

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

CARLOS ALBERTO CANASSA JUNIOR

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E
TUBO**

**CASCABEL - PR
2019**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

CARLOS ALBERTO CANASSA JUNIOR

**DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E
TUBO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador: Msc. Eng. Mec. Eliseu Avelino
Zanella Junior**

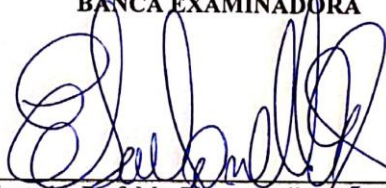
**CASCADEL - PR
2019**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
CARLOS ALBERTO CANASSA JUNIOR

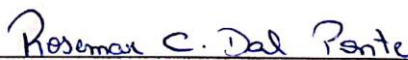
DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Me. Eng. Mecânico Eliseu Avelino Zanella Junior

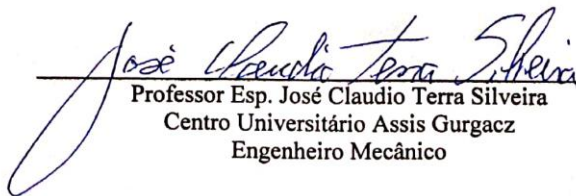
BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenharia Mecânica



Professora Me. Rosemar Cristiane Dal Ponte
Centro Universitário Assis Gurgacz
Bacharel em Informática



Professor Esp. José Claudio Terra Silveira
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 26 de junho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para minha família e amigos,
que de alguma forma contribuíram para a realização desse projeto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida.

À minha família por todo apoio emocional e financeiro no decorrer dessa caminhada.

Ao meu professor e orientador Eliseu Zanella Jr, por toda orientação e ajuda no decorrer desse trabalho e que esteve disponível sempre que precisei.

RESUMO

A transferência de calor é um fenômeno que ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre dois ou mais corpos. O contato entre eles promove a troca de energia térmica do corpo de maior temperatura para o de menor, até que o sistema atinja o equilíbrio. Em nosso cotidiano, podemos averiguar a transferência de calor de diferentes formas, seja ela por condução, por convecção ou ainda, por radiação. Existem dispositivos denominados de Trocadores de Calor, que são projetados e produzidos para facilitar o fenômeno de troca energética entre fluidos de diferentes temperaturas por meio dos princípios da condução e da convecção, onde estes, por sua vez, são encontrados em carros, geladeiras e aquecedores domésticos em forma de radiador, bem como em outros equipamentos industriais, onde comumente podemos encontrar outras configurações de trocadores de calor. Com isso, o estudo e entendimento desses sistemas são de extrema importância para a engenharia, pois são produzidos em uma variedade de tipos e separados de acordo com sua aplicação; o modelo de equipamento mais utilizado em aplicações industriais é o trocador de calor do tipo Casco e Tubo, que é o modelo do nosso objeto de estudo. Este é dotado por vários tubos dentro de outro tubo maior, denominado de casco e pode ser configurado conforme a necessidade, com o fluido quente escoando nos tubos e o frio no casco, ou vice e versa. O procedimento de aferição de temperaturas foi feito com base nos termopares disponíveis no trocador de calor casco e tubo existente no laboratório de Máquinas Térmicas do Centro Universitário Assis Gurgacz e os cálculos realizados foram feitos baseados nos conceitos de dimensionamento, que foram extraídos de diferentes abordagens literárias.

Palavras-chave: Transferência de calor. Resfriamento. Convecção.

ABSTRACT

Heat transfer is a phenomenon that occurs when there is a difference of temperature between two or more bodies. The contact between them promotes the exchange of thermal energy from the body from higher temperature to the lower one until the system reaches equilibrium. Daily, we can ascertain the transfer of heat in different ways, be it by conduction, by convection or by radiation. There are devices called Heat Exchangers, which are designed and produced to facilitate the phenomenon of energy exchange between fluids of different temperatures through the principles of conduction and convection, where these are in turn found in cars, refrigerators and heaters in the form of radiators, as well as in other industrial equipment, where we can commonly find other configurations of heat exchangers. Thus, the study and understanding of these systems are extremely important for engineering, as they are produced in a variety of types and separated according to their use; the most commonly used equipment model in industrial applications is the Shell and Tube type heat exchanger, which is the model of our object of study. This is endowed by several tubes inside another larger tube, called a shell and can be configured as needed, with the hot fluid flowing in the tubes and the cold in the shell, or vice versa. The temperature gauging procedure will be done based on the thermocouples available in the shell and tube heat exchanger in the Thermal Machines Laboratory of Centro Universitário Assis Gurgacz and the calculations were made based on the concepts of design, which were extracted from different literary approaches.

Keywords: Heat transfer. Cooling. Convection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Transferência de Calor por Condução.	16
Figura 2: Configuração de Fluxo de Fluidos.	19
Figura 3: Diferentes Configurações de Escoamento em Trocadores de Calor de Escoamento Cruzado.....	19
Figura 4: Trocador de calor Casco e Tubo.	20
Figura 5: Trocador de Calor de Placas.	21
Figura 6: Propriedades da Água.	23
Figura 7: Posição de Cada Componente do Sistema.	30
Figura 8: Motobomba de Alimentação de Água Quente.	31
Figura 9: Alimentação de Água Fria.	32
Figura 10: Resistência Elétrica.	33
Figura 11: Posição dos Termômetros.	34

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Transferência de calor por convecção.....	17
Equação 2: Temperatura de filme.....	22
Equação 3: Vazão mássica.....	24
Equação 4: Velocidade média.....	24
Equação 5: Balanço energético da água.....	25
Equação 6: Número de Reynolds.....	25
Equação 7: Número de Nusselt.....	26
Equação 8: Número de Nusselt para escoamento interno.....	26
Equação 9: Coeficiente de película.....	27
Equação 10: Variação de temperatura do sistema.....	27
Equação 11: Área superficial.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conjunto do Trocador de Calor.	30
Tabela 2: Propriedades do Casco Tubo.	31
Tabela 3: Posição e Função dos Termômetros.	34
Tabela 4: Temperaturas Coletadas.	36
Tabela 5: Propriedades da Água Obtidas.	37
Tabela 6: Classificação dos Escoamentos.	38

LISTA DE ABREVIATURAS

A_s : Área superficial (m^2);

C_p : Calor específico ($J/(kg.K)$);

D : diâmetro externo (m);

d : diâmetro interno (m);

e : espessura (mm);

h : coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/(m^2.K)$);

K : coeficiente de condutividade ($W/(m.K)$);

L : comprimento (m);

$\dot{m}$: fluxo de massa (kg/s);

Nu : número de Nusselt;

Pr : número de Prandtl;

Q : taxa de transferência de calor (W);

V : velocidade (m/s);

ν : viscosidade cinemática (m^2/s);

π : número PI;

ρ : densidade (kg/m^3).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	13
1.1 ASSUNTO / TEMA	13
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.4 FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES	14
1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
1.5.1 Objetivo Geral	14
1.5.2 Objetivos Específicos	15
CAPÍTULO 2.....	16
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.1 Transferência de Calor	16
2.1.2 Conceitos da Transferência de Calor por Condução	16
2.1.3 Definição da Transferência de Calor por Convecção.....	17
2.1.4 Conceitos de Trocadores de Calor.....	17
2.1.4.1 Tipos de Trocadores de Calor.....	18
2.1.5 Dimensionamento Mecânico para Análise do Trocador de Calor.....	21
2.1.5.1 Temperatura de Filme	22
2.1.5.2 Calor Específico	22
2.1.5.3 Vazão Mássica e Velocidade Média	24
2.1.5.4 Balanço Energético do Escoamento da Água.....	24
2.1.5.5 Número de Reynolds	25
2.1.5.6 Número de Nusselt	26
2.1.5.7 Coeficiente de Película.....	27
2.1.5.8 Variação de Temperatura Logarítmica do Sistema	27
2.1.5.9 Determinação da Área de Transferência de Calor.....	28

CAPÍTULO 3	29
3.1 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO	29
3.1.1 Descrição do Projeto	29
3.1.2 Aferição de Temperatura dos Fluidos e Ensaio.....	35
3.1.3 Teste de Circulação de Água Quente e Fria Simultaneamente	35
CAPÍTULO 4.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 Resultado do Teste	36
4.2 Dimensionamento do Trocador de Calor Casco e Tubo	37
4.3.1 Determinação da Vazão Mássica e Velocidade dos Fluidos	38
4.3.2 Cálculo do Calor Transferido	38
4.3.3 Determinação do Número de Reynolds e do Número de Nusselt	38
4.3.4 Cálculo do Coeficiente de Película.....	39
4.3.5 Variação de Temperatura do Fluido	39
4.3.6 Determinação da Área Superficial de Transferência de Calor	39
4.3.7 Cálculo do Calor Transferido por Convecção Interna.....	40
CAPÍTULO 5.....	41
5.1 CONCLUSÃO.....	41
CAPÍTULO 6.....	42
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS	43

CAPÍTULO 1

1.1 ASSUNTO / TEMA

O assunto do referido trabalho é sobre o estudo de um trocador de calor do tipo casco e tubo.

O tema abordará sobre o teste prático e dimensionamento de um trocador de calor do tipo casco e tubo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A água para processos industriais tem uma ampla aplicação, seja para fazer o resfriamento de produtos, arrefecimento de motores, resfriamento de óleo de máquinas injetoras de polímeros ou até mesmo para controlar a temperatura dos ambientes. Uma vez utilizada nesses processos, esta água terá que perder energia térmica que foi para que o processo se inicie novamente e prossiga de forma constante. Essa perda de calor acontece por meio de dispositivos que são os trocadores de calor.

Os trocadores de calor são dispositivos que facilitam a troca de calor entre dois fluídos que se encontram em diferentes temperaturas, evitando a mistura de um com o outro. Os trocadores de calor são utilizados, na prática, em uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de aquecimento e ar-condicionados domésticos a processos químicos e produção de potência em grandes usinas. Os trocadores de calor diferem de câmaras de mistura, na medida em que não permitem a mistura dos dois fluídos envolvidos (ÇENGEL, 2011).

Ademais, estes dispositivos de troca térmica são projetados e produzidos em uma variedade de tipos e classificados de acordo com sua utilização, sendo que o modelo de equipamento mais utilizado em aplicações industriais é o trocador de calor do tipo casco e tubo.

Este equipamento é frequentemente usado na geração e reaproveitamento de energia, consistindo ainda de um tubo externo ao qual chamamos de “casco” e uma série de tubos

internos ao casco. Por fim, neste modelo, um fluido passa pelos tubos internos enquanto outro passa pelo casco, realizando assim a troca de calor entre eles.

Dessa forma, essa pesquisa tem o intuito de promover a verificação das temperaturas de entrada e de saída das substâncias quente e fria que fluem e também fazer o dimensionamento do trocador de calor estudado a partir das temperaturas reais averiguadas, utilizando como base o referencial teórico abordado.

1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Qual a aplicabilidade dos cálculos teóricos no dimensionamento de um trocador de calor?

1.4 FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES

H_0 – O estudo do dimensionamento do trocador de calor casco e tubo pode melhorar o processo de troca térmica.

H_1 – O modelo a ser apresentado poderá ser usado na prática para simular o comportamento de trocadores de calor.

1.5 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.5.1 Objetivo Geral

Fazer a verificação das temperaturas reais obtidas a partir de termômetros para fazer o dimensionamento de um trocador de calor e identificar se existem erros entre os valores de calor real e teórico.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Conceituar as características e o dimensionamento de trocadores de calor;
- Apresentar as propriedades físicas dos fluídos utilizados no procedimento de transferência de energia térmica;
- Analisar os resultados obtidos a partir de teste prático em laboratório;
- Realizar o dimensionamento do trocador de calor utilizando a abordagem literária.

CAPÍTULO 2

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 Transferência de Calor

Transferência de Calor é o fluxo de energia que acontece devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura haverá essa energia (INCROPERA *et al*, 2008).

2.1.2 Conceitos da Transferência de Calor por Condução

Segundo Incropera *et al* (2008), a transferência de calor por condução ocorre quando a energia térmica é transmitida por um meio estacionário, ou seja, sem movimentação. Esse meio de transmissão acontece quando a energia é transferida de uma região, possuindo uma alta temperatura para uma região com uma temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes com contato direto entre eles. O modelo de transferência de calor feita sem movimentação conforme mostra a Figura 1.

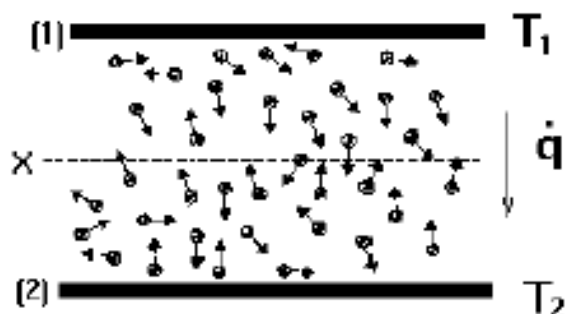


Figura 1: Transferência de Calor por Condução.

(Fonte: Incropera *et al*, 2008)

A transferência de calor, em uma certa direção ocorre devidamente a um gradiente de temperatura. Não existe nenhum tipo de transferência de calor se não há mudança de temperatura (ÇENGEL, 2009).

2.1.3 Definição da Transferência de Calor por Convecção

Para Incropera (2008), a transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos. Além de transferência de energia térmica devido ao movimento molecular aleatório, o calor é transferido através do movimento global do fluido. Isso está associado ao fato de que, em qualquer instante, muitas moléculas estão se movendo coletivamente ou como agregado. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de energia. Uma vez que as moléculas nos agregados mantêm seus movimentos aleatórios, a transferência total de calor é, então, devida à superposição do transporte devido ao movimento global do fluido; a transferência de calor por convecção acontece em função do movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido no interior da camada limite. A quantidade de calor transferida pela convecção é demonstrada pela Equação 1.

$$Q = h \times A_s \times \Delta T_{ml} \quad (1)$$

Onde:

Q: Transferência de calor por convecção (W)

h: Coeficiente de película (W/m²K)

A_s: Área superficial (m²)

ΔT_{ml}: Variação de temperatura logarítmica (°C)

2.1.4 Conceitos de Trocadores de Calor

Segundo Kreith (2003), um trocador de calor consiste em um dispositivo no qual é feito a transferência de calor entre uma substância quente e outra mais fria, o que comumente acontece com os fluidos. Para que haja transferência de calor de um corpo para o outro em um trocador de calor, é necessário que exista um declínio de temperatura.

Para Çengel (2011), os trocadores de calor são utilizados na prática em larga escala em diversas aplicações, que partem de sistemas de aquecimento e ar-condicionados domésticos e vão até processos químicos e geração de potência em grandes usinas.

A transferência de calor em um trocador de calor geralmente envolve convecção em cada fluido e a condução através da parede que separa os dois fluídos. Na análise de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor U , que representa a contribuição de todos os efeitos sobre a transferência de calor. A taxa de transferência de calor entre os dois fluídos em um local de trocador de calor depende da magnitude da diferença de temperatura no local, que varia ao longo do trocador de calor (ÇENGEL, 2011).

2.1.4.1 Tipos de Trocadores de Calor

Incropera (1998) explica que os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção, como escoamento paralelo, contracorrente, cruzado e misturado.

O tipo mais simples de trocador de calor é constituído por dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, chamado de trocador de tubo duplo. Um fluido no trocador de calor de tubo duplo escoia através do tubo menor, enquanto o outro escoia através do espaço anular entre os dois tubos. Dois tipos de arranjo de escoamento são possíveis no trocador de calor de tubo duplo: no escoamento paralelo, os fluídos quente e frio entram no trocador de calor na mesma extremidade e avançam na mesma direção. No escoamento contracorrente, os fluídos quente e frio entram no trocador de calor em extremos opostos e escoam em direções opostas (ÇENGEL, 2011).

A Figura 2 ilustra as possíveis configurações de fluxo desses dispositivos de transferência energética entre fluídos.

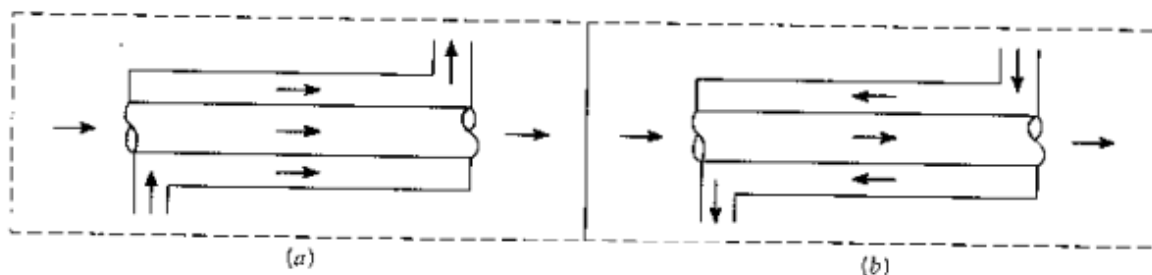


Figura 2: Configuração de Fluxo de Fluidos.

(Fonte: Incropera *et al*, 1998)

Para Çengel (2011), outro tipo de trocador de calor especialmente projetado para permitir uma grande superfície de transferência de calor por unidade de volume é o trocador de calor compacto, no qual normalmente os dois fluidos circulam perpendiculares um ao outro, e essa configuração de escoamento é chamada de escoamento cruzado (representado pela Figura 3). Esse tipo de escoamento ainda é classificado em escoamento com mistura e sem mistura, de acordo com a configuração. A presença de mistura no fluido pode ter efeito significativo sobre as características de transferência de calor do trocador de calor.

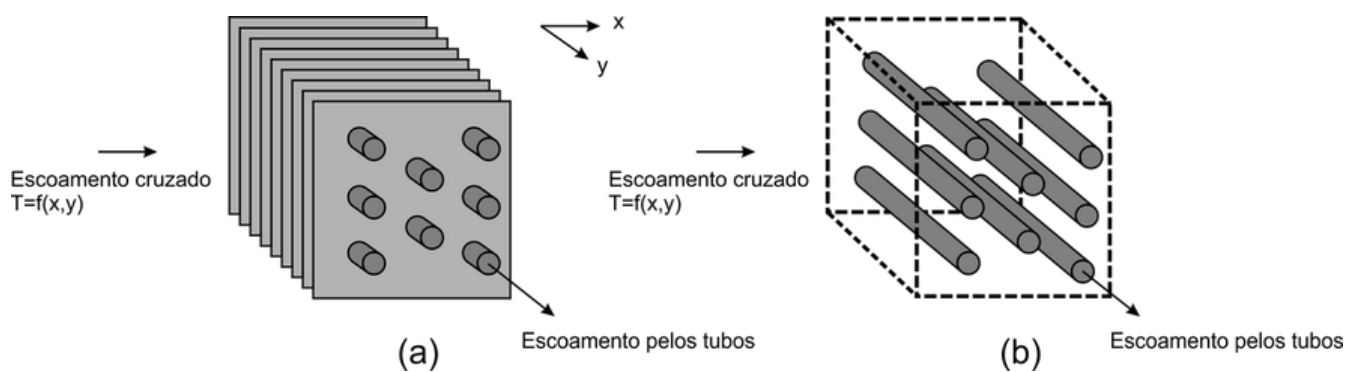


Figura 3: Diferentes Configurações de Escoamento em Trocadores de Calor de Escoamento Cruzado.

(Fonte: Çengel, 2011)

Segundo Çengel (2011), o tipo mais comum de trocador de calor em aplicações industriais seja o casco e tubo (ilustrado pela Figura 4). Esses trocadores de calor contêm um grande número de tubos acondicionados em um casco com os respectivos eixos paralelos ao do casco. A transferência de energia térmica ocorre com um fluido escoando no interior dos tubos, enquanto o outro fluido escoia fora dos tubos, através do casco. Apesar de seu uso generalizado, os equipamentos desse modelo não são adequados para utilização em aplicações automotivas e aeronáuticas, em virtude de seu tamanho e peso relativamente grandes.

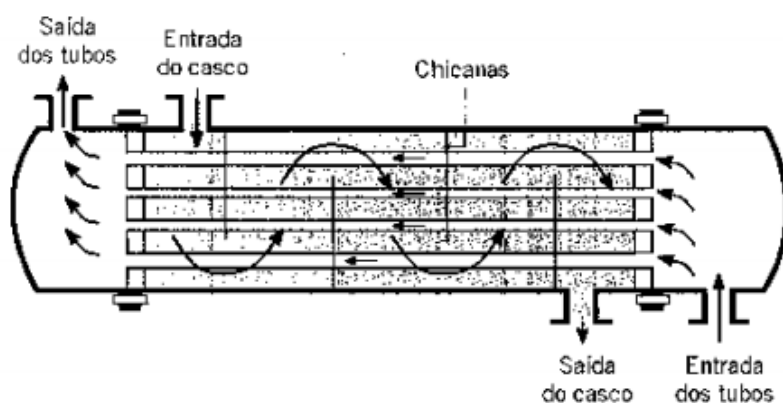


Figura 4: Trocador de calor Casco e Tubo.

(Fonte: Incropera *et al*, 1998)

Já os trocadores tipo placas, possuem as placas paralelas, as quais podem ser aletadas ou corrugadas, onde a operação pode ser feita em apenas um único passe (INCROPERA *et al*, 1998).

Um modelo do trocador de calor citado é exibido pela Figura 5.

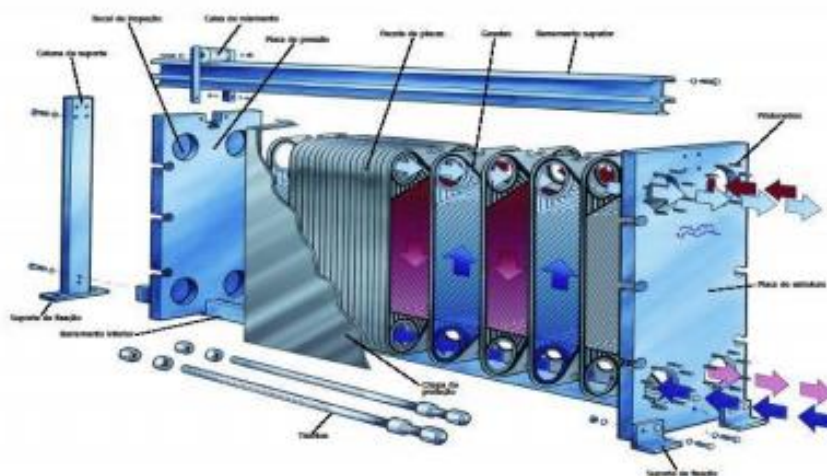


Figura 5: Trocador de Calor de Placas.

(Fonte: Grupo Tecsul, 2015)

Outro tipo de trocador de calor que envolve passagem alternada dos escoamentos dos fluídos quente e frio através da mesma área é o trocador de calor regenerativo. O trocador de calor regenerativo do tipo estático é meio poroso e tem grande capacidade de armazenamento de calor, como a malha de fios de cerâmica. Os fluídos quente e frio escoam através desse meio poroso alternadamente. O calor é transferido a partir do líquido quente para a matriz do regenerador durante o escoamento do fluido quente e a partir da matriz para o fluido frio durante o escoamento do fluido frio. Assim, a matriz serve como meio de armazenamento temporário de calor (ÇENGEL, 2011).

2.1.5 Dimensionamento Mecânico para Análise do Trocador de Calor

Segundo Collins (2006), projeto mecânico pode ser definido como um processo iterativo de tomada de decisão cujo objetivo é a criação e a otimização de um novo ou aprimorado sistema de engenharia ou equipamento para atender a uma necessidade ou um desejo humano, com o compromisso da conservação das fontes de recursos e do impacto

ambiental. Esta definição inclui várias ideias-chave, que caracterizam toda a atividade de projeto mecânico. A essência da engenharia, especialmente a do projeto mecânico, é o atendimento das necessidades e desejos humanos (consumidores). Se uma equipe está criando um novo equipamento ou aperfeiçoando um projeto já existente, o objetivo é sempre fornecer a “melhor” ou ótima, combinação de materiais e de geometria. Infelizmente, um projeto ótimo raramente pode ser realizado, pois os critérios de desempenho, vida, peso, custo, segurança dentre outros, impõem limitações e exigências contrárias aos materiais e à geometria propostos pelo projetista.

Para Perussi (2010), que analisou os modelos de dimensionamento mecânico para análise de trocadores de calor, salienta a determinação correta do método, arranjo ou dimensionamento implica diretamente em ganhos expressivos no desempenho térmico do trocador, evitando erros simples e melhorando a eficiência e efetividade.

2.1.5.1 Temperatura de Filme

Segundo Incropera *et al* (1998), é através da camada limite que as propriedades do fluido variam de temperatura e que essa variação pode influenciar a taxa de transferência de calor. A Equação 2 ilustra o método prático de cálculo da temperatura de filme, que é uma média feita entre a temperatura superficial e da temperatura da corrente livre.

$$T_f = \frac{T_{sup} + T_{\infty}}{2} \quad (2)$$

Onde:

T_f : Temperatura de filme (K)

T_{sup} : Temperatura da superfície (K)

T_{∞} : Temperatura da corrente livre (K)

2.1.5.2 Calor Específico

Para Çengel (2011), calor específico é a energia necessária para que haja o aumento da temperatura em um grau de uma unidade de massa de dada substância. Normalmente, essa energia é dependente de como o procedimento é executado. Em geral, são utilizados

dois tipos de calor específico: calor específico a volume constante C_v e o calor específico a pressão constante C_p . O calor específico a volume constante pode ser compreendido como a energia térmica para elevar a temperatura em um grau de unidade de massa de dada substância, mantendo seu volume sem alteração. A energia necessária para fazer isto, porém sob pressão inalterada é chamada de calor específico a pressão constante.

A Figura 6, representa a Tabela A-9 da obra literária de Çengel (2011) e ilustra as propriedades da água sob diferentes propriedades, dentre elas, o calor específico sob pressão constante C_p .

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Pressão de Saturação $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Densidade $\rho, \text{kg/m}^3$		Entalpia de vaporização $h_{\text{fg}}, \text{kJ/kg}$	Calor específico $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$		Condutividade térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$		Viscosidade dinâmica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansão volumétrica $\beta, 1/\text{K}$
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2501	4217	1854	0,561	0,0171	$1,792 \times 10^{-3}$	$0,922 \times 10^{-5}$	13,5	1,00	$-0,068 \times 10^{-3}$
5	0,8721	999,9	0,0068	2490	4205	1857	0,571	0,0173	$1,519 \times 10^{-3}$	$0,934 \times 10^{-5}$	11,2	1,00	$0,015 \times 10^{-3}$
10	1,2276	999,7	0,0094	2478	4194	1862	0,580	0,0176	$1,307 \times 10^{-3}$	$0,946 \times 10^{-5}$	9,45	1,00	$0,733 \times 10^{-3}$
15	1,7051	999,1	0,0128	2466	4185	1863	0,589	0,0179	$1,138 \times 10^{-3}$	$0,959 \times 10^{-5}$	8,09	1,00	$0,138 \times 10^{-3}$
20	2,339	998,0	0,0173	2454	4182	1867	0,598	0,0182	$1,002 \times 10^{-3}$	$0,973 \times 10^{-5}$	7,01	1,00	$0,195 \times 10^{-3}$
25	3,169	997,0	0,0231	2442	4180	1870	0,607	0,0186	$0,891 \times 10^{-3}$	$0,987 \times 10^{-5}$	6,14	1,00	$0,247 \times 10^{-3}$
30	4,246	996,0	0,0304	2431	4178	1875	0,615	0,0189	$0,798 \times 10^{-3}$	$1,001 \times 10^{-5}$	5,42	1,00	$0,294 \times 10^{-3}$
35	5,628	994,0	0,0397	2419	4178	1880	0,623	0,0192	$0,720 \times 10^{-3}$	$1,016 \times 10^{-5}$	4,83	1,00	$0,337 \times 10^{-3}$
40	7,384	992,1	0,0512	2407	4179	1885	0,631	0,0196	$0,653 \times 10^{-3}$	$1,031 \times 10^{-5}$	4,32	1,00	$0,377 \times 10^{-3}$
45	9,593	990,1	0,0655	2395	4180	1892	0,637	0,0200	$0,596 \times 10^{-3}$	$1,046 \times 10^{-5}$	3,91	1,00	$0,415 \times 10^{-3}$
50	12,35	988,1	0,0831	2383	4181	1900	0,644	0,0204	$0,547 \times 10^{-3}$	$1,062 \times 10^{-5}$	3,55	1,00	$0,451 \times 10^{-3}$
55	15,76	985,2	0,1045	2371	4183	1908	0,649	0,0208	$0,504 \times 10^{-3}$	$1,077 \times 10^{-5}$	3,25	1,00	$0,484 \times 10^{-3}$
60	19,94	983,3	0,1304	2359	4185	1916	0,654	0,0212	$0,467 \times 10^{-3}$	$1,093 \times 10^{-5}$	2,99	1,00	$0,517 \times 10^{-3}$
65	25,03	980,4	0,1614	2346	4187	1926	0,659	0,0216	$0,433 \times 10^{-3}$	$1,110 \times 10^{-5}$	2,75	1,00	$0,548 \times 10^{-3}$
70	31,19	977,5	0,1983	2334	4190	1936	0,663	0,0221	$0,404 \times 10^{-3}$	$1,126 \times 10^{-5}$	2,55	1,00	$0,578 \times 10^{-3}$
75	38,58	974,7	0,2421	2321	4193	1948	0,667	0,0225	$0,378 \times 10^{-3}$	$1,142 \times 10^{-5}$	2,38	1,00	$0,607 \times 10^{-3}$
80	47,39	971,8	0,2935	2309	4197	1962	0,670	0,0230	$0,355 \times 10^{-3}$	$1,159 \times 10^{-5}$	2,22	1,00	$0,653 \times 10^{-3}$
85	57,83	968,1	0,3536	2296	4201	1977	0,673	0,0235	$0,333 \times 10^{-3}$	$1,176 \times 10^{-5}$	2,08	1,00	$0,670 \times 10^{-3}$
90	70,14	965,3	0,4235	2283	4206	1993	0,675	0,0240	$0,315 \times 10^{-3}$	$1,193 \times 10^{-5}$	1,96	1,00	$0,702 \times 10^{-3}$
95	84,65	961,5	0,5045	2270	4212	2010	0,677	0,0246	$0,297 \times 10^{-3}$	$1,210 \times 10^{-5}$	1,85	1,00	$0,716 \times 10^{-3}$
100	101,33	957,9	0,5978	2257	4217	2029	0,679	0,0251	$0,282 \times 10^{-3}$	$1,227 \times 10^{-5}$	1,75	1,00	$0,750 \times 10^{-3}$
110	143,27	950,6	0,8263	2230	4229	2071	0,682	0,0262	$0,255 \times 10^{-3}$	$1,261 \times 10^{-5}$	1,58	1,00	$0,798 \times 10^{-3}$
120	198,53	943,4	1,121	2203	4244	2120	0,683	0,0275	$0,232 \times 10^{-3}$	$1,296 \times 10^{-5}$	1,44	1,00	$0,858 \times 10^{-3}$
130	270,1	934,6	1,496	2174	4263	2177	0,684	0,0288	$0,213 \times 10^{-3}$	$1,330 \times 10^{-5}$	1,33	1,01	$0,913 \times 10^{-3}$
140	361,3	921,7	1,965	2145	4286	2244	0,683	0,0301	$0,197 \times 10^{-3}$	$1,365 \times 10^{-5}$	1,24	1,02	$0,970 \times 10^{-3}$
150	475,8	916,6	2,546	2114	4311	2314	0,682	0,0316	$0,183 \times 10^{-3}$	$1,399 \times 10^{-5}$	1,16	1,02	$1,025 \times 10^{-3}$
160	617,8	907,4	3,256	2083	4340	2420	0,680	0,0331	$0,170 \times 10^{-3}$	$1,434 \times 10^{-5}$	1,09	1,05	$1,145 \times 10^{-3}$
170	791,7	897,7	4,119	2050	4370	2490	0,677	0,0347	$0,160 \times 10^{-3}$	$1,468 \times 10^{-5}$	1,03	1,05	$1,178 \times 10^{-3}$
180	1002,1	887,3	5,153	2015	4410	2590	0,673	0,0364	$0,150 \times 10^{-3}$	$1,502 \times 10^{-5}$	0,983	1,07	$1,210 \times 10^{-3}$
190	1254,4	876,4	6,388	1979	4460	2710	0,669	0,0382	$0,142 \times 10^{-3}$	$1,537 \times 10^{-5}$	0,947	1,09	$1,280 \times 10^{-3}$
200	1553,8	864,3	7,852	1941	4500	2840	0,663	0,0401	$0,134 \times 10^{-3}$	$1,571 \times 10^{-5}$	0,910	1,11	$1,350 \times 10^{-3}$
220	2318	840,3	11,60	1859	4610	3110	0,650	0,0442	$0,122 \times 10^{-3}$	$1,641 \times 10^{-5}$	0,865	1,15	$1,520 \times 10^{-3}$
240	3344	813,7	16,73	1767	4760	3520	0,632	0,0487	$0,111 \times 10^{-3}$	$1,712 \times 10^{-5}$	0,836	1,24	$1,720 \times 10^{-3}$
260	4688	783,7	23,69	1663	4970	4070	0,609	0,0540	$0,102 \times 10^{-3}$	$1,788 \times 10^{-5}$	0,832	1,35	$2,000 \times 10^{-3}$
280	6412	750,8	33,15	1544	5280	4835	0,581	0,0605	$0,094 \times 10^{-3}$	$1,870 \times 10^{-5}$	0,854	1,49	$2,380 \times 10^{-3}$
300	8581	713,8	46,15	1405	5750	5980	0,548	0,0695	$0,086 \times 10^{-3}$	$1,965 \times 10^{-5}$	0,902	1,69	$2,950 \times 10^{-3}$
320	11274	667,1	64,57	1239	6540	7900	0,509	0,0836	$0,078 \times 10^{-3}$	$2,084 \times 10^{-5}$	1,00	1,97	
340	14586	610,5	92,62	1028	8240	11,870	0,469	0,110	$0,070 \times 10^{-3}$	$2,255 \times 10^{-5}$	1,23	2,43	
360	18651	528,3	144,0	720	14,690	25,800	0,427	0,178	$0,060 \times 10^{-3}$	$2,571 \times 10^{-5}$	2,06	3,73	
374,14	22090	317,0	317,0	0	—	—	—	—	$0,043 \times 10^{-3}$	$4,313 \times 10^{-5}$			

Figura 6: Propriedades da Água.

(Fonte: Çengel, 2011)

2.1.5.3 Vazão Mássica e Velocidade Média

Segundo Incropera (2011), para realização do cálculo da vazão de massa utilizamos a fórmula ilustrada pela Equação 3:

$$\dot{m} = V \times \rho \quad (3)$$

Onde:

$\dot{m}$: Fluxo de massa (kg/s)
 V : Vazão do fluido (m³/s)
 ρ : Densidade (kg/m³)

Segundo abordagem da literatura de Çengel (2011), a velocidade média pode ser determinada através da vazão dividida pela área de passagem do fluido, conforme indicado na Equação 4:

$$v_{med} = \frac{V}{A} \quad (4)$$

Onde:

V_{med} : Velocidade média (m/s)
 V : Vazão (m³/s)
 A : Área de passagem do fluido (m²)

2.1.5.4 Balanço Energético do Escoamento da Água

Para Çengel (2011), os trocadores de calor funcionam normalmente durante longos períodos de tempo sem qualquer alteração em suas condições de funcionamento. Com isso, podem ser modelados como dispositivos de escoamento permanente, ou seja, a vazão mássica de cada fluido permanece constante e as propriedades do fluido, como temperatura e velocidade em qualquer entrada ou saída, permanecem as mesmas. Além disso, os escoamentos dos fluidos sofrem pouca ou nenhuma mudança em suas velocidades e

elevações, e, portanto, as mudanças de energia cinética e potencial são insignificantes. O calor específico pode ser tratado como constante para um valor médio com baixa perda de precisão. A condução de calor axial ao longo do tubo é insignificante e desprezível. Por último, consideramos que a superfície externa do trocador de calor é perfeitamente isolada, não havendo perda de calor para o meio envolvente e qualquer transferência de energia térmica acontece somente entre os dois fluídos. Com essas suposições, a primeira lei da termodinâmica exige que a taxa de transferência de calor do fluido quente seja igual à taxa de transferência de calor do fluido frio. Como verificado na Equação 5:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad (5)$$

Onde:

Q: Calor transferido (W)

$\dot{m}$: Vazão mássica de água (kg/s)

C_p : Constante de calor específico da água (kJ/kgK)

ΔT : Variação da temperatura de entrada e da saída da água (°C)

2.1.5.5 Número de Reynolds

O escoamento em um tubo pode ser laminar ou turbulento, dependendo do tipo de escoamento que apresentar. O escoamento considera-se laminar quando em baixas velocidades, e passa a ser turbulento quando ultrapassa os limites críticos (ÇENGEL, 2009).

O início de turbulência da amplificação ou atenuação dos mecanismos de gatilho na direção do escoamento do fluido depende de um agrupamento adimensional de parâmetros chamado de número de Reynolds, que para cilindro comprimento característico é D (INCROPERA, 2011).

A partir da abordagem literária de Çengel (2009), temos a Equação 6 representando a modelagem para determinação do número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (6)$$

Onde:

Re: Número de Reynolds
 V: Viscosidade cinemática (m²/s)
 V: Velocidade (m/s)
 D: Diâmetro do tubo (m)

2.1.5.6 Número de Nusselt

Esse parâmetro é igual ao gradiente de temperatura adimensional na superfície e oferece uma medida da transferência de calor por convecção que ocorre na região da mesma superfície (INCROPERA, 1998).

Pela abordagem literária de Incropera (1998), o número de Nusselt representa para a camada limite térmica o que o coeficiente de atrito representa para a camada limite fluidodinâmica. A Equação 7 representa esse parâmetro:

$$Nu = \frac{h \times L}{k} \quad (7)$$

Onde:

Nu: Número de Nusselt
 k: Coeficiente de convecção (W/mK)
 h: Coeficiente convectivo (W/m²K)
 L: Comprimento característico (m)

Para escoamento laminar completamente desenvolvido, mas agora com a temperatura constante na superfície, pode-se fazer uma análise semelhante e chegar a $Nu = 3,66$ (ÇENGEL, 2009).

Para escoamento laminar completamente desenvolvido em um tubo de formato circular submetido a um fluxo de calor constante na superfície, o número de Nusselt se torna uma constante $Nu = 4,36$ (ÇENGEL, 2009).

Conhecendo do Nu , o coeficiente convectivo local h , pode ser determinado e o fluxo térmico local. Além disso, o coeficiente de transferência de calor média é obtido por

uma integração ao longo da superfície do corpo e por isso deve ser independente da variável espacial x^* . (INCROPERA, 2011).

Segundo Çengel (2009), quando o número de Reynolds é superior a 10.000, onde o escoamento é interno e completamente desenvolvido, na condição de resfriamento, o número de Nusselt pode ser calculado da forma representada pela Equação 8:

$$Nu = 0,023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \quad (8)$$

Onde:

Nu: Número de Nusselt
Re: Número de Reynolds
Pr: Número de Prandtl

2.1.5.7 Coeficiente de Película

Para Incropera (1998), independentemente das características particulares do processo de transferência de energia térmica por convecção, a Equação 9 é apropriada para a taxa de transferência representada como:

$$h = \frac{k}{D} \times Nu \quad (9)$$

Onde:

Nu: Número de Nusselt
h: Coeficiente de película (W/m² K)
k: coeficiente condutivo(W/m⁰C)
D: diâmetro da secção(m)

2.1.5.8 Variação de Temperatura Logarítmica do Sistema

Para Incropera *et al* (2008), para projetar ou prever o desempenho de um trocador de calor o essencial é relacionar a taxa total de transferência de calor a temperatura de entrada e saída dos fluídos, com coeficiente global de transferência de energia térmica e a

área superficial total disponível. Por isso, devemos determinar a variação de temperatura logarítmica do sistema, conforme a Equação 10:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(\Delta T_e - \Delta T_s)}{\ln\left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T_s}\right)} \quad (10)$$

Onde:

ΔT_{ml} : Variação de temperatura logarítmica do sistema (°C)

ΔT_e : Diferença de temperaturas de entrada dos dois fluídos (°C)

ΔT_s : Diferença de temperaturas de saída dos dois fluídos (°C)

2.1.5.9 Determinação da Área de Transferência de Calor

Segundo Çengel (2011), os tubos têm parede fina e portanto, é possível presumir que as áreas das superfícies interna e externa são iguais. Para trocadores de calor, multiplicamos pela quantidade de tubos do sistema. Assim, a superfície de transferência de calor se torna o que se observa na Equação 11:

$$A_s = N \times \pi \times D \times L \quad (11)$$

Onde:

A_s : Área superficial (m²)

N : Número de tubos

D : Diâmetro dos tubos (m)

L : Comprimento dos tubos (m)

CAPÍTULO 3

3.1 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

Segundo Gerhardt *et al* (2009), a pesquisa bibliográfica é realizada por meio de consulta em teorias e conceitos já estudados, publicados em livros, artigos científicos e sites. Os trabalhos científicos iniciam-se com uma pesquisa bibliográfica para conhecer o que já foi estudado sobre o assunto. Uma pesquisa nunca parte do zero.

Método científico é um processo para conhecer, interpretar e empregar na investigação; é a forma e procedimento escolhido para realizar uma pesquisa. O método científico dedutivo propõe uma análise do problema da visão macro, reduzindo até uma visão micro, seguindo uma linha de raciocínio decrescente (PRODANOV, 2013).

Os métodos de pesquisa utilizados neste projeto serão baseados em coleta de dados em laboratório, bem como temperatura da saída e entrada de um trocador de calor casco e tubo.

Serão feitas revisões bibliográficas sobre os conceitos da Transferência de Calor e Massa, bem como dos cálculos matemáticos de dimensionamento dos mais variados dispositivos de transferência de calor.

Serão calculadas as vazões mássicas dos fluídos quente e frio nas entradas e nas saídas, a velocidade média do fluido, bem como serão determinadas demais propriedades dos fluídos que fluem no trocador de calor estudado.

3.1.1 Descrição do Projeto

O projeto será realizado no laboratório de Máquinas Térmicas do Centro Universitário Assis Gurgacz, onde serão realizadas coletas no trocador de calor casco e tubo existente.

Durante o experimento envolvendo o trocador de calor casco e tubo, serão medidas as temperaturas com termopares na entrada e na saída da água fria e quente que fluem no

dispositivo de transferência e energia térmica. A Figura 7 é a ilustração dos itens que compõem o trocador e calor estudado.

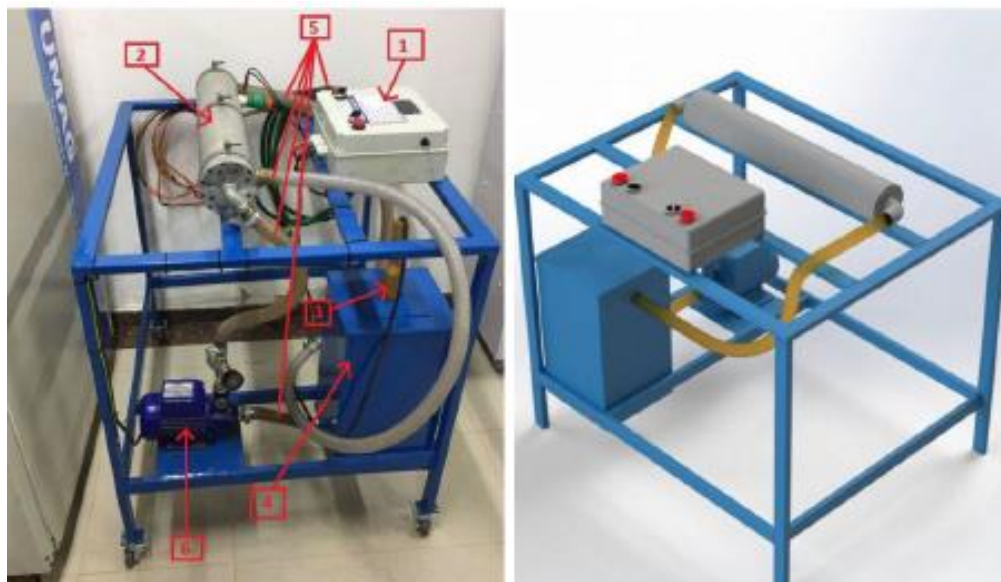


Figura 7: Posição de Cada Componente do Sistema.

(Fonte: autor, 2019)

Através da Tabela 1 a seguir, juntamente com a Figura 7, temos a descrição e a função de cada componente utilizado no sistema.

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES		
ITEM	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
1	Painel elétrico	Display de temperaturas nos pontos específicos
2	Trocador de calor casco e tubo	Realizar a troca térmica entre fluidos
3	Resistência elétrica	Fornecer calor
4	Reservatório	Armazenamento de fluido quente
5	Tubulações	Transporte de fluido
6	Motobomba	Fornecer fluxo de fluido quente

Tabela 1: Conjunto do Trocador de Calor.

(Fonte: autor, 2019)

As dimensões da peça composta por tubos dentro do casco, que realiza a troca térmica propriamente dita, são ilustradas de forma detalhada na Tabela 2.

CARACTERÍSTICAS DO TROCADOR	
CASCO	TUBOS
$D = 114mm$	$D = 6,35 mm$
$d = 100 mm$	$d = 4,95 mm$
$e = 7mm$	$e = 0,7 mm$
$L = 750mm$	$L = 640 mm$
	$n = 54 tubos$
	$1 passe contra corrente$

Tabela 2: Propriedades do Casco Tubo.

(Fonte: autor, 2019)

Para a alimentação de água quente no trocador de calor, existe uma motobomba, na qual, segundo a etiqueta do fabricante, conforme a Figura 8, possui uma vazão mássica de 40L/min.



Figura 8: Motobomba de Alimentação de Água Quente.

(Fonte: autor, 2019)

Quanto à alimentação de água fria, será feita por meio da torneira do laboratório de Máquinas Térmicas, conforme a Figura 9, que possui uma vazão mássica de aproximadamente 48,01L/min (vazão calculada com aferição de enchimento de balde cronometrado).



Figura 9: Alimentação de Água Fria.

(Fonte: autor, 2019)

Vale ressaltar que os valores de temperatura e de pressão da alimentação de água fria não sofrem alterações significativas.

No reservatório de água quente, existe uma resistência elétrica, citada na Tabela 1, como item 3 que fornece uma taxa constante de 3.000W (Watts) de potência. O modelo utilizado é representado na Figura 10.



Figura 10: Resistência Elétrica.

(Fonte: autor, 2019)

Além disso, o sistema é dotado também de termômetros do sistema, que são ilustrados na Figura 11 e suas respectivas funções quando suas posições estão listadas abaixo na Tabela 3.



Figura 11: Posição dos Termômetros.

(Fonte: autor, 2019)

FUNÇÃO DOS TERMÔMETROS	
POSIÇÃO	FUNÇÃO
1	Aferição da temperatura de entrada da água quente
2	Aferição da temperatura de saída da água quente
3	Aferição da temperatura de entrada da água fria
4	Aferição da temperatura de saída da água fria

Tabela 3: Posição e Função dos Termômetros.

(Fonte: autor, 2019)

3.1.2 Aferição de Temperatura dos Fluidos e Ensaio

Para o estudo do sistema, será realizada a aferição de temperaturas os fluídos utilizando os termopares existentes. Serão feitos também ensaios que consistem em analisar o funcionamento do equipamento, bem como adquirir informações suficientes para o cálculo da troca térmica do trocador de calor, conforme as equações e conceitos apresentados.

Vale salientar que a partir dessas análises, o entendimento do funcionamento de um sistema torna-se mais prático e interativo, quando comparado com as teorias vistas em sala de aula.

3.1.3 Teste de Circulação de Água Quente e Fria Simultaneamente

Consiste no acionamento simultâneo de ambos os fluxos, de água quente e fria simultaneamente, analisando e marcando os tempos e as respectivas temperaturas de entrada e saída, de forma a possibilitar a realização dos cálculos com base nas literaturas que foram apresentadas na revisão bibliográfica, após o equipamento apresentar estabilização de temperatura.

Deverão ser levados em consideração os fatores externos, tais como diferentes temperaturas e condições do ambiente de ensaio, bem como a variação no nível de fluido presente no reservatório devido, uma vez que este é transportado entre laboratórios e possui alguns vazamentos.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado do Teste

O teste realizado consistiu em acionar simultaneamente ambos os fluxos, de água quente e água fria, cujo objetivo principal era fazer a anotação das temperaturas de estabilização dos fluídos, possibilitando assim a realização de posteriores cálculos.

Assim, no tempo zero, foi ligada a alimentação de água quente proveniente da bomba, bem como a alimentação de água fria, proveniente da torneira. Foram analisados e marcados os tempos e as respectivas temperaturas de entrada e saída para ambos os fluxos (todos os quatro sensores).

Passados aproximadamente 15 minutos, as temperaturas permaneciam inalteradas, com variações desprezíveis. Portanto, considerou-se o sistema estabilizado. Os dados coletados dos termômetros estão na Tabela 4.

TEMPERATURAS DE ESTABILIZAÇÃO DO SISTEMA E SEUS RESPECTIVOS TEMPOS		
SENSOR	TEMPERATURA DE ESTABILIZAÇÃO	TEMPO
1	29,8°C	15 minutos
2	29,1°C	15 minutos
3	23,4°C	15 minutos
4	25,4°C	15 minutos

Tabela 4: Temperaturas Coletadas.

(Fonte: autor, 2019)

Analisando a variação de temperatura até a estabilização, conclui-se que houve um aumento da temperatura no fluxo de água quente (entrada e saída) e na saída de água fria, desde o acionamento do sistema até sua estabilização.

Isso acontece devido ao aquecimento causado pela resistência elétrica instalada no reservatório. Além disso, a redução da temperatura medida no sensor 3 de entrada de água fria ocorre devido ao resfriamento do casco do trocador, elemento no qual transmite calor via condução ao termômetro instalado.

Vale ressaltar que existe uma diferença sutil de temperaturas, como tempos necessários para que o sistema atinja um estado de estabilização. Isso ocorre devido aos fatores externos, que são as diferentes temperaturas e condições do ambiente de ensaio, bem como na variação do nível de fluido presente no reservatório que pode ter sido alterado devido aos vazamentos presentes e também, do constante transporte do sistema entre os laboratórios.

4.2 Dimensionamento do Trocador de Calor Casco e Tubo

A partir da abordagem literária, foi possível realizar os cálculos e é assertivo afirmar que as diferenças entre resultados obtidos para o calor trocado entre fluidos no trocador foram desprezíveis.

Primeiramente, foram determinadas as propriedades de calor específico, o coeficiente de condutividade térmica, o número de prandtl, a viscosidade cinemática e o peso específico dos fluidos, isso tudo por meio do cálculo da temperatura de filme dos líquidos, e das propriedades da água ilustradas pela Figura 6. Os valores obtidos dessas propriedades estão dispostos na Tabela 5.

PROPRIEDADES DA ÁGUA NA TEMPERATURA DE FILME		
Fluido:	Água Quente	Água Fria
Tfilme:	29,55°C	24,30°C
Cp:	4178,18 J/kgK	4180,28 J/kgK
Pr:	5,4848	6,2618
ρ :	996,09 kg/m ³	997,14 kg/m ³
K:	0,61428 W/mK	0,61428 W/mK
μ :	0,80637x10 ⁻³ kg/ms	0,9074x10 ⁻³ kg/ms

Tabela 5: Propriedades da Água Obtidas.

(Fonte: autor, 2019)

4.3.1 Determinação da Vazão Mássica e Velocidade dos Fluidos

Utilizando a Equação 3 e os dados da Tabela 5, foi possível determinar a vazão mássica dos fluidos, onde foi calculado uma vazão 0,01230 kg/s por tudo e 0,66406 kg/s total para a água quente, bem vazão mássica de 0,297564 kg/s para água fria, respectivamente. Posteriormente, por meio da Equação 4, foi calculada a velocidade de escoamento, onde foi obtido 0,6351 m/s para a água quente e 0,048569 m/s para a água fria, respectivamente.

4.3.2 Cálculo do Calor Transferido

Com base na Equação 5, foi calculado modelado o balanço energético de água, onde considerou-se que o valor do calor perdido é o mesmo do calor ganho, ou seja, temos que $Q = 1664,73 \text{ W}$.

4.3.3 Determinação do Número de Reynolds e do Número de Nusselt

A partir das propriedades já encontradas e mencionadas da Tabela 5, temos para a Equação 6, o número de Reynolds do escoamento interno e externo e então, ou seja, podemos obter a análise quanto ao tipo de escoamento. A Tabela 6 ilustra os resultados obtidos a partir dos cálculos feitos, bem como o tipo a classificação do escoamento dos fluidos quente e frio.

	INTERNO	EXTERNO
Re	3883,39	34158,31
Tipo	Turbulento	Laminar

Tabela 6: Classificação dos Escoamentos.

(Fonte: autor, 2019)

Com os conceitos apresentados do número de Nusselt e utilizando Equação 8, podemos calcular a os valores para o escoamento interno e externo do trocador de calor.

Dessa foram, foi obtido para o escoamento interno o valor de $Nu = 3536,76$ W/m²K. Já para o escoamento externo, foi determinado o valor de $Nu = 214,0863$ W/m²K, respectivamente.

4.3.4 Cálculo do Coeficiente de Película

O coeficiente de película apresentado nesse trabalho como Equação 9, é dependente de três valores: do coeficiente condutivo, do diâmetro dos tubos e do número de Nusselt, já calculado.

Esse valor é utilizado para a obtenção de cálculos que serão apresentados posteriormente. Para o escoamento interno, obtivemos $h = 3536,76$ W/m²K e para o escoamento externo, o valor calculado foi de $h = 214,0863$ W/m²K.

4.3.5 Variação de Temperatura do Fluido

Como apresentado por bibliografias, a variação de temperatura do fluido que escoar acontece de forma logarítmica. Pela Equação 10 apresentada e com base nas temperaturas aferidas, temos que $\Delta T_{ml} = - 0,8864$.

4.3.6 Determinação da Área Superficial de Transferência de Calor

Conforme a Equação 11, a área superficial de transferência de calor é dependente do diâmetro e do comprimento dos tubos, bem como da quantidade unitária. Nesse caso, o trocador de calor estudado, os tubos têm diâmetro de 4,95mm com comprimento de 640mm; trata-se de um conjunto de 54 unidades. Com essas informações, temos que o valor da área superficial calculada é de 0,5375m².

4.3.7 Cálculo do Calor Transferido por Convecção Interna

Por fim, temos o cálculo do calor pela convecção interna. Baseado nas propriedades obtidas, podemos substituir os valores na Equação 1 de tal forma:

$$Q = 3536,76 \times 0,5375 \times -0,8864$$

$$Q = -1685,04 \text{ W}$$

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÃO

Os trocadores de calor são, assertivamente, amplamente empregados na indústria devido às suas características, ou seja, de proporcionar a troca térmica entre fluídos distintos sem a mistura entre estes. Este atributo confere a capacidade de reaproveitamento energético, exigindo, portanto, um amplo estudo acerca de seu funcionamento. Ainda, vale ressaltar que o modelo mais comumente empregado é o tipo casco e tubo devido às suas atribuições e capacidades; configuração na qual foram redigidos os testes realizados em laboratório.

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento térmico de um trocador do tipo casco e tubo no tempo através da aferição das temperaturas. Foram acionadas simultaneamente os fluxos, onde foram analisadas as temperaturas em função do tempo, as quais demonstraram variações desprezíveis após certo período de tempo.

Primeiramente, foi calculado o calor real perdido pelo fluido quente que passa pelo trocador de calor através das temperaturas de saída e entrada de estabilização. Em seguida, foi calculado o calor teórico perdido utilizando as abordagens da convecção forçada interna, onde encontramos um valor de calor condizente; concluímos que o cálculo teórico apresenta um percentual de erro aceitável de 1,21%.

Temos ainda a potência de 3.000W da resistência elétrica, cuja finalidade era o aquecimento da água. Pode-se afirmar que o calor perdido pela água quente corresponde a 55,49% do calor fornecido pela resistência elétrica.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros na área de trocadores de calor, as sugestões são de testes acionando apenas a água quente de forma isolada, até que a temperatura limite do sistema seja atingida, para posteriormente acionar a alimentação de água fria e assim, averiguar quanto tempo o dispositivo leva para que a temperatura de estabilização seja alcançada.

Podem ser feitos também estudos para melhorias dos reservatórios, dos isolantes térmicos quanto a eficiência, bem como visar à economia de energia nos sistemas e a busca da preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: Uma Abordagem Prática**. 4a ed. São Paulo, 2011.

COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção da Falha**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2006.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

Grupo Tecsul, **Principio de Funcionamento de um trocador de calor a placas**. Disponível em <www.grupotecsul.com.br/site/Principio-de-funcionamento> Acesso em 06/05/2019.

INCROPERA, *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª. ed. Rio de Janeiro. LTC, 2008.

_____. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 4ª. ed. Rio de Janeiro. LTC, 1998.

KREITH, F. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

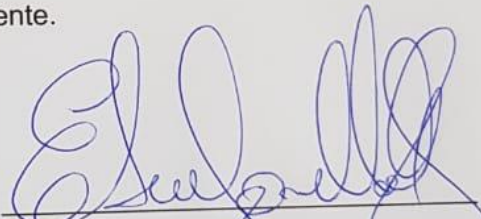
PERUSSI, R. **Análise do Desempenho de Trocadores de Calor de Flux Cruzado por Simulação Numérica**. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluidos – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PRODANOV, C. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Eu, Eliseu Avelino Zanella Junior professor do Centro Universitário Assis Gurgacz e orientador do acadêmico Carlos Alberto Canassa Junior no Trabalho de Conclusão de Curso, declaro que as correções solicitadas pela banca foram efetuadas corretamente.



Assinatura do Professor

Cascavel, 02 de julho de 2019.