



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho



FERNANDO MAXIMO DA SILVA NETO

**CONSTRUÇÃO E ESTUDO TEÓRICO-PRÁTICO DE UM TROCADOR DE
CALOR DE CASCO E TUBO DE BANCADA**

CABO DE SANTO AGOSTINHO - PERNAMBUCO

2019

FERNANDO MAXIMO DA SILVA NETO

**CONSTRUÇÃO E ESTUDO TEÓRICO-PRÁTICO DE UM TROCADOR DE CALOR
DE CASCO E TUBO DE BANCADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho(UACSA), da Universidade Federal
Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das
exigências para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: M.Sc. Humberto da Silva Santos

CABO DE SANTO AGOSTINHO - PERNAMBUCO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Esmeraldina Pereira da Silva, Cabo de Santo Agostinho-PE, Brasil

S586c Silva Neto, Fernando Máximo da
Construção e estudo teórico-prático de um trocador de calor de casco e tudo
de bancada / Fernando Máximo da Silva Neto. – 2019.
50f.: il.

Orientador: Humberto da Silva Santos
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Mecânica) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Cabo de Santo
Agostinho, BR- PE, 2019.
Inclui referências e anexos

1. Transmissão de calor 2. Trocadores de calor I. Santos, Humberto da Silva,
orient. II. Título

CDD 620

FERNANDO MAXIMO DA SILVA NETO

**CONSTRUÇÃO E ESTUDO TEÓRICO-PRÁTICO DE UM TROCADOR DE CALOR
DE CASCO E TUBO DE BANCADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho(UACSA), da Universidade Federal
Rural de Pernambuco (UFRPE), como parte das
exigências para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: M.Sc. Humberto da Silva Santos

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof..M.Sc. Humberto da Silva Santos (Orientador)
UACSA/UFRPE

Prof. M.Sc. Alisson Cocci De Souza (Examinador)
UACSA/UFRPE

Prof.M.Sc. Ronelly José de Souza (Examinador)
UACSA/UFRPE

AGRADECIMENTOS

Primeiro, agradeço a Deus por me proporcionar saúde para desenvolver este projeto e o privilégio de realização de mais um sonho.

Aos meus pais, Helena Lúcia e Claudio Fernando, que são os pilares da minha educação, pelas palavras de sabedoria nos momentos de dificuldade, pelo o apoio e incentivo em todos os meus projetos pessoais e pela formação ética e moral que jamais esquecerei. Obrigado por tudo.

Ao meu irmão, Felipe Máximo, por sempre permanecer ao meu lado, me ajudando e me incentivando a sempre seguir em frente e lutar pelos nossos objetivos. Obrigado por todo amor e carinho que encontro em você. Obrigado, Jacaré. “Mais que sete é vaidade”.

À minha namorada, Rayanne Ribeiro, pelo companheirismo, compreensão, amizade, e por toda palavra de incentivo e ajuda. Obrigado por fazer parte da minha vida e toda forma de amor que recebo de você.

À minha família, por toda palavra de apoio e compreensão, sempre acreditando no meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Humberto da Silva Santos, pelo apoio, incentivo, dedicação e ajuda para desenvolver este projeto.

A todos meus colegas e amigos que de alguma maneira tornaram a jornada menos cansativa e mais divertida.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, Campus UACSA, e a todos os professores que contribuíram para minha formação.

RESUMO

Este projeto consiste na construção de um trocador de calor do tipo casco e tubo de bancada que proporcione avaliar a sua eficiência térmica, bem como a taxa de calor trocada entre os fluidos. É avaliado o desempenho do trocador de calor para diferentes arranjos de fluxos, paralelo e contracorrente, como também para diferentes vazões de escoamento dos fluidos. O casco do trocador de calor é de acrílico, visando proporcionar uma melhor visão de alguns componentes que constituem um trocador deste tipo. A energia trocada entre os fluidos é calculada através das leituras das temperaturas de entrada e saída do fluido, junto com suas respectivas vazões. O fluido escolhido tanto para o escoamento interno (dentro do feixe de tubos), quanto para o escoamento externo (passa no casco do trocador de calor) é a água, que será armazenada em dois reservatórios diferentes. O reservatório do fluido frio utiliza água a temperatura ambiente, já o reservatório do fluido quente utiliza uma resistência elétrica, junto com um controlador de temperatura para manter o fluido aquecido. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois além de disponibilizar a instituição um equipamento deste tipo, foi possível perceber a importância da vazão dos fluidos no processo de transferência de calor e mostrar que o escoamento em regime contracorrente possibilita uma maior variação das temperaturas de saída dos fluidos em relação ao escoamento paralelo através de um trocador de calor de casco e tubo de bancada construído.

Palavras chave: Trocador de calor. Transferência de calor. Casco e tubo.

ABSTRACT

This project consists of the construction of a shell-and-tube heat exchanger of bench-top that provides an assessment of its thermal efficiency as well as the rate of heat exchanged between the fluids. The performance of the heat exchanger is evaluated for different flow arrangements, parallel and countercurrent, as well as for different flow rates of the fluids. The shell of the heat exchanger is of acrylic, aiming to provide a better view of some components that constitute a type exchanger. The energy exchanged between the fluids is calculated through the readings of the inlet and outlet temperatures of the fluid, along with their respective flow rates. The fluid chosen for both internal (inside the tube bundle) and the external flow (passes through the shell of the heat exchanger) is water, which will be stored in two different reservoirs. The cold fluid reservoir uses water at room temperature, while the hot fluid reservoir uses an electric resistance, along with a temperature controller to keep the fluid warm. The results obtained were satisfactory, since in addition to providing the institution with such equipment, it was possible to perceive the importance of fluid flow in the heat transfer process and to show that the flow in a countercurrent regime allows a greater variation of the fluid outlet temperatures relative to the parallel flow through a shell-and-tube heat exchanger of bench-top built.

Keywords: Heat exchanger. Heat transfer. Shell-and-tube.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	12
3.1.1 CONDUÇÃO	12
3.1.2 CONVECÇÃO.....	12
3.1.3 IRRADIAÇÃO	13
3.2 ESCOAMENTOS EM REGIME PERMANENTE E NÃO PERMANENTE.....	13
3.3 TROCADORES DE CALOR	14
3.3.1 RECUPERADOR E REGENERADOR	14
3.3.2 PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	15
3.3.3 TIPO DE CONSTRUÇÃO DE TROCADOR DE CALOR	15
3.3.4 MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA	19
3.3.5 ARRANJO DE FLUXO	20
3.4 ANÁLISES DE TROCADORES DE CALOR	22
3.5 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	23
3.6 FATOR DE INCRUSTAÇÃO.....	26
3.7 MÉTODO LMTD	28
3.8 MÉTODO DA EFETIVIDADE-NUT	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 CASCO DO TROCADOR	32
4.2 CHICANAS.....	34
4.3 CONTROLADOR PID	36
4.4 ARDUÍNO.....	36
4.5 TROCADOR DE CALOR	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1 TESTE 1: REGIME PARALELO	38
5.2 TESTE 2: REGIME PARALELO	40
5.3 TESTE 3: REGIME CONTRACORRENTE	42
5.4 TESTE 4: REGIME CONTRACORRENTE	43
5.5 ANÁLISE DOS TESTES	45

6. CONCLUSÕES.....	47
7. SUGESTÕES E MELHORIAS.....	48
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
ANEXO A-RELAÇÕES DE EFETIVIDADE PARA TROCADORES DE CALOR.....	50
ANEXO B - FLUXOGRAMA DO TROCADOR DE CALOR.....	51

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação das indústrias em melhorar seus processos junto com redução de custos, faz com que se busque operar os equipamentos com o maior rendimento possível. Neste contexto, os trocadores de calor são equipamentos utilizados para evitar o desperdício de energia sob forma de calor para o ambiente, calor de processo, através do reaproveitamento dessa energia, evitando gastos com outras fontes de calor(VIANA, 2014).Trocadores de calor são equipamentos em que o calor é transferido de um fluido ao outro, o fluido de maior temperatura transfere calor para o fluido de menor temperatura e os fluidos podem ser líquidos ou gases (KREITH, 2014).

Os trocadores de calor são usados em uma ampla variedade de aplicações como produção de energia, processos, indústrias químicas e alimentícias, eletrônica, engenharia ambiental, recuperação de calor residual, indústria de manufatura, ar condicionado, refrigeração, aplicações espaciais, etc(KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).

O trocador de calor do tipo casco e tubo é o equipamento mais utilizado dentre os vários trocadores de calor existente no mercado, por causa das suas vantagens no custo de fabricação e desempenho térmico (BALBUENO, 2006). Conhecer a melhor forma de trabalhar com esse tipo de trocador de calor proporciona uma viável alternativa para redução de custos, pois permite que ocorra a maior taxa de transferência de calor possível entre os fluidos.

Desta forma, podemos afirmar que trabalhar com esse equipamento em máxima eficiência é também promover um desenvolvimento sustentável no ambiente industrial. Os métodos mais utilizados na análise do desempenho térmico deste tipo de trocador de calor é o LMTD(método da média logarítmica da diferença de temperatura) e o método da efetividade-NUT(número de unidades de transferência).

Devido ao alto grau de importância desses equipamentos nos processos industriais, será construído um trocador de calor de bancada do tipo casco e tubo para análise de sua eficiência energética.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Construir e analisar um trocador de calor de casco e tubo em escala laboratorial para o estudo de sua eficiência energética em dois tipos de fluxos: paralelo e contracorrente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir o trocador de calor com menor custo possível;
- Medir a variação da temperatura dos fluidos em função da variação da vazão mássica;
- Programar o micro controlador arduíno para obtenção das temperaturas e vazões dos fluidos;
- Analisar e comparar a eficiência do trocador de calor operando em dois tipos de fluxo: em fluxo paralelo e contra-fluxo (contracorrente);
- Permitir a visualização, mesmo que de maneira simples, dos principais componentes de um trocador de calor de casco e tubo.
- Disponibilizar aos alunos da instituição um trocador de calor do tipo casco e tubo que permita avaliar seu desempenho para diferentes condições de operação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A termodinâmica é a ciência que estuda as maneiras pelas quais a energia é transportada e as interações entre o sistema e o meio em que está inserida. As interações podem ser calor ou trabalho (ANTUNES *et al.*,2016;INCROPERA,2007).

A energia existe em diferentes formas, sendo o calor uma delas, definido como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles. A ciência que estuda as taxas de transferência de calor é chamada transferência de calor (ÇENGEL;GHAJAR, 2012).

Assim, a transferência de calor estuda a maneira e o tempo de duração de como o calor é transferido entre os corpos ou sistemas de diferentes temperaturas. Os três mecanismos básicos de transferência de calor são: condução, convecção e irradiação.

3.1.1 Condução

Processo no qual a transmissão de calor ocorre devido a transmissão de vibrações entre as moléculas, nesse caso, as moléculas com maior energia (maior temperatura) vibram com maior intensidade, transmitindo energia às moléculas adjacentes menos energéticas (menor temperatura). Como necessita de um meio material para ocorrer, existem materiais que conduzem muito bem o calor, bons condutores como os metais, e os que o calor demoram muito para se propagar, isolantes como isopor, lã, madeira,etc(CARVALHO, 2002).

3.1.2 Convecção

Processo de transferência de calor que ocorre através do deslocamento da matéria. A convecção pode ser classificada em dois tipos: convecção forçada, quando o fluido é forçado a fluir por ação de elementos exteriores como por exemplo ventiladores e bombas, e a convecção natural, quando o movimento do fluido é provocado pela diferença de densidade, em que há a ascensão do fluido mais quente e descida do fluido mais frio(CARVALHO, 2002).

3.1.3 Irradiação

Processo de transferência de calor que ocorre através de ondas eletromagnéticas, assim, não precisa de um meio para se propagar, pois as ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo. Todos os corpos emitem radiação, através de ondas eletromagnéticas, cuja intensidade aumenta com a temperatura.

3.2 ESCOAMENTOS EM REGIME PERMANENTE E NÃO PERMANENTE

Os termos permanentes e não permanentes são muito utilizados na engenharia, dessa forma é muito importante compreender os seus significados.

- **Regime permanente:** esse termo significa nenhuma modificação com tempo. Vários equipamentos operam longos períodos sob as mesmas condições e são classificados como dispositivos em regime permanente, como trocadores de calor, bombas, caldeiras, turbinas, condensadores etc. Esses equipamentos trabalham em processo em regime permanente, processo durante o qual um fluido escoar através de um volume de controle de forma permanente, ou seja, as propriedades (volume, massa e energia) podem variar de um ponto para outro dentro do volume de controle, mas em qualquer ponto fixo elas as propriedades não variam durante todo processo (ÇENGEL; BOLES, 2013).
- **Regime não permanente:** ocorrem variações com tempo dentro do volume de controle. Quando um processo em regime transiente é analisado, é necessário perceber que as quantidades de massa e energia dentro do volume de controle não permanecem constantes, a análise ocorre em um período de tempo finito (ÇENGEL; BOLES, 2013). São exemplos desse tipo de regime: partidas de motores de combustão, enchimentos de tanques com fluido, despressurização de tanques etc.

3.3 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são equipamentos que facilitam a troca de energia sob a forma de calor entre dois ou mais fluidos a diferentes temperaturas. Trocadores de calor de casco e tubo são mais utilizados no ambiente industrial devido a sua fabricação relativamente simples e sua adaptabilidade a diferentes condições de operação (PATEL; RAO, 2010). Apesar dos avanços tecnológicos de outros tipos de trocadores (por exemplo, placa-e-frame, espiral, lamela, etc.), os trocadores de calor de casco e tubo manterão uma posição central nas atividades industriais nos próximos anos por causa da sua robustez, versatilidade e confiabilidade (COSTA; QUEIROZ, 2008).

Esses dispositivos podem ser utilizados em campos diversificados da indústria, por exemplo, indústrias petroquímicas, indústrias de alimentos, indústrias de medicamentos, usinas termoeletricas, entre outras.

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012):

- Recuperadores ou regeneradores;
- Processos de transferência: contato direto e contato indireto;
- Geometria da construção: tubos, placas e superfícies estendidas;
- Mecanismos de transferência de calor: monofásico e bifásico;
- Tipos de fluxo: fluxos paralelos, contra-fluxos e fluxos cruzados.

3.3.1 Recuperador e regenerador

Um trocador de calor com transferência de calor entre dois fluidos é chamado de recuperador, quando um fluido que entra no trocador de calor retira ou recupera calor de um fluido que já está saindo do trocador de calor, que se encontra com temperatura superior e já passou pelo processo de transferência de calor dentro do trocador.

A transferência de calor neste tipo de trocador ocorre através de paredes que separam os fluidos (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).

Em regeneradores ou trocadores de calor tipo armazenamento, a mesma passagem de fluxo (matriz) é ocupada alternadamente por um dos dois fluidos. O fluido quente armazena a energia térmica na matriz; durante o fluxo de fluido frio através da

mesma passagem em um momento posterior, a energia armazenada é extraída da matriz (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012). Neste tipo de trocador de calor, a energia térmica não é transferida através da parede.

3.3.2 Processo de transferência de calor

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com o processo de transferência de calor em dois tipos: contato direto e contato indireto.

- **Contato direto:** neste tipo de trocador de calor ocorre a mistura dos fluidos;
- **Contato indireto:** Neste tipo de trocador de calor não ocorre a mistura dos fluidos, ou seja, existe um meio físico ou superfície que separa os fluidos. A transferência de calor ocorre através de uma parede de separação, enquanto os fluidos quente e frio fluem ao longo do trocador de calor.

3.3.3 Tipo de construção de trocador de calor

Os trocadores de calor em relação ao tipo de construção são geralmente divididos em: trocadores de calor tubulares, de placas e de superfície estendida.

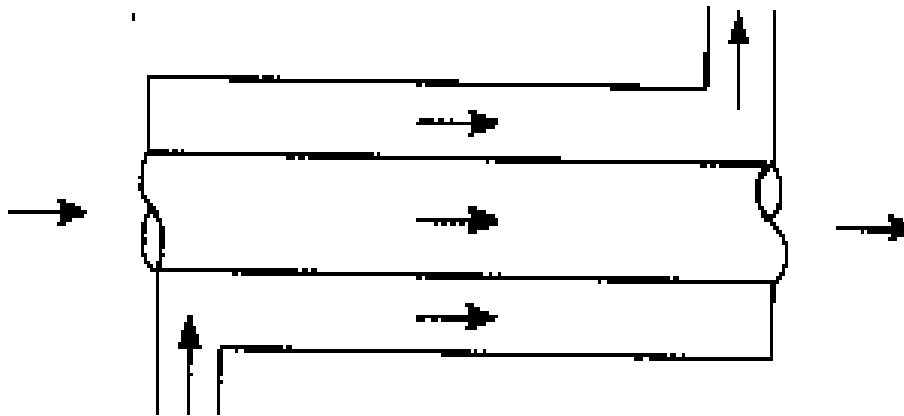
A. Trocadores de calor tubulares

Trocador de calor tubular: O trocador de calor é construído com tubos circulares. Neste equipamento, um dos fluidos flui dentro dos tubos e o outro na parte externa dos tubos. A disposição dos tubos, o comprimento, a espessura, o diâmetro e o número de tubos podem ser alterados.

Segundo Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), os trocadores de calor tubulares podem ser classificados da seguinte forma:

- **Trocadores de calor de tubo duplo:** Consiste de um tubo colocado concentricamente dentro de outro tubo de diâmetro maior, assim, um fluido flui dentro do tubo interno, tubo de diâmetro menor, e o outro fluido flui externamente ao tubo de diâmetro maior. Ver Figura 1.

Figura 1 - Trocador de calor de tubo duplo

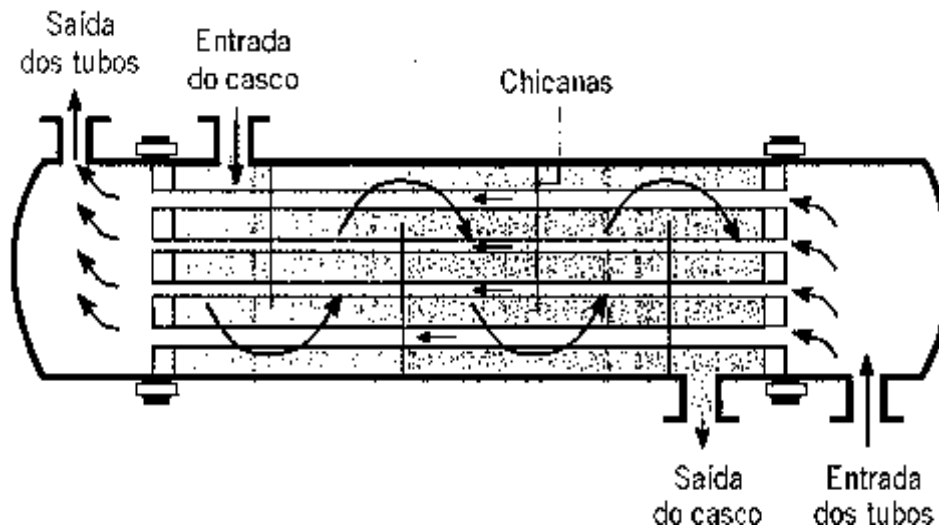


Fonte: Incropera e Dewitt, (2008).

Segundo Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012), esses trocadores podem ser dispostos em várias séries e arranjos paralelos para atender às exigências de diferença de temperatura e queda de pressão. O principal uso de trocadores de tubo duplo é o aquecimento ou resfriamento sensível de fluidos de processo, onde são necessárias pequenas áreas de transferência de calor. Esta configuração também é muito adequada quando um ou ambos os fluidos estão em alta pressão. A principal desvantagem é que os trocadores de calor de tubo duplo são volumosos e apresentam elevado custo por unidade de superfície de transferência.

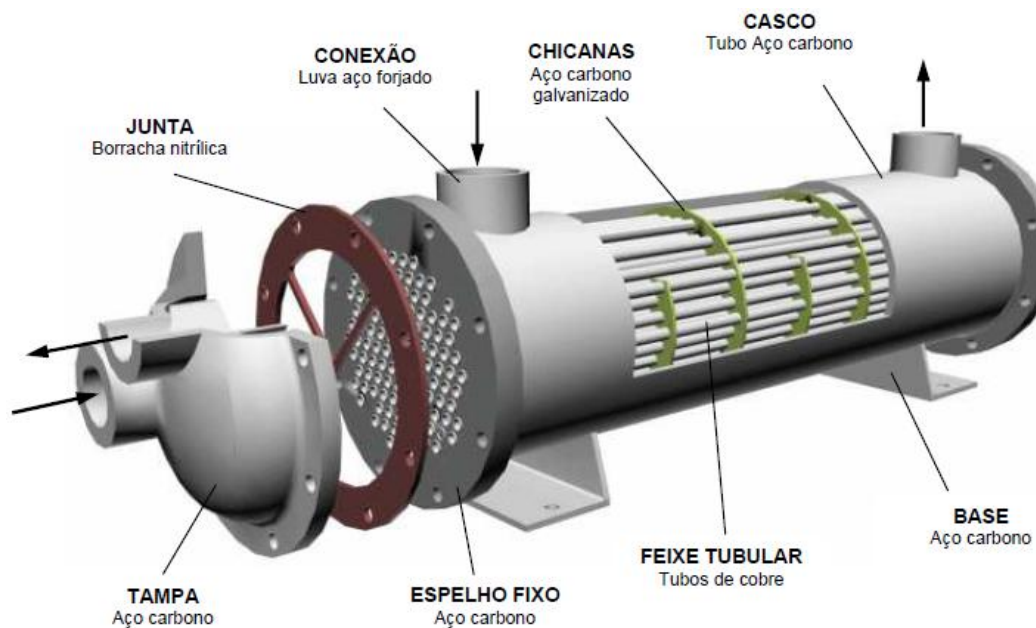
- **Trocadores de calor de casco e tubo:** Neste, um fluido entra nos tubos enquanto outro é forçado através da casca e sobre o lado externo dos tubos (KREITH; MANGLIK; BOHN, 2015). Podem ser construídos de várias formas dependendo do tipo de aplicação. Eles são muito utilizados nos ambientes industriais, pois podem suportar altas temperaturas, altas pressões, altas vazões e principalmente porque possuem elevada taxa de transferência de calor. Ver Figuras 2 e 3.

Figura 2 - Trocador de calor de casco e tubo.



Fonte: Incropera e Dewitt, (2008).

Figura 3: Componentes de um trocador de calor de casco e tubo



Fonte: Fiorilo e Nascimento, (2010).

Este tipo de trocador de calor é bastante encontrado nos ambientes industriais, assim, é importante conhecer os principais componentes que constituem um trocador de calor deste tipo. Dentre eles estão: tubos, chicanas, espelhos, casco e cabeçotes (tampas).

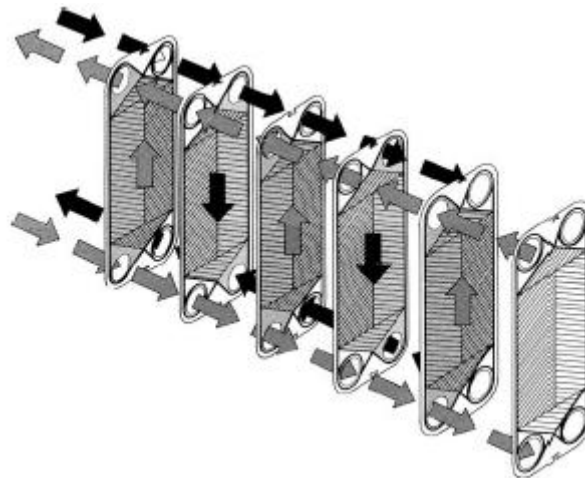
- a. **Tubos:** é onde ocorre a troca entre os fluidos interno (dentro dos tubos) e externo (dentro do casco), ou seja, são eles que determinam a área de troca

térmica. O feixe tubular é constituído de um conjunto de tubos que são fixados nos espelhos e que transversalmente na superfície são colocadas as chicanas (FIORELO;NASCIMENTO,2010).

- b. **Chicanas:** Proporcionam sustentação aos feixes dos tubos; diminuem os efeitos de vibrações; guiam o fluido do lado do casco através do feixe de tubos; proporcionam aumento da troca térmica (CORREIA, 2013).
 - c. **Espelhos:** São placas planas em que são fixadas nas extremidades do feixe de tubos.
 - d. **Casco:** É o componente em formato cilíndrico onde circula-se o fluido externo. Dentro do casco encontram-se as chicanas e o feixe de tubos.
 - e. **Cabeçotes:** São basicamente tampas que orientam os fluidos.
- **Trocadores de calor tipo tubo espiral:** Consiste em bobinas enroladas em espiral colocadas em um invólucro ou projetadas como condensadores coaxiais e evaporadores coaxiais que são usados em sistemas de refrigeração. O coeficiente de transferência de calor é maior em um tubo espiral do que em um tubo reto. Os trocadores de calor de tubo espiral são adequados para expansão térmica e fluidos limpos, já que a limpeza é quase impossível (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012).
 - **Trocadores de calor de placas:**Esses trocadores de calor são constituídos de placas finas que formam canais para o escoamento do fluido (fluxo). Segundo Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij(2012),as correntes de fluido são separadas por placas planas que são lisas ou entre as quais estão as aletas corrugadas e eles são usados para transferir calor para qualquer combinação de correntes gasosas, líquidas e bifásicas.

Esse tipo de trocador necessita de menor espaço físico em relação ao trocador de casco e tubo, podem se readaptar através da retirada ou inclusão de placas de acordo com a necessidade térmica e possuem facilidade para manutenção (SOUZA,2012).Ver figura 4.

Figura 4 - Trocador de calor de placa



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

B. Trocador de calor com superfície estendida

Trocadores de calor de superfície estendida são dispositivos com aletas na superfície de transferência de calor primária (tubular ou placa) com o objetivo de aumentar a área de transferência de calor(KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012). As aletas são colocadas no lado do fluido com o menor coeficiente de transferência de calor por convecção, visando proporcionar uma maior taxa de transferência de calor.

3.3.4 Mecanismo de transferência

1. **Monofásicos:** são aqueles trocadores de calor onde não há mudança de fase em qualquer um dos fluidos. Exemplo: aquecedores e economizadores de ar em caldeiras, radiadores automotivos, resfriadores de óleo etc.
2. **Bifásicos:** São aqueles trocadores de calor em que há mudança de fase em qualquer um dos fluidos. Exemplo: Condensadores, geradores de vapor, evaporadores etc.

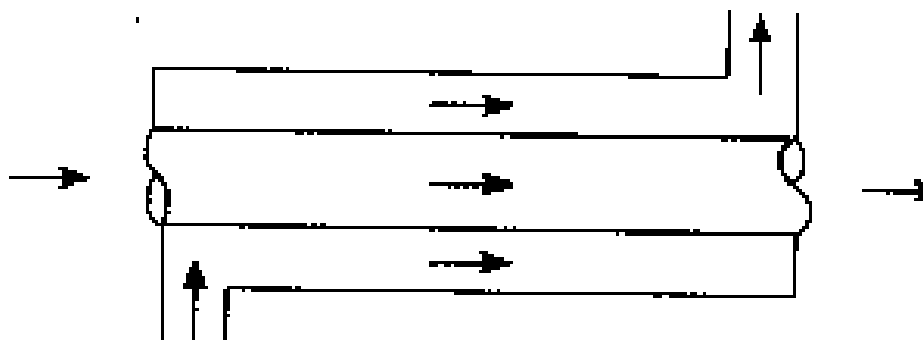
3.3.5 Arranjo de fluxo

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo como a forma com que os fluidos fluem no trocado de calor:

- **Fluxo paralelo (Figura 5).**
- **Contra - fluxo ou contracorrente (Figura 6).**
- **Fluxo cruzado (Figura 7).**

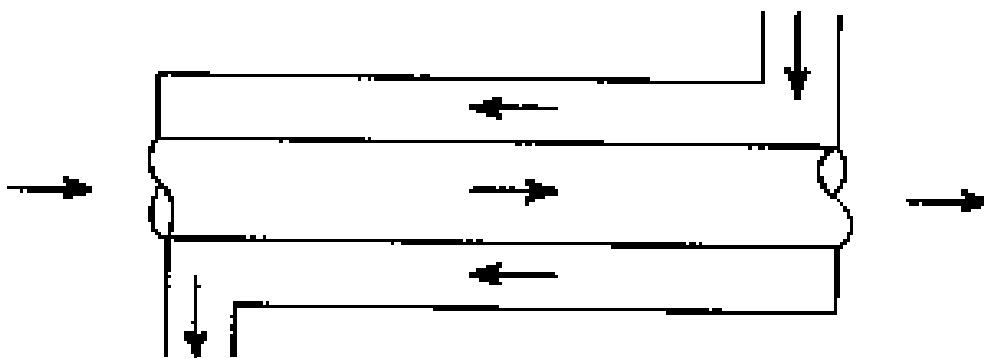
Em trocadores de fluxo paralelo, os fluidos fluem na mesma direção e sentido, entrando e saindo na mesma extremidade do trocador. Em trocadores de calor de contra fluxo os fluidos fluem na mesma direção, porém em sentidos contrários. Já nos trocadores de calor de fluxo cruzado, um fluido escoia perpendicularmente ao outro, ou seja, os fluxos dos fluidos formam um ângulo de 90° .

Figura 5 - Fluxo paralelo



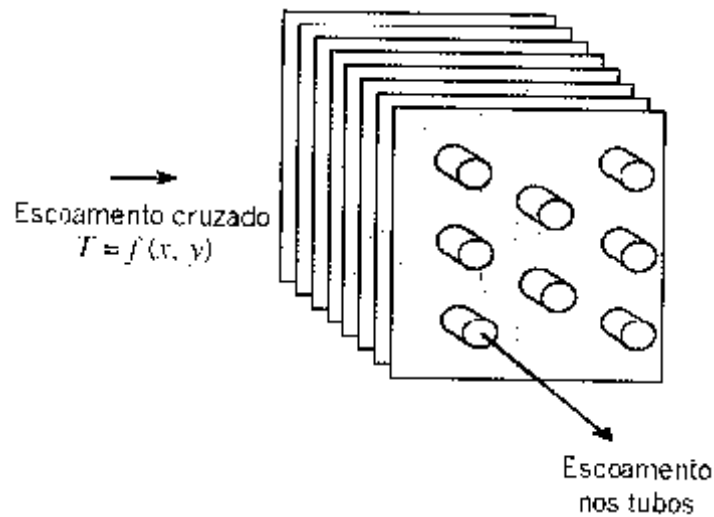
Fonte: Incropera e Dewitt, (2008).

Figura 6 - Contracorrente



Fonte: Incropera e Dewitt, (2008).

Figura 7 - Fluxo cruzado

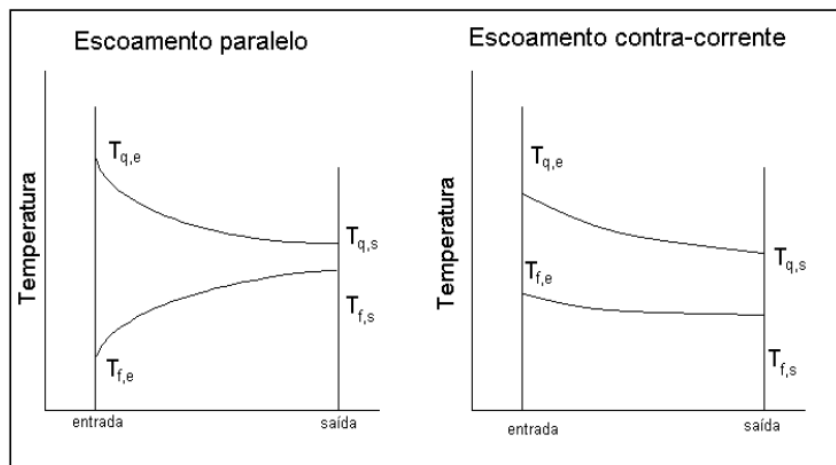


Fonte: Incropera e Dewitt, (2008).

Dentre os arranjos apresentados, o trocador de calor de fluxo contrário é o que apresenta melhor desempenho, enquanto o trocador de calor de fluxo paralelo é o que apresenta menor. Trocadores de calor de fluxo cruzado ocupam uma posição intermediária neste quesito, podendo se aproximar dos outros dois tipos, de acordo com a distribuição dos tubos, da trajetória do fluido do tubo com relação ao fluido externo, do número de passes e fileira (PERUSSI, 2010).

A diferença entre os tipos de escoamento, paralelo e contracorrente, pode ser verificada na Figura 8.

Figura 8— variação da temperatura de acordo com o tipo de trocador de calor



Fonte: Perussi, (2010).

3.4 ANÁLISES DE TROCADORES DE CALOR

A transferência de calor em um trocador de calor geralmente envolve condução entre o meio físico que separa os fluidos e convecção em cada fluido. Os trocadores de calor utilizam o princípio de conservação da massa em regime permanente, ou seja, a soma dos fluxos de massa que entram é igual à soma dos fluxos que saem. Trocadores de calor normalmente não envolvem interações de trabalho e suas variações de energia cinética e potencial são desprezíveis para ambos os fluidos (ÇