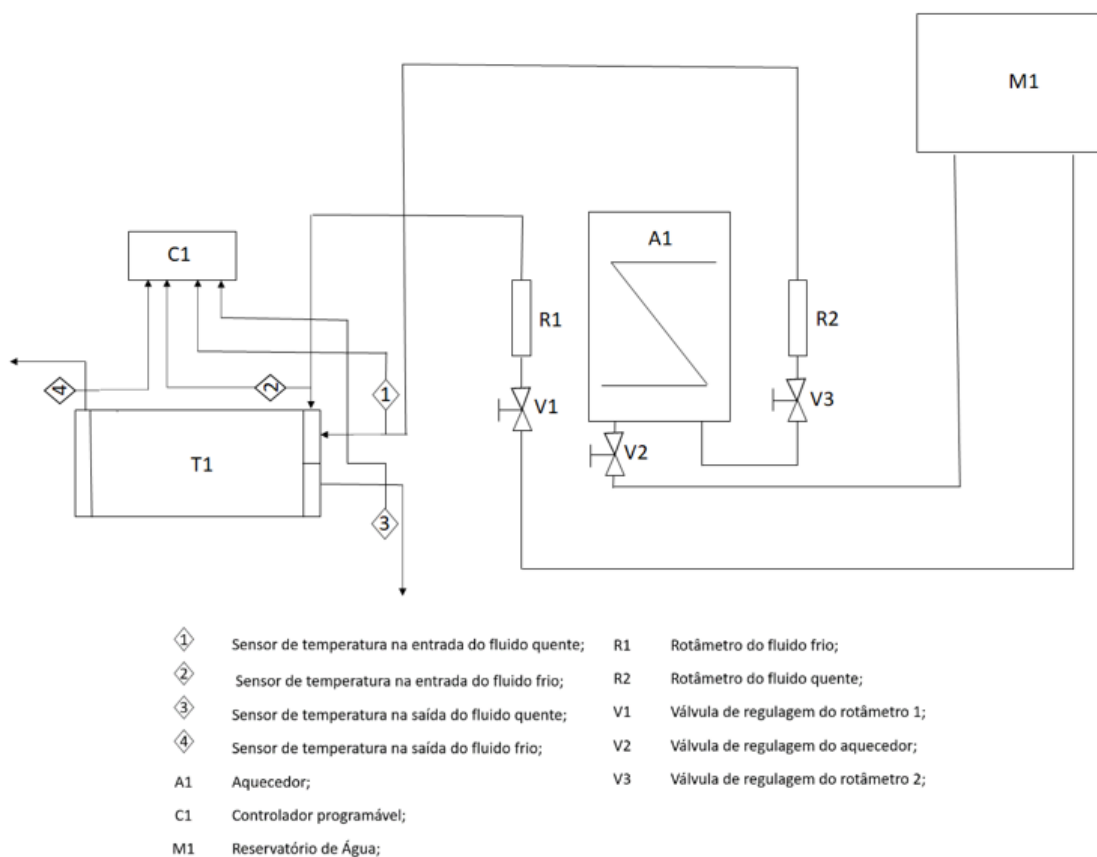
Figura 8 – Protótipo idealizado.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O diagrama de instrumentação do protótipo do trocador de calor, ilustrado na Figura 9, apresenta uma representação visual dos principais componentes e instrumentos envolvidos no sistema.

Figura 9 – Diagrama de instrumentação do protótipo do trocador de calor.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para medir a temperatura dos fluidos, estão presentes sensores de temperatura representados por losangos enumerados de 1 a 4. Esses sensores estão posicionados antes da entrada e depois da saída dos fluidos no trocador de calor, permitindo a medição das temperaturas de entrada e saída de ambos os fluidos. Os medidores de vazão (rotômetros) estão localizados em cada linha de fluido, sendo que aquele que faz a medição do fluido quente está posicionado logo após o aquecedor. Além do sistema representado, ainda se utilizou uma câmera infravermelha (One Gen 3, Flir, EUA) na medição da temperatura de superfície do trocador de calor.

4.2 MÉTODOS

Foram realizados experimentos para a avaliação do desempenho do trocador de calor em diferentes condições operacionais. A partir dos dados coletados, foi possível calcular a taxa de transferência de calor, o coeficiente global de troca térmica experimental e a eficiência do protótipo.

4.2.1 Calibração de sensores

A calibração dos sensores de temperatura foi executada empregando um banho ultratermostático (SSDU-10 L, SolidSteel, Brasil). Os sensores foram cuidadosamente posicionados no interior do banho e foi então realizada uma variação controlada da temperatura na faixa de 20 a 60 °C.

4.2.2 Variação da vazão do fluido frio

Neste experimento, a temperatura de entrada do fluido quente foi mantida constante em aproximadamente 50 °C, enquanto a temperatura do fluido frio foi a temperatura ambiente em torno de 21 °C, no dia do experimento. A vazão do fluido quente foi mantida constante a 4,8 L/min, enquanto que a do fluido frio foi variada de 1 a 8 L/min.

Repetiu-se esse mesmo experimento de variação do fluido frio de 1 a 8 L/min para as vazões de fluido quente mantidas constantes em 5,9 e 6,9 L/min.

4.2.3 Variação da vazão do fluido quente

Neste experimento, a temperatura de entrada do fluido quente foi mantida constante em aproximadamente 50 °C, enquanto a temperatura do fluido frio foi a temperatura ambiente em torno de 21 °C, no dia do experimento. A vazão do fluido quente foi variada em 4,8; 5,9 e 6,9 L/min enquanto que a do fluido frio foi mantida constante em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 L/min.

4.2.4 Avaliação do desempenho do protótipo

O desempenho do protótipo do trocador de calor foi obtido através da relação das taxas de transferência de calor obtidas nos experimentos. Na qual, levou-se em consideração as taxas de transferências de calor do fluido frio e a do fluido quente.

4.2.5 Avaliação da temperatura superficial utilizando câmera infravermelho

Neste experimento, a avaliação da temperatura superficial no protótipo do trocador de calor foi realizada por meio da utilização de uma câmera infravermelho. Após a montagem do protótipo do trocador de calor, a câmera infravermelho foi posicionada de modo a capturar a imagem térmica do sistema em operação. Durante o experimento, os fluidos quente e frio foram devidamente alimentados no protótipo, e por meio da câmera foram registradas as temperaturas da superfície do dispositivo para vazões de fluido frio de 1 e 2 L/min, mantendo-se constante a vazão do fluido quente a 5 L/min.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente será descrito o processo de construção do protótipo do trocador de calor casco tubo com dois passes pelos tubos. Será fornecido um relato detalhado das etapas envolvidas na montagem do protótipo. Em sequência, serão apresentados os resultados obtidos por meio da coleta de dados experimentais durante a operação do protótipo. Serão explorados diferentes parâmetros, como taxas de vazão dos fluidos, diferenças de temperatura e outros fatores relevantes.

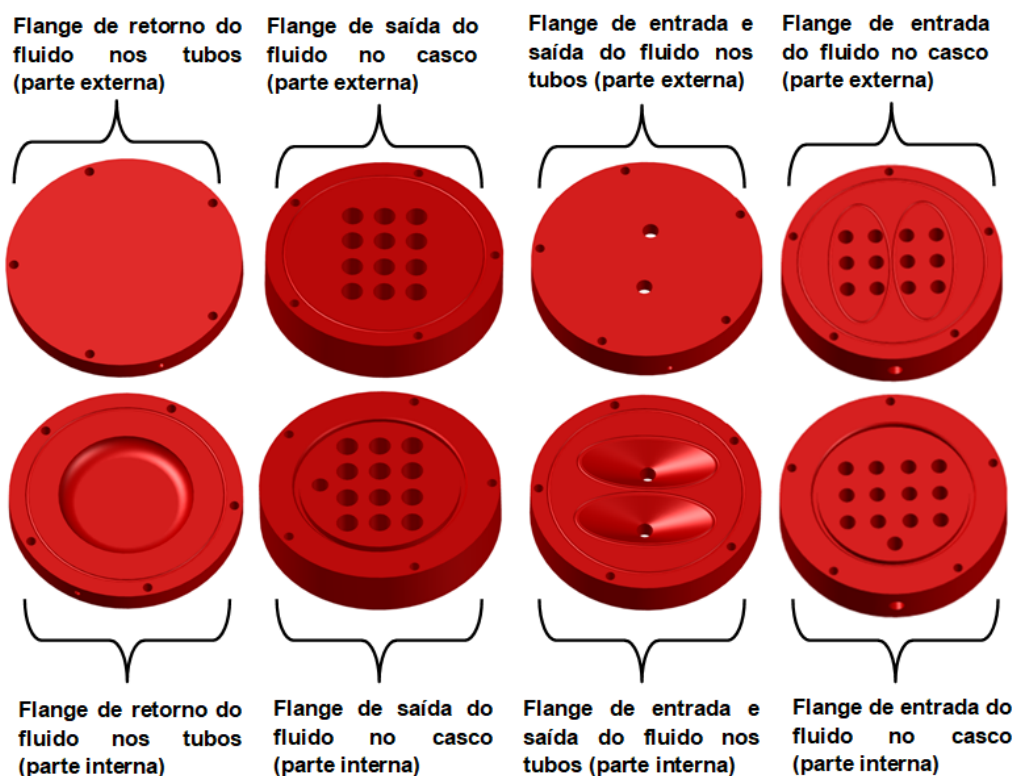
5.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

5.1.1 Modelagem tridimensional

Através do software AutoCAD, foram gerados os desenhos necessários para a construção dos objetos em três dimensões. Esses desenhos incluíram detalhes como a geometria, as dimensões, os ângulos e outras características do objeto a ser impresso. No caso das flanges, Figura 10, foi levado em consideração a passagem dupla do fluido quente nos tubos, isto é, já havia sido dimensionado em uma das flanges um espaço cônico e separado para as entradas e saídas do fluido enquanto que na outra seria apenas um espaço para que houvesse a passagem de volta. No caso, como o trocador possuía doze tubos de alumínio, em seis deles havia a entrada do fluido e ao dar a volta na outra extremidade do trocador eles retornariam pelos outros seis tubos.

Na Figura 10 é possível visualizar as flanges utilizadas nas extremidades do trocador de calor, sendo elas as responsáveis pelas entradas e saídas dos fluidos do trocador de calor. É possível observar o formato cônico naquela que representa a entrada e saída dos fluidos dos tubos e também a flange fechada a qual foi desenhada para realizar o retorno do fluido nos tubos. As flanges feitas para o casco possuíam entradas e saídas de água na lateral e também apresentavam entradas na qual ocorreu o encaixe do tubo de acrílico.

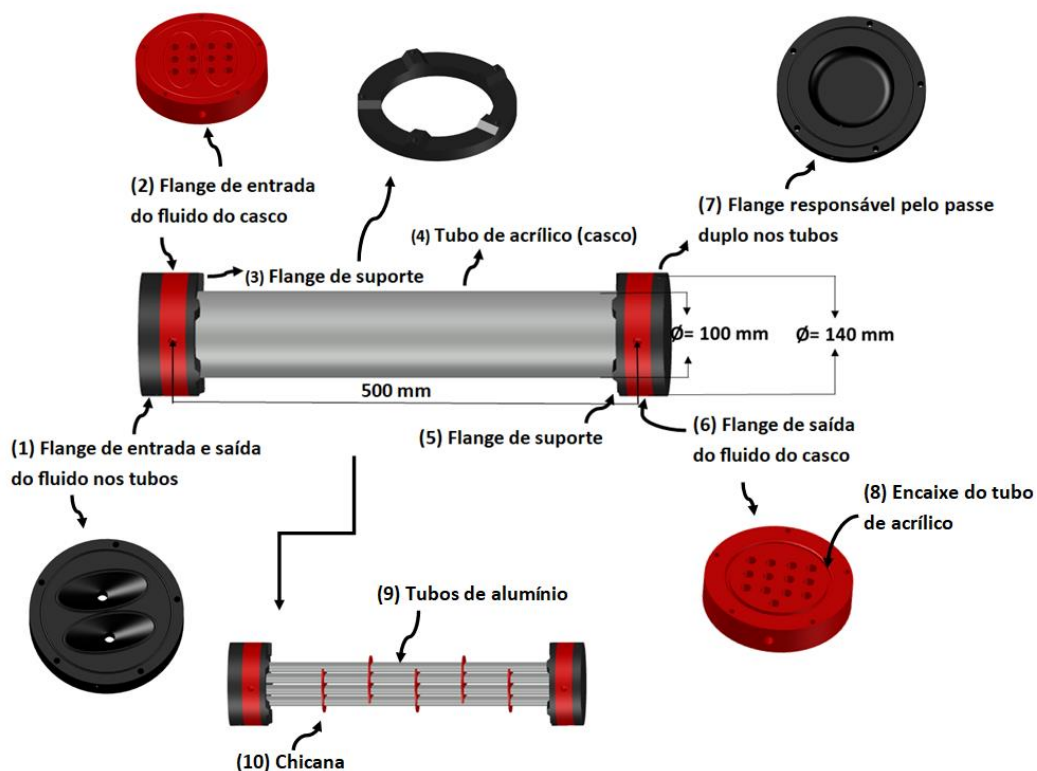
Figura 10 – Flanges desenhadas no AutoCAD.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A partir do desenho dessas peças, foi possível realizar o processo de impressão 3D com base nas camadas sucessivas de material, seguindo as especificações e instruções fornecidas pelo software de modelagem (Simplify 3D, EUA). Esse software é comumente adotado em aplicações de impressão 3D devido a sua ampla gama de recursos e capacidades de modelagem. Além dos desenhos das flanges, foi também realizado um desenho final do protótipo retratando como se daria o encaixe das flanges, conforme Figura 11.

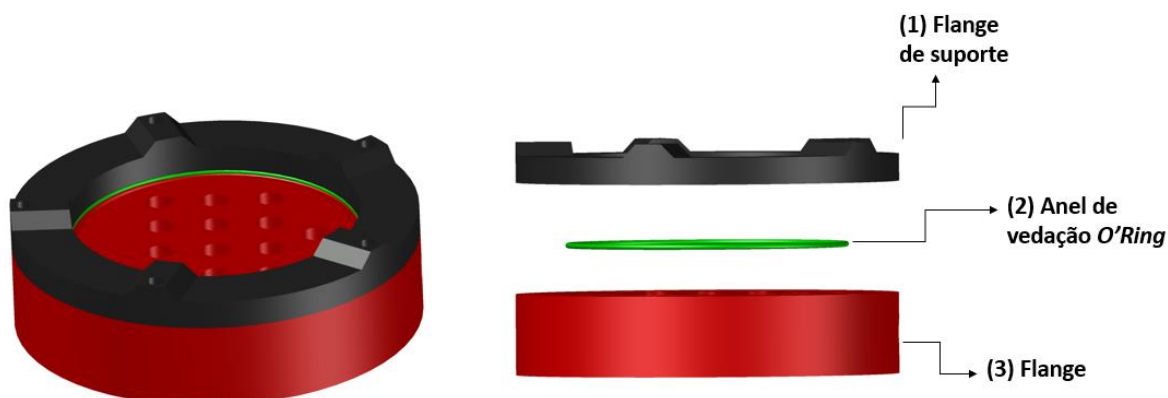
Figura 11 – Desenhos do protótipo realizadas em software.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para dar maior suporte e encaixe adequado ao protótipo foram ainda projetadas peças de suporte, conforme Figura 12. Essas peças de suporte foram idealizadas para aplicar uma força de compressão ao *O-Ring*, comprimindo-o contra as superfícies do tubo e do casco. Essa compressão resulta na deformação do *O-Ring*, fazendo com que ele se ajuste firmemente às superfícies de contato. Isso cria uma vedação hermética, impedindo o escape de fluido do casco.

Figura 12 – Flange de suporte e anel *O'Ring*.

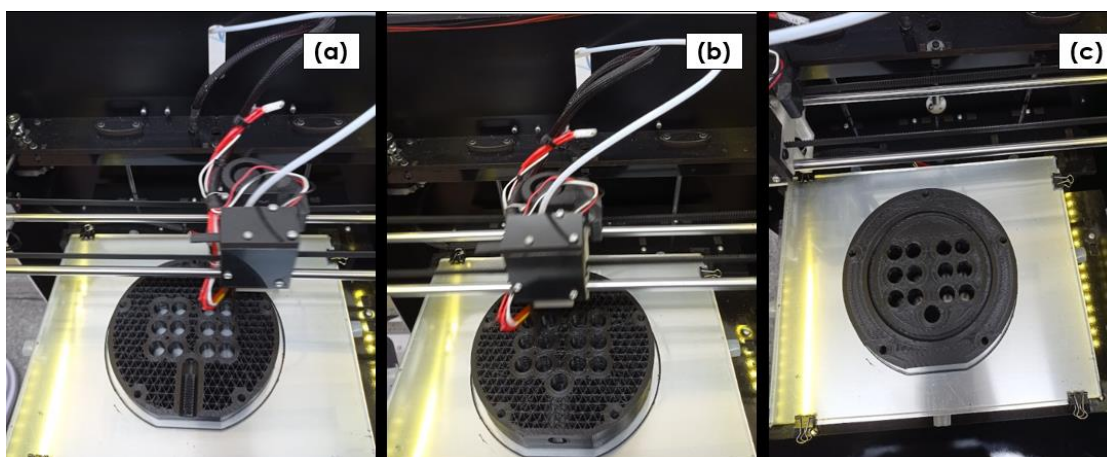


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

5.1.2 Impressão das peças na impressora 3D

Durante o processo de impressão, a impressora 3D seguiu as instruções do arquivo de projeto para depositar o material, camada por camada. Conforme as camadas eram adicionadas, as peças começavam a tomar forma gradualmente, conforme é possível ver o processo de impressão na Figura 13.

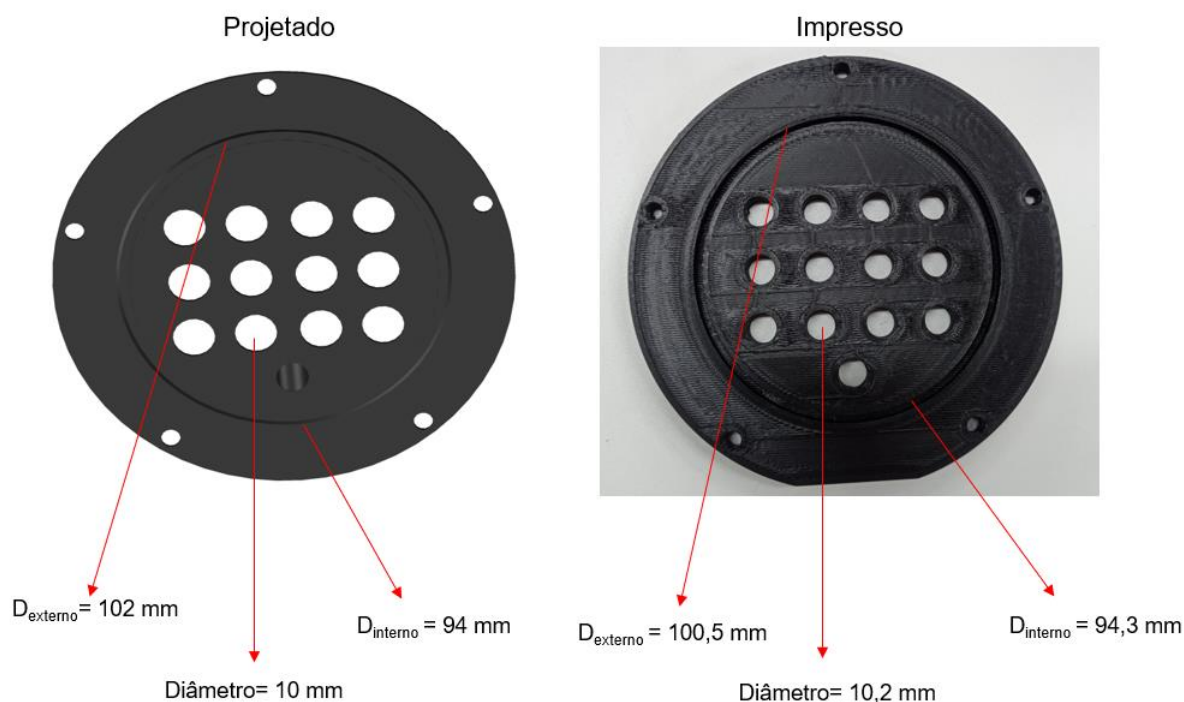
Figura 13 – Impressão tridimensional de uma das flanges: (a) etapa inicial da impressão; (b) etapa mais avançada da impressão; (c) flange finalizada.



Fonte: A autora, 2023.

Durante essa etapa da impressão, tornou-se evidente que, apesar da ampla adoção da tecnologia de impressão tridimensional ao longo das últimas décadas, persistem certas limitações e desafios a serem superados. Ao imprimir as primeiras peças, percebeu-se que a impressão apresentava alguns desvios dimensionais da peça que havia sido desenhada no software. Isto é, conforme Figura 14, é possível visualizar a impressão com desvios do tamanho originalmente projetado, o que ocasionou problemas na hora de encaixe do tubo de acrílico.

Figura 14 – Comparação do objeto projetado e do objeto impresso.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

É possível visualizar que para o encaixe do tubo de acrílico já havia sido previamente estabelecido uma margem de erro, isto é, o tubo de acrílico utilizado tinha um diâmetro externo (D_{externo}) de 100 mm e interno (D_{interno}) de 97 mm e o desenho foi feito considerando um diâmetro externo com 2 mm a mais e o interno com 3 mm a menos. No entanto, a peça impressa possuía um diâmetro externo de 100,5 mm (1,5 mm menor) e o diâmetro interno de 94,3 mm (0,3 mm maior). Além disso, observa-se também uma variação na medida dos encaixes dos tubos de alumínio, no qual a peça impressa foi 2 mm maior do que o desenho feito no software.

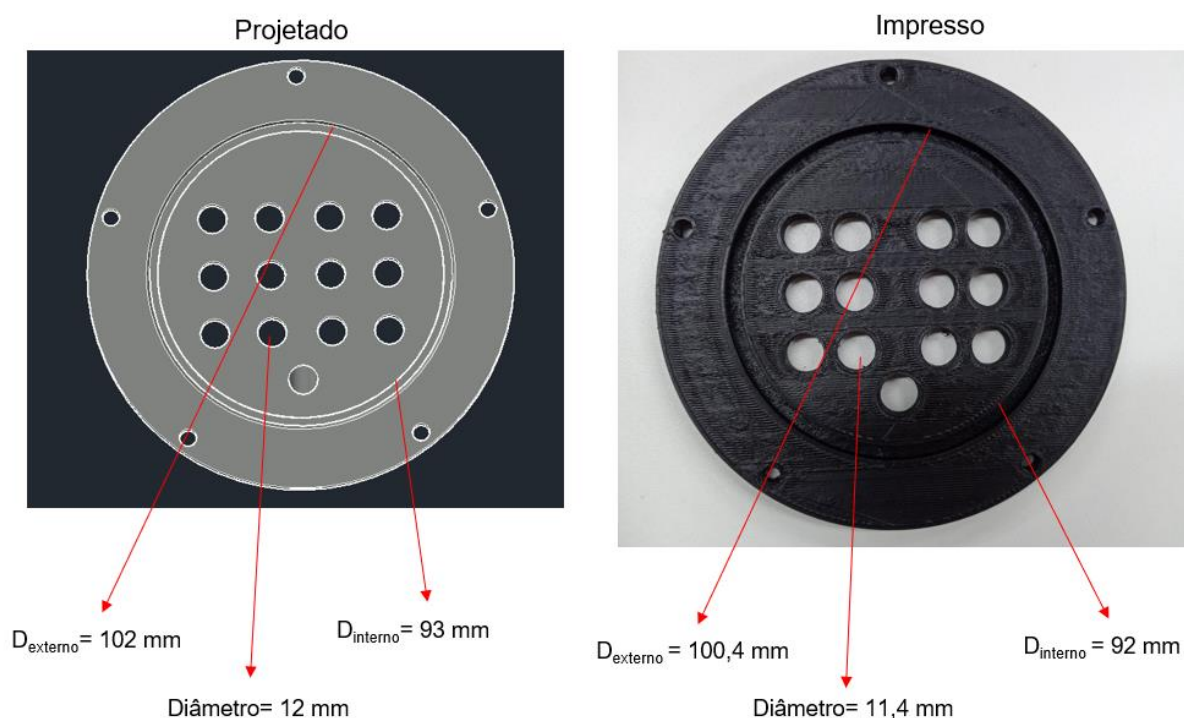
Os desvios dimensionais na impressão 3D podem ter sido causados pela contração térmica do material, erros na movimentação da impressora e limitações do software de configuração. No caso da contração térmica, ela pode ocorrer durante o resfriamento do material, e por outro lado erros mecânicos e vibrações podem causar imprecisões na impressora. A configuração inadequada do software também pode ter contribuído para desvios.

Para resolver essas questões, pode-se utilizar uma impressora de maior qualidade, fazer a calibração corretamente, escolher materiais com tolerâncias conhecidas e estáveis, ajustar adequadamente as configurações do software de

impressão, realizar ajustes manuais quando necessário e controlar as condições ambientais, como temperatura e umidade. Além disso, pode-se também realizar testes e ajustes interativos para garantir a precisão desejada nas medidas finais do objeto impresso.

Diante da identificação do problema, foi necessário realizar modificações no desenho original do projeto. Mesmo após a revisão e a impressão de uma nova versão, Figura 15, ainda foram observados desvios durante o processo de impressão. No entanto, nessa situação, os desvios não afetaram diretamente o encaixe dos tubos.

Figura 15 – Modificação no projeto e nova impressão da flange.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Nesse caso observa-se que o diâmetro externo ficou 1,4 mm menor do que o desenho inicial e o diâmetro interno, diferentemente da primeira versão em que havia sido maior, foi 1 mm menor do que o desenho inicial. Além disso, as aberturas para encaixe dos tubos de alumínio também sofreram variações, resultando em um diâmetro 0,6 mm menor do que havia sido projetado. No entanto, apesar dessas variações, nesse caso houve o encaixe correto do tubo de acrílico.

Outra observação relevante foi a presença de falhas na impressão, resultando em espaçamentos indesejados entre as camadas das peças. Essas falhas

ocasionaram vazamentos de fluido através das lacunas, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Vazamentos através de falhas na impressão da flange.



Fonte: A autora, 2023.

Esse problema pode ser atribuído à limitação de resolução da impressora utilizada. A resolução da impressora determina a precisão com que cada camada é depositada, e espaçamentos muito pequenos podem não ser adequadamente preenchidos durante o processo de impressão. Para evitar esse problema em futuras impressões, é recomendado utilizar uma impressora com maior resolução ou ajustar as configurações de impressão para obter um melhor preenchimento das camadas e minimizar a ocorrência de espaçamentos indesejados.

Apesar de terem sido encontradas falhas nas impressões, foi possível confeccionar as peças necessárias para a montagem do protótipo, sendo que foram confeccionadas flanges diferentes para cada lado dos tubos do trocador. Em uma delas foi adicionado um encaixe para as mangueiras de entrada e saída do fluido, enquanto que a outra flange era apenas uma superfície plana, isso por causa do passe duplo nos tubos. A diferença das flanges pode ser vista na Figura 17 (a) e Figura 17 (b), sendo que na Figura 17 (a) é demonstrada a flange composta pelas entradas e saídas de água dos tubos, e na Figura 17 (b) tem-se a flange fechada.

Figura 17 – Flanges confeccionadas na impressora 3D.

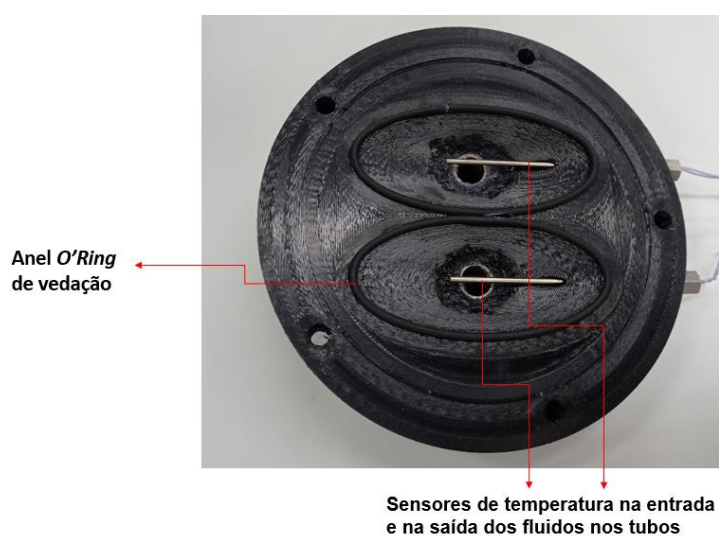


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

5.1.3 Vedação do trocador de calor

Com o intuito de obter uma vedação mais eficiente, foram incorporadas ranhuras nas flanges para a inserção de anéis *O-ring*, conforme Figura 18. Esses anéis têm a finalidade de garantir uma vedação hermética quando as flanges são unidas, devido à sua forma circular em seção transversal. Ao serem comprimidos durante o aperto das flanges, proporcionam uma vedação eficaz, prevenindo vazamentos.

Figura 18 – Flange com *O-ring* e sensores de temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Além disso, a fim de reduzir ainda mais possíveis vazamentos ou qualquer contato indesejado entre os fluidos devido a eventuais vazamentos internos, cola de silicone (Tekbond Saint-Gobain) foi aplicada nas uniões entre os tubos e as flanges, conforme ilustrado na Figura 19. Essa medida tem o propósito de reforçar a vedação e estabelecer uma barreira adicional de proteção, assegurando a integridade do sistema.

A aplicação da cola foi posterior encaixe dos tubos nas flanges e com isso houve dificuldades em espalhar a cola entre os tubos. Foi necessário aguardar um período de 24 h para que ocorresse a secagem adequada, conforme instruções do fabricante.

Figura 19 – Vedação com cola de silicone.



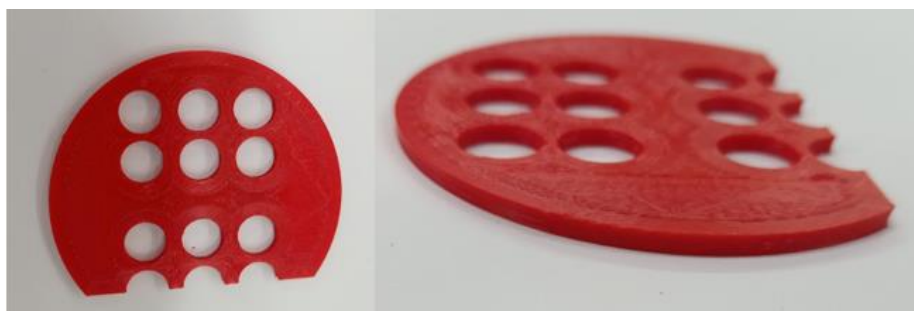
Fonte: A autora, 2023.

Durante a realização dos experimentos, foram observados pontos de vazamento, o que indica que a cola utilizada não foi eficaz para as condições nas quais foi aplicada. Esses vazamentos comprometem a eficiência do sistema e podem levar a resultados imprecisos. Portanto, para futuras modificações ou projetos semelhantes, é recomendado considerar a utilização de um tipo diferente de material de vedação ou adesivo, que seja mais adequado às exigências e às condições específicas do trocador de calor. Isso pode ajudar a garantir uma vedação mais eficaz e minimizar a ocorrência de vazamentos indesejados.

5.1.4 Chicanas

Para aprimorar o desempenho do sistema, foi feita a adição de cinco chicanas ao protótipo, fabricadas por meio de impressão 3D. Essas chicanas foram projetadas para criar turbulência no fluxo do fluido, visando aumentar a eficiência da transferência de calor. Estrategicamente posicionadas ao longo dos tubos, elas promovem uma melhor mistura dos fluidos e distribuição do calor, maximizando a troca térmica entre os fluidos (CAO, 2010). Essa otimização contribui para um processo de transferência de calor mais eficiente, resultando em um melhor desempenho geral do sistema. O modelo utilizado pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Chicanas.



Fonte: A autora, 2023.

A ideia inicial era fazer uma avaliação da diferença de comportamento do sistema operando com e sem as chicanas, porém em decorrência da complexidade da montagem das outras partes do trocador acabou ficando inviável fazer a remoção delas. Uma futura proposta seria investigar a possibilidade de projetar chicanas que possam ser facilmente removidas e recolocadas no sistema de trocador de calor, possibilitando uma avaliação comparativa mais precisa do desempenho com e sem as chicanas.

5.1.5 Protótipo finalizado

A escolha do tubo de acrílico foi devido a facilidade em observar o funcionamento do trocador de calor. Enquanto que a escolha dos tubos de alumínio foi devido ao alumínio apresentar uma boa condutividade térmica e não apresentar um custo tão elevado. Em relação a distribuição dos fluidos, o fluido quente passou no interior dos tubos de alumínio e o fluido frio passou pelo tubo de acrílico, isso pois

o tubo de acrílico não suporta temperaturas muito elevadas além de reduzir uma possível perda de calor do fluido quente para o ambiente.

O protótipo final do trocador de calor desenvolvido é um trocador de calor casco tubos com dois passes pelos tubos, apresentado na Figura 21. Ele foi construído com materiais selecionados para atender aos requisitos de transferência de calor. O trocador de calor possui um casco externo que envolve os tubos internos, permitindo que um fluido passe pelo casco e outro fluido passe pelos tubos, facilitando a transferência de calor entre eles.

Figura 21 – Protótipo do trocador de calor casco tubos com duas passagens nos tubos.



Fonte: A autora, 2023.

Como é possível visualizar na Figura 21, o protótipo do trocador de calor foi construído de acordo com os desenhos iniciais do projeto. É demonstrado a junção das flanges com os tubos, tanto o de acrílico como os de alumínio, sendo que a construção conforme as projeções iniciais é um marco importante no desenvolvimento do trocador de calor. Isso demonstra a aplicação prática das ideias e conceitos teóricos do projeto, fornecendo uma base sólida para a avaliação e aprimoramento do sistema.

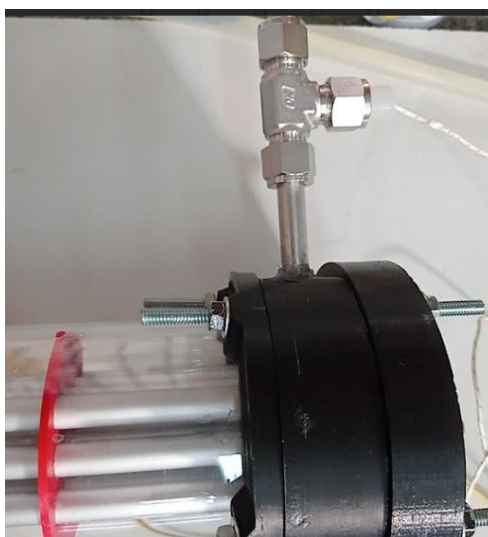
Com o protótipo construído, foi possível avançar para a próxima etapa do projeto, que envolveu a montagem do sistema para avaliação do desempenho e eficiência do trocador de calor em condições operacionais específicas.

5.2 MONTAGEM DO SISTEMA

A montagem do sistema envolveu a conexão das mangueiras de entrada e saída juntamente com a instalação dos sensores de temperatura e também a conexão das mangueiras aos rotâmetros para medição das vazões dos fluidos.

Na parte externa do sistema, foi necessário adicionar conexões em formato 'T' nas flanges para realizar o encaixe das mangueiras e dos sensores. Essas conexões permitiram a interligação das mangueiras de entrada e saída, além de fornecer pontos de conexão para os sensores de temperatura, conforme Figura 22.

Figura 22 – Adição de conexões em formato 'T' nas flanges.



Fonte: A autora, 2023.

Por se tratarem de material metálico, foi adicionado um protetor térmico, do tipo manta aluminizada, nas conexões para evitar perdas de calor ao ambiente, podendo ser visualizado na Figura 23. Além disso, para a vedação dos sensores, os mesmos foram acoplados à conexão juntamente com rolhas de silicone.

Figura 23 – Protótipo com as mangueiras e sensores conectados.

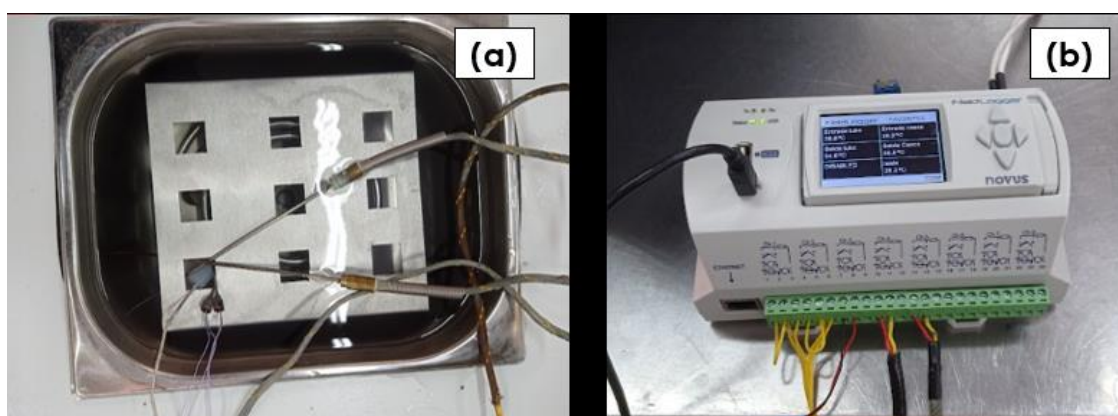


Fonte: A autora, 2023.

Para a parte dos tubos internos, a própria flange já possuía aberturas para conectar os sensores nas respectivas entradas e saídas do fluido, conforme pode ser visto na Figura 18 anteriormente.

Para garantir a precisão e confiabilidade das medições realizadas, optou-se por fazer a calibração dos sensores de temperatura utilizados no sistema. Uma técnica comumente utilizada nesses tipos de sensores é utilizar banhos de temperatura controlada, em que o sensor é exposto a diferentes temperaturas conhecidas e suas leituras são comparadas a um termômetro de referência, conforme Figura 24. Para isso optou-se por fazer a calibração em uma faixa de 20 a 60 °C, que seria a faixa de temperatura operacional do trocador de calor.

Figura 24 – Calibração de sensores: (a) banho ultratermostático com os sensores; (b) registrador de dados FieldLogger.



Fonte: A autora, 2023.

O banho possuía um termômetro de referência no qual era possível visualizar quando o mesmo alcançava determinada temperatura e com isso foi possível registrar os valores fornecidos pelos sensores, conforme Tabela 1. Posteriormente foi possível realizar uma curva de calibração para correção dos valores fornecidos, sendo que a curva de calibração foi registrada diretamente no registrador de dados e controlador programável, no qual foi possível corrigir diretamente os desvios que os sensores apresentaram.

Tabela 1 – Desvios obtidos dos sensores de temperatura.

Termômetro de referência, °C	Sensor - Entrada nos tubos, °C	Sensor - Saída dos tubos, °C	Sensor - Entrada no casco, °C	Sensor - Saída do casco, °C	Média, °C	Erro, %
20,0	21,9	21,7	19,6	20,2	20,9	4,25
30,0	32,1	32,0	30,1	30,7	31,2	4,08
40,0	42,2	41,9	39,9	40,5	41,1	2,81
50,0	52,9	53,0	50,7	51,3	52,0	3,95
60,0	63,5	63,7	61,1	61,7	62,5	4,17

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

5.3 AVALIAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Após a construção do protótipo do trocador de calor, foram realizados testes em diferentes condições operacionais para avaliar o desempenho do sistema. Esses testes visavam analisar a influência de variáveis como vazão dos fluidos e temperaturas de entrada e saída. Os dados experimentais obtidos durante os testes foram registrados e analisados. Foram calculadas as taxas de transferência de calor em diferentes cenários operacionais, a fim de identificar tendências, padrões e eficiência do trocador de calor sob diferentes condições.

A Tabela 2 apresenta as faixas de variação das temperaturas de entrada do fluido quente e do fluido frio durante os experimentos realizados, não sendo possível manter as temperaturas constantes como inicialmente esperado. Apesar das variações, os resultados foram comparados de forma consistente para análise e interpretação dos dados obtidos. Mais informações sobre as temperaturas obtidas durante os três experimentos podem ser encontradas no Apêndice A.

Tabela 2 – Faixa de variação das temperaturas de entrada dos fluidos.

Experimento	Faixa de temperatura do fluido quente, °C	Faixa de temperatura do fluido frio, °C
1	48,7 a 49,5	20,6 a 21,1
2	50,7 a 50,4	21,3 a 21,7
3	48,6 a 48,9	20,8 a 21,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

As variações de temperatura na entrada do fluido quente foram causadas pela limitação do aquecedor utilizado, que não era capaz de manter uma temperatura constante. Quanto ao fluido frio, houve um aumento gradual em sua temperatura

durante o experimento, devido às condições climáticas do dia em que o experimento foi conduzido, uma vez que foi utilizado água na temperatura ambiente.

5.3.1 Avaliação do efeito da vazão do fluido frio

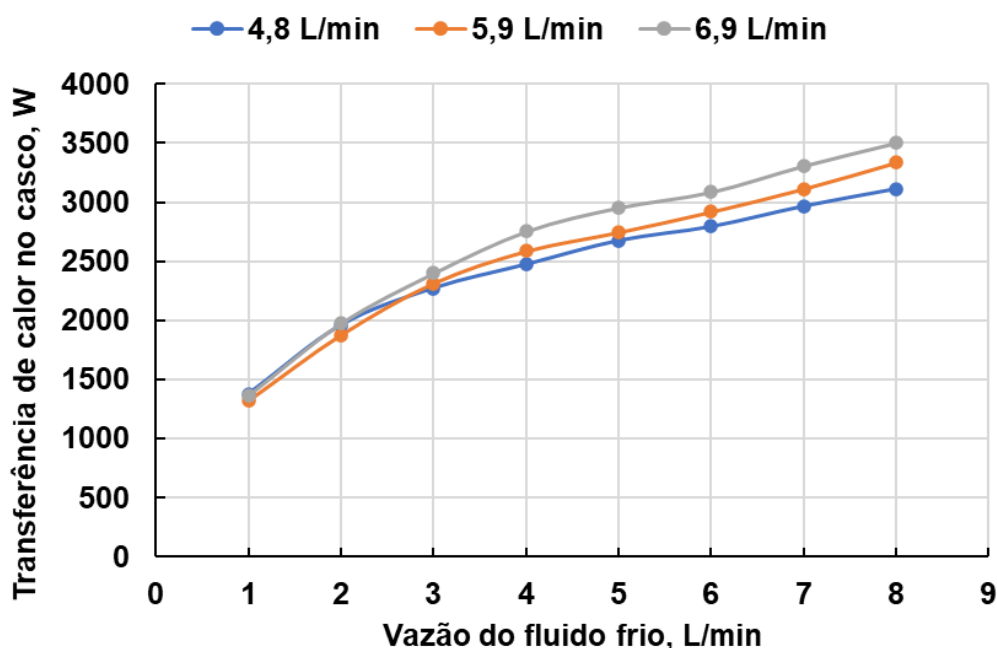
Nesse experimento, foi aplicada uma variação na vazão do fluido frio de 1 a 8 L/min, enquanto que a vazão do fluido quente foi mantida constante em 4,8 L/min. Posteriormente repetiu-se a variação nas mesmas vazões do fluido frio, mas com a vazão do fluido quente mantida constante em 5,9 e 6,9 L/min. Com isso, foi possível observar o comportamento da taxa de transferência de calor do fluido frio que passou pelo casco.

Pelos dados obtidos é possível verificar que, conforme era aumentada a vazão do fluido frio, havia um aumento proporcional na taxa de transferência de calor no casco, conforme Figura 25. Isso por que a taxa de transferência de calor leva em consideração a vazão mássica do fluido, a capacidade calorífica e a diferença de temperatura. Logo, quanto maior a vazão, maior a taxa de transferência de calor. O Apêndice B ainda fornece a Tabela 6, na qual é possível visualizar os dados obtidos em cada ponto do gráfico da Figura 25.

Quando a vazão do fluido frio aumenta no trocador de calor, resulta em uma renovação mais rápida do fluido frio dentro do trocador. Conseqüentemente, à medida que o fluido frio passa pelo trocador, ele é aquecido mais rapidamente e sai do trocador mais rápido. Esse aumento na taxa de escoamento do fluido frio resulta em uma maior taxa de transferência de calor, pois há uma maior diferença de temperatura entre o fluido quente e o fluido frio durante o processo de transferência de calor.

Além disso, velocidade maior do fluido frio no casco aumenta a turbulência e a agitação térmica, facilitando a transferência de calor do fluido quente para o fluido frio. O aumento da vazão do fluido frio pode ajudar a melhorar a distribuição do fluido ao redor dos tubos, garantindo uma transferência de calor mais eficiente (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2011).

Figura 25 – Transferência de calor no casco versus vazão do fluido frio.



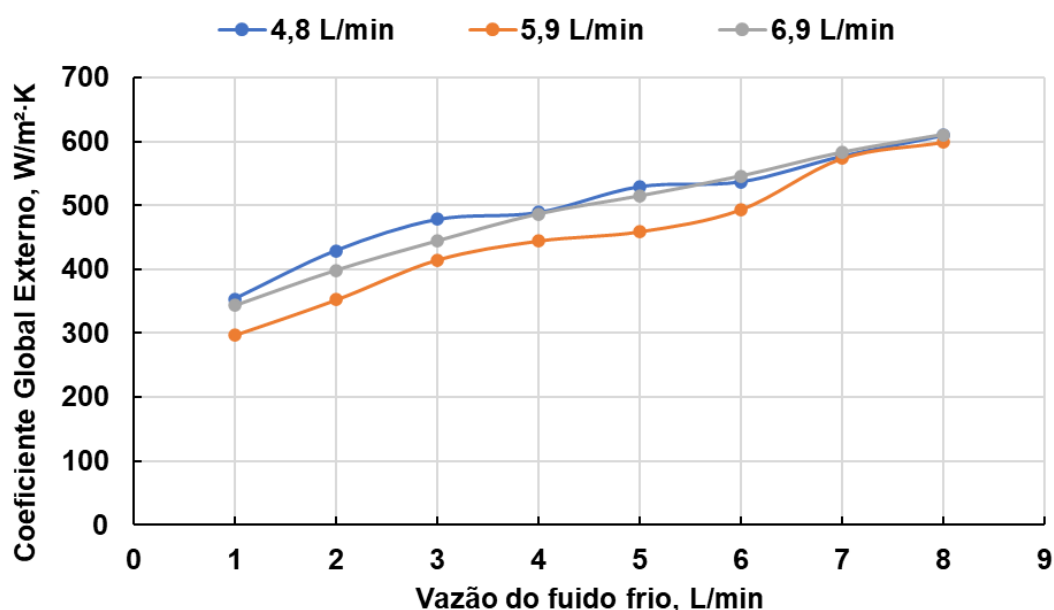
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Isso ainda pode ser observado pelo comportamento do coeficiente global externo (casco), dados contidos na Figura 26, em que também se observou um aumento conforme o aumento na vazão do fluido frio. Isto é, a medida em que a vazão do fluido frio aumenta, mais fluido frio está em contato com a superfície quente, resultando em uma maior taxa de transferência de calor do fluido quente para o fluido frio. Isso, por sua vez, leva a um aumento na transferência de calor total e, conseqüentemente, ao aumento do coeficiente global de transferência de calor.

Além disso, o coeficiente global de transferência de calor leva em consideração o coeficiente de transferência de calor por convecção, que é influenciado por diversos parâmetros, incluindo a velocidade do fluido. Quando a velocidade do fluido aumenta, o coeficiente convectivo também tende a aumentar, o que resulta em uma maior taxa de transferência de calor. Conseqüentemente, o coeficiente global de transferência de calor também aumenta. (INCROPERA; DEWITT, 2013).

Levando isso em consideração, observa-se que de fato o maior coeficiente global no casco foi obtido quando a vazão do fluido frio foi de 8 L/min e a vazão do fluido quente foi mantida constante em 6,9 L/min. Na Tabela 8, Apêndice C, ainda é possível visualizar os dados utilizados para plotar o gráfico da Figura 26.

Figura 26 – Coeficiente global externo em função da vazão do fluido frio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

5.3.2 Avaliação do efeito da vazão do fluido quente

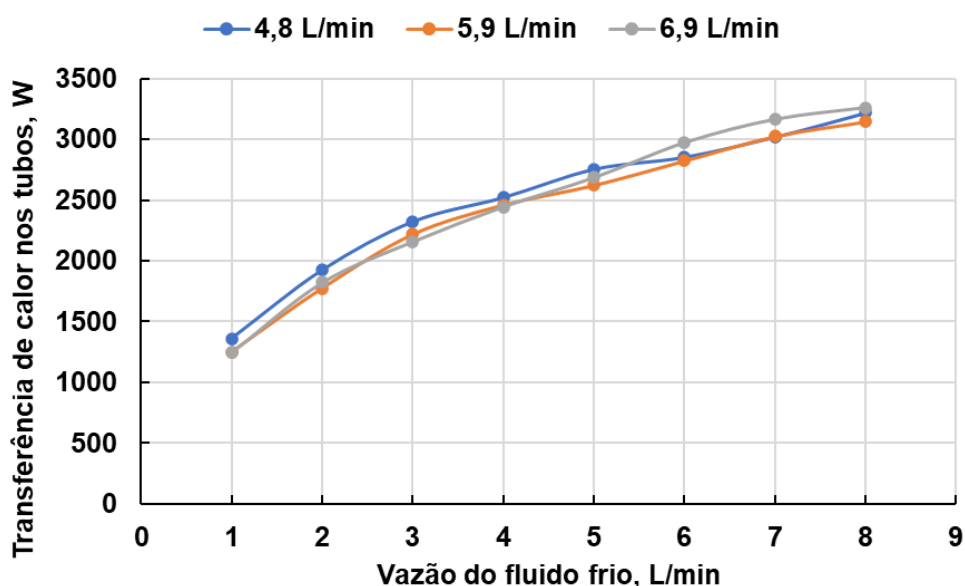
Nesse experimento foi aplicado uma variação na vazão do fluido quente em 4,8; 5,9 e 6,9 L/min. A vazão do fluido frio foi mantida constante em diferentes pontos de operação (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 L/min). A partir dos dados obtidos observou-se que a taxa de transferência de calor não seguiu um padrão. Isto é, esperava-se que com o aumento da vazão do fluido quente ela aumentasse linearmente, o que de fato não ocorreu.

Mantendo a vazão do fluido frio constante em 1 L/min, observou-se que a taxa de transferência de calor diminuiu conforme se teve um aumento na vazão do fluido quente. Um dos fatores que influencia isso é a DTML, porque ao aumentar a vazão do fluido quente pode ocorrer uma diminuição na diferença de temperatura média logarítmica entre os fluidos, o que também afeta a taxa de transferência de calor. Porém, nesse caso não foi possível fazer uma comparação muito linear devido às diferenças nas temperaturas de entrada no trocador de calor, sendo que essas diferenças influenciaram também na densidade do fluido e por consequência na vazão mássica. Essas variações nas propriedades dos fluidos podem ter contribuído para

uma relação não linear entre a vazão do fluido quente e a taxa de transferência de calor.

Na Figura 27, observa-se ainda que quando a vazão do fluido frio é constante a 6 L/min, obtém-se uma maior taxa de transferência de calor para a vazão de fluido quente a 6,9 L/min. Neste caso, o comportamento observado está em conformidade com as expectativas, uma vez que existe uma relação direta entre a vazão e a taxa de transferência de calor: quanto maior a vazão, maior será a taxa de transferência de calor. O Apêndice B ainda fornece a Tabela 7, na qual é possível visualizar os dados obtidos em cada ponto do gráfico da Figura 27.

Figura 27 – Transferência de calor em relação a vazão do fluido quente.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Porém, ao comparar os experimentos em que se variou a vazão do fluido quente em 4,8 e 5,9 L/min, mantendo a do fluido frio constante em 6 L/min, o comportamento é diferente novamente, uma vez que na menor vazão a taxa de transferência de calor foi maior. Uma possível explicação para isso seria a presença de bolhas de ar que foram observadas durante a realização do experimento, conforme Figura 28.

Figura 28 – Bolhas de ar durante experimento.



Fonte: A autora, 2023.

Essas bolhas de ar acabam funcionando como um isolante térmico, pois o ar estagnado é um baixo condutor de energia térmica. Como resultado, a presença de bolhas de ar reduz a área efetiva de transferência de calor entre o fluido quente e o fluido frio, diminuindo a taxa de transferência de calor do fluido quente. Isso pode explicar por que a taxa de transferência de calor foi menor na vazão mais alta do fluido quente, mesmo mantendo a vazão do fluido frio constante.

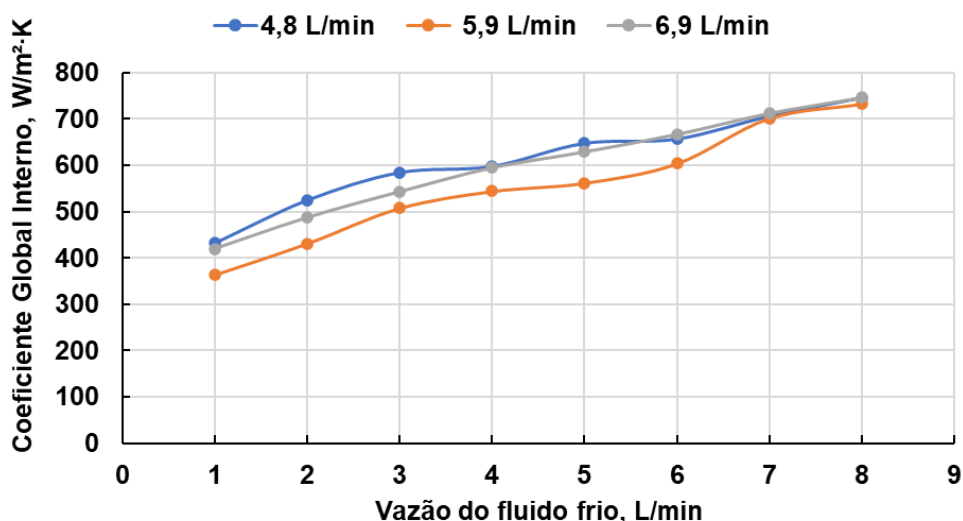
A partir dos dados da taxa de transferência de calor, foi possível também obter o coeficiente global interno (tubos), apresentado na Figura 29. Observa-se que também houve uma discrepância comparando a variação do fluido quente na vazão de 5,9 L/min. E foi justamente nessa vazão que se observou um aumento maior na formação das bolhas de ar.

As bolhas de ar podem ter afetado a turbulência do fluxo e a distribuição de temperatura no sistema, o que também pode ter impactado no coeficiente global de transferência de calor. Essas variações na distribuição de temperatura e no fluxo podem influenciar a eficiência da transferência de calor e levar a diferenças nos resultados obtidos.

Uma solução para eliminar ou reduzir a formação de bolhas de ar seria realizar uma melhoria no sistema de conexões utilizados. Isto é, inspecionar as conexões, válvulas e tubulações do sistema a fim de identificar vazamentos que estejam

permitindo a entrada de ar indesejado, manter o controle da temperatura do fluido, evitando superaquecimento excessivo, uma vez que a solubilidade de gases diminui à medida que a temperatura aumenta (SILVA; *et al.*, 2017), controlar a temperatura dentro de limites adequados pode ajudar a reduzir a dessolubilização do oxigênio.

Figura 29 – Coeficiente global interno em relação a vazão do fluido quente.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na Tabela 9, Apêndice C, é possível visualizar os dados utilizados para plotar o gráfico da Figura 29.

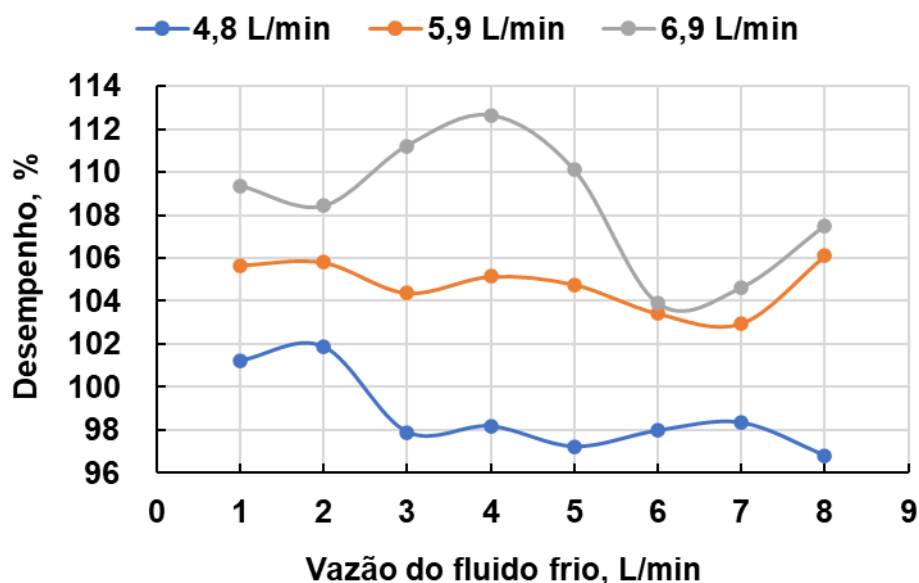
5.3.3 Desempenho do trocador de calor

Levando em consideração que não se tinha todas informações disponíveis para calcular a quantidade máxima de calor que poderia ser transferida do protótipo, optou-se por calcular a eficiência considerando as taxas de transferência de calor dos fluidos quente e frio obtidos através dos dados experimentais.

A partir da Figura 30 pode se visualizar que desempenho do protótipo teve significativos desvios do que se esperava, sendo que o desempenho obtido foi maior do que 100%, o que implicaria em uma transferência de calor do fluido quente maior do que a quantidade máxima disponível de calor, sendo impossível e inconsistente com os princípios da termodinâmica. Observa-se que quanto maior a vazão do fluido quente, maior a oscilação em relação a eficiência.

A oscilação no desempenho em relação à vazão do fluido quente sugere que o protótipo é afetado pela taxa de transferência de calor desse fluido. Essas oscilações podem ocorrer devido a fatores como a turbulência do fluxo, distribuição não uniforme do fluido ao redor dos tubos ou perdas de calor indesejadas.

Figura 30 – Desempenho do protótipo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Para solucionar esses problemas e melhorar o desempenho do protótipo, algumas abordagens podem ser consideradas. Entre elas, pode ser incluída a verificação da geometria e dos parâmetros do projeto, se os mesmos são adequados para as condições operacionais utilizadas. Considerar a otimização do design para melhorar a distribuição do fluido e minimizar as perdas de calor.

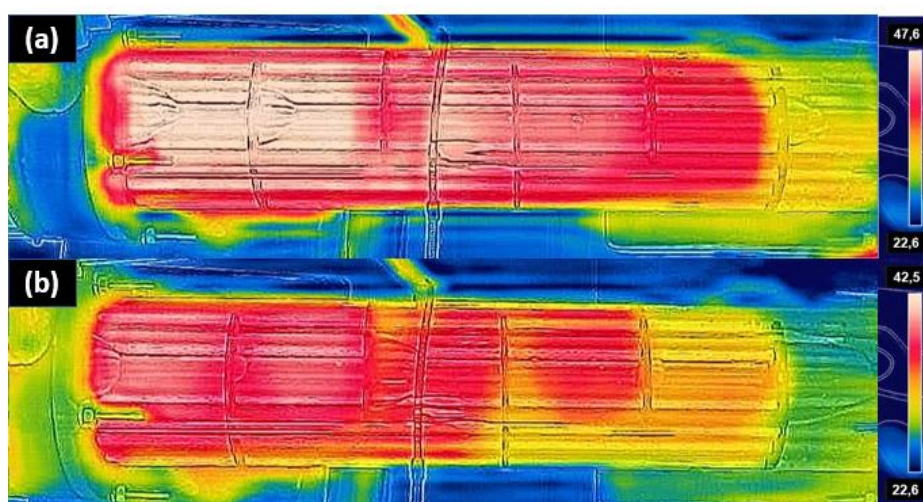
Verificar se o fluido quente está sendo distribuído uniformemente ao redor dos tubos. Se necessário, podem ser implementadas melhorias, como redistribuição do fluxo ou modificação dos espaçadores internos para promover uma distribuição mais uniforme. Identificar possíveis fontes de perdas de calor adicionais, como vazamentos, isolamento inadequado ou dissipação de calor para o ambiente. Tomar medidas corretivas para minimizar essas perdas e melhorar a eficiência do sistema.

5.3.4 Análise da temperatura superficial do trocador de calor

Para verificar e identificar as temperaturas na superfície do trocador de calor utilizou-se a câmera infravermelha, visto que não foi adicionado isolante térmico no casco. Observou-se o perfil de temperatura ao longo do trocador de calor, eventuais vazamentos e quais eram as regiões mais quentes.

Através da análise das imagens térmicas capturadas pela câmera infravermelho, foi constatado que, na vazão do fluido frio de 1 L/min, o fluido apresentava temperatura mais elevada (47,6 °C) em comparação à vazão do fluido frio de 2 L/min (42,5 °C). Uma das explicações para a diferença de temperatura observada entre as vazões do fluido frio pode ser o aumento da perda de calor para o ambiente devido à vazão mais alta. Com uma vazão maior, há uma maior exposição da superfície do trocador de calor ao ambiente, o que pode resultar em uma maior dissipação de calor para o ambiente. Isso pode contribuir para uma temperatura mais baixa do fluido frio, conforme observado nas imagens térmicas na Figura 31. Portanto, o aumento da perda de calor para o ambiente é um fator relevante que influencia na diferença de temperatura entre as vazões do fluido frio.

Figura 31 – Imagens térmicas capturadas pela câmera infravermelho: (a) vazão a 1 L/min; (b) vazão a 2 L/min.



Fonte: A autora, 2023.

Na vazão de 1 L/min, o fluido flui mais lentamente pelo casco, permanecendo por um tempo mais prolongado. Isso permite uma maior troca de calor com o fluido quente, o que leva a um aumento da temperatura do fluido no casco, como evidenciado pelas imagens térmicas apresentadas na Figura 31. Por outro lado, na

vazão de 2 L/min, o fluido passa pelo casco mais rapidamente. Nesse caso, em um minuto, uma maior quantidade de fluido flui pelo sistema, resultando em um tempo de contato mais curto com o fluido quente. Essa redução no tempo de contato limita a transferência de calor entre os fluidos, o que conseqüentemente resulta em uma diminuição da temperatura do fluido no casco.

Essas observações destacam a importância da vazão do fluido frio na eficiência do trocador de calor. Um tempo de residência adequado no casco é fundamental para promover uma troca de calor eficaz entre os fluidos. A vazão ideal deve ser determinada levando em consideração as características do sistema, o objetivo da transferência de calor e as restrições operacionais.

6 CONCLUSÕES

Na conclusão desse estudo destaca-se a importância da utilização da impressora 3D na confecção das peças para a montagem do protótipo. Embora a impressão tenha proporcionado certa flexibilidade e tenha permitido a customização das peças de acordo com as necessidades do projeto, foi observado que a qualidade e precisão das peças impressas não atingiram os níveis desejados. Houveram variações dimensionais e imperfeições nas superfícies das peças, o que pode ter influenciado no desempenho do trocador de calor.

No entanto, apesar dos desafios encontrados, a utilização da impressora 3D ainda se mostrou valiosa no processo de fabricação das peças do trocador de calor, permitindo a montagem do sistema e a realização dos testes necessários para a análise do desempenho. Essa abordagem forneceu dados importantes para o desenvolvimento do trocador de calor, destacando áreas de melhoria e possíveis ajustes no projeto.

Além disso, pode se concluir que o desempenho dos trocadores de calor é influenciado por muitos fatores, como a vazão dos fluidos, a propriedade dos fluidos, a presença de bolhas de ar e possíveis vazamentos.

A análise das imagens térmicas obtidas pela câmera infravermelho também forneceu uma valiosa visualização das variações de temperatura ao longo do processo de troca de calor, auxiliando no entendimento dos mecanismos de transferência de calor.

Destaca-se que o protótipo desenvolvido possui potencial para ser utilizado como ferramenta educacional nas aulas ministradas no curso de Engenharia Química no Campus Feliz. Sua construção e montagem, juntamente com a possibilidade de realizar testes em diferentes condições, permite que os alunos compreendam de forma prática e visual os conceitos teóricos relacionados a transferência de calor.

7 SUGESTÕES E MELHORIAS

- Fazer novamente a impressão das flanges, reduzindo o espaçamento entre as camadas, a fim de verificar a possibilidade de reduzir ou eliminar lacunas abertas e, conseqüentemente, eliminar vazamentos;
- Elaborar flanges que permitam a execução do trocador de calor com passe simples, para posterior comparação de desempenho com o passe duplo;
- Realizar testes no trocador de calor utilizando diferentes quantidades de chicanas, a fim de observar o comportamento dos fluidos;
- Avaliar a perda de carga do protótipo do trocador de calor;
- Calcular os coeficientes globais internos e externos teóricos, bem como os coeficientes de convecção e condução;
- Testar outro tipo de cola para a vedação do trocador de calor;
- Desenvolver um método para a reutilização da água utilizada nos experimentos.

REFERÊNCIAS

- BICHKAR, P.; *et al.* **Study of Shell and Tube Heat Exchanger with the Effect of Types of Baffles**. 2ª ed. International Conference on Materials. Manufacturing and Design Engineering. Procedia Manufacturing, v. 20, p. 195–200, 2018.
- CAO, Eduardo. **HEAT TRANSFER IN PROCESS ENGINEERING**. McGraw-Hill Companies, Inc. 1ª ed. Nova York: 2010.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4ª ed. São Paulo: McGraw Hill, 2012.
- GAO, W. *et al.* **The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering**. Computer-Aided Design. v. 69, p. 65-89, 2015.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles: (includes unit operations)**. 4ª ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.
- GEBHARDT, A., HÖTTER, J. S. **Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing**. 11ª ed. Hanser, Munich: 2016.
- GELHAUSEN, M. G. *et al.* **3D printing for chemical process laboratories I: Materials and connection principles**. Chemical Engineering & Technology. v. 41, p. 618-627, 2018.
- GIBSON, I. *et al.* **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2ª ed. Nova York: 2014.
- GOLDBERG, David M. *et al.* **3D Printing Technology and the Market Value of the Firm**. Information Systems Frontiers. v. 24, p.1379-1392, 2022.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2013.
- KAKAÇ, Sadik. LIU, Hongtan. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 2ª ed. Flórida: CRC Press LLC. 2002.
- KERN, Donald Q. **Process Heat Transfer**. McGraw-Hill International Editions. Chemical Engineering Series. p. 828. Nova York: 1987.
- KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER**. Cengage Learning, 7ª ed., 2011.

KUPPAN, T. **HEAT EXCHANGER DESIGN HANDBOOK**. Marcel Dekker Inc. Nova York: 2000.

MARTINELLI, Laira. et al. **Projeto de Trocador de Calor**. Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação (RBCTI), v.2, n.2, p. 109-124, jul./dez. 2017.

MCCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7ª ed. Nova York: McGraw Hill Chemical Engineering Series. 2004.

MOHANTY, Dillip Kumar. **Application of firefly algorithm for design optimization of a shell and tube heat exchanger from economic point of view**. International Journal of Thermal Sciences. v.102, p. 228-38, jan. 2016.

NETO, Fernando Maximo da Silva. **Construção e estudo teórico-prático de um trocador de calor de casco e tubo de bancada**. Orientador: M.Sc. Humberto da Silva Santos. 52 f. TCC (Título de Bacharel em Engenharia Mecânica) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, 2019.

NITSCHKE M.; GBADAMOSI R.O. **HEAT EXCHANGER DESIGN GUIDE. A Practical Guide for Planning, Selecting and Designing of Shell and Tube Exchanger**. Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann, 1ª ed., 2015

SALAHUDDIN, U. et al. **A review of the advancements made in helical baffles used in shell and tube heat exchangers**. International Communications in Heat and Mass Transfer. v.67, p. 104–8, out. 2015.

SANTOS, Alexander Saver dos. et al. **Desenvolvimento de um protótipo de trocador de calor casco e tubo para aquecimento de caldo decantado**. Revista Engenharia de Interesse Social, v.6, n.7, p.75-89, jan.-jun., 2021.

SHAHRUBUDIN, N. et al. **An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications**. Procedia Manufacturing. v. 35, p.1286- 1296, 2019.

SILVA, Luciana Almeida. et al. **SOLUBILIDADE E REATIVIDADE DE GASES**. Quim. Nova, v. 40, n. 7, p. 824-832, 2017.

SOUZA, Jeferson Afonso Lopes de. **Transferência de Calor**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

VIJAYAN, Ajith Mohanavilasam. **Different Applications of 3D Printing in The Biological, Chemical, and Pharmaceutical Fields.** International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. v.11, 7^a ed., 2022.

APÊNDICE A – Dados experimentais coletados

Na Tabela 3 são apresentados os dados experimentais obtidos durante o Experimento 1, na qual pode se observar as variações de temperatura citadas na Tabela 2. Nesse caso, foi realizada a variação do fluido frio de 1 a 8 L/min e manteve-se constante a vazão do fluido quente em 4,8 L/min.

Tabela 3 – Dados experimentais coletados no Experimento 1.

Vazão do fluido frio, L/min	TUBOS		CASCO	
	T_Qe, °C	T_Qs, °C	T_Fe, °C	T_Fs, °C
1	49,5	45,4	21,1	40,9
2	49,1	43,3	21,0	35,1
3	49,0	42,0	20,8	31,7
4	49,1	41,5	21,0	29,9
5	49,0	40,7	20,7	28,4
6	48,9	40,3	20,7	27,4
7	48,7	39,6	20,7	26,8
8	49,0	39,3	20,6	26,2

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na Tabela 4 são apresentados os dados experimentais obtidos durante o Experimento 2, na qual pode se observar as variações de temperatura citadas na Tabela 2. Nesse caso, foi realizada a variação do fluido frio de 1 a 8 L/min e manteve-se constante a vazão do fluido quente em 5,9 L/min.

Tabela 4 – Dados experimentais coletados no Experimento 2.

Vazão do fluido frio, L/min	TUBOS		CASCO	
	T_Qe, °C	T_Qs, °C	T_Fe, °C	T_Fs, °C
1	50,7	47,6	21,7	40,7
2	50,6	46,2	21,5	35,0
3	50,6	45,1	21,4	32,5
4	50,6	44,5	21,4	30,7
5	50,6	44,1	21,4	29,3
6	50,4	43,4	21,5	28,5
7	50,4	42,9	21,4	27,8
8	50,5	42,7	21,3	27,3

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na Tabela 5 são apresentados os dados experimentais obtidos durante o Experimento 3, na qual pode se observar as variações de temperatura citadas na

Tabela 2. Nesse caso, foi realizada a variação do fluido frio de 1 a 8 L/min e manteve-se constante a vazão do fluido quente em 6,9 L/min.

Tabela 5 – Dados experimentais coletados no Experimento 3.

Vazão do fluido frio, L/min	TUBOS		CASCO	
	T_Qe, °C	T_Qs, °C	T_Fe, °C	T_Fs, °C
1	48,9	46,3	21,1	40,7
2	48,8	45,0	21,2	35,4
3	48,7	44,2	21,0	32,5
4	48,6	43,5	20,8	30,7
5	48,6	43,0	20,9	29,4
6	48,6	42,4	20,9	28,3
7	48,7	42,1	21,1	27,9
8	48,6	41,8	21,2	27,5

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

APÊNDICE B – Taxas de transferência de calor obtidas

Na Tabela 6 é possível visualizar os dados utilizados para gerar o gráfico presente na Figura 25. É apresentado os dados obtidos para a taxa de transferência de calor no casco, na qual passava o fluido frio.

Tabela 6 – Comportamento da taxa de transferência de calor no casco.

Vazão do fluido frio, L/min	Q_Frio, W	Q_Frio, W	Q_Frio, W
1	1377	1321	1363
2	1961	1877	1974
3	2274	2315	2399
4	2475	2586	2753
5	2677	2746	2955
6	2795	2920	3087
7	2969	3114	3309
8	3115	3337	3504
Vazão do fluido quente, L/min	4,8	5,9	6,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na Tabela 7 é possível visualizar os dados utilizados para gerar o gráfico presente na Figura 27. É apresentado os dados obtidos para a taxa de transferência de calor nos tubos, na qual passava o fluido quente.

Tabela 7 – Comportamento da taxa de transferência de calor nos tubos.

Vazão do fluido frio, L/min	Q_Quente, W	Q_Quente, W	Q_Quente, W
1	1360	1250	1246
2	1924	1774	1821
3	2322	2218	2157
4	2521	2460	2444
5	2753	2621	2684
6	2853	2823	2971
7	3019	3024	3163
8	3218	3145	3259
Vazão do fluido quente, L/min	4,8	5,9	6,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

APÊNDICE C – Coeficientes globais experimentais obtidos

Na Tabela 8 é possível visualizar os dados utilizados para gerar o gráfico presente na Figura 26. É apresentado os dados obtidos para o coeficiente global de transferência de calor externo experimental.

Tabela 8 – Dados obtidos para o coeficiente global externo experimental.

Vazão do fluido frio, L/min	U_externo, W/m ² ·K	U_externo, W/m ² ·K	U_externo, W/m ² ·K
1	354	297	343
2	429	352	398
3	478	415	444
4	489	445	486
5	529	459	515
6	537	493	546
7	577	573	583
8	609	599	610
Vazão do fluido quente, L/min	4,8	5,9	6,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Na Tabela 9 é possível visualizar os dados utilizados para gerar o gráfico presente na Figura 29. É apresentado os dados obtidos para o coeficiente global de transferência de calor interno experimental.

Tabela 9 – Dados obtidos para o coeficiente global interno.

Vazão do fluido frio, L/min	U_interno, W/m ² ·K	U_interno, W/m ² ·K	U_interno, W/m ² ·K
1	432	363	420
2	525	431	487
3	585	507	543
4	598	544	595
5	648	562	630
6	657	604	667
7	706	701	713
8	746	733	747
Vazão do fluido quente, L/min	4,8	5,9	6,9

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

ANEXO A – Diagrama de Kern para correção da DTML

Diagrama 1 – Fator de correção da DTML para um trocador de calor casco tubo com uma passagem no casco e duas nos tubos.

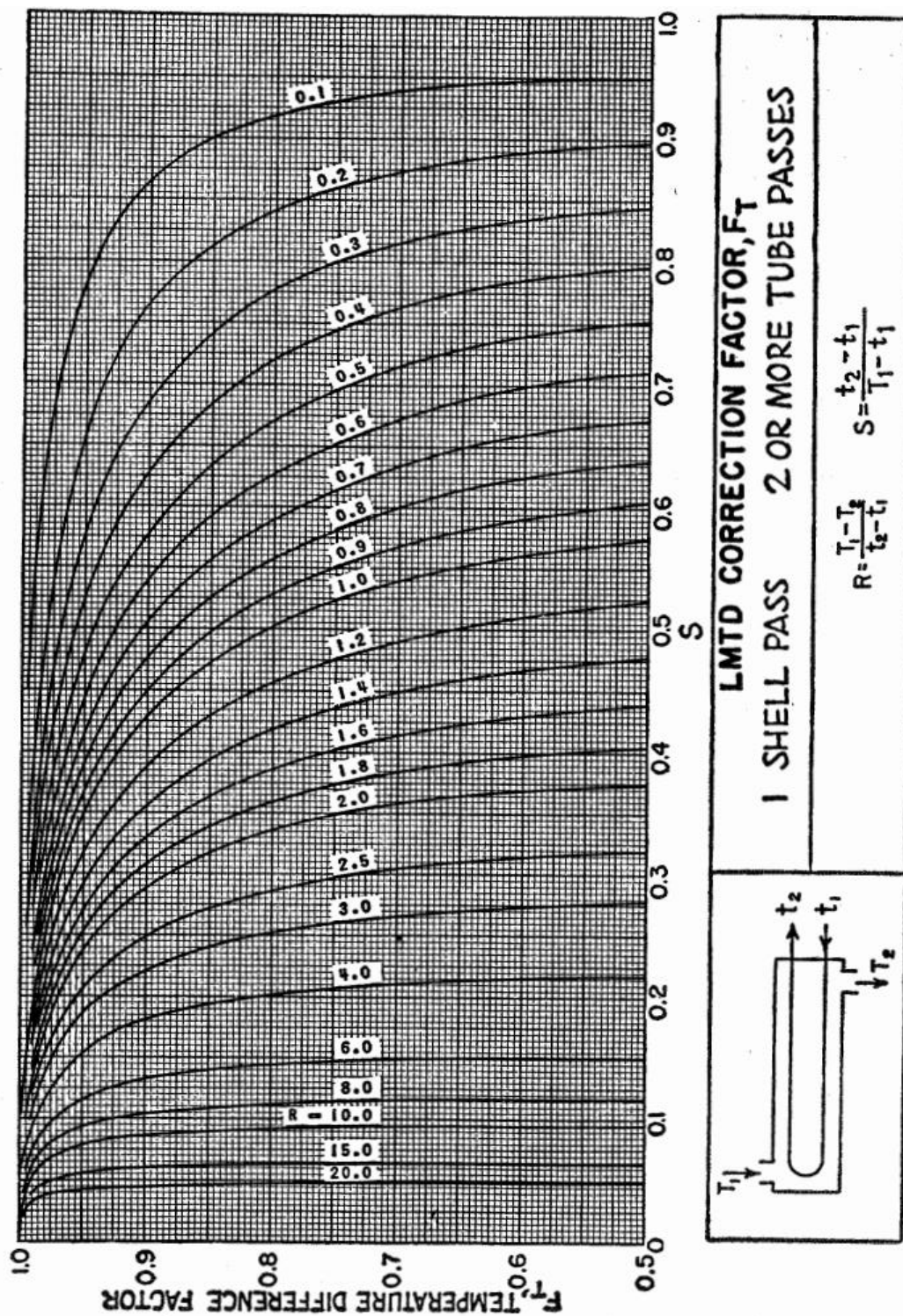


Fig. 18. LMTD correction factors for 1-2 exchangers. (Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2d ed., New York, 1949.)

Fonte: KERN, p.828, 1987.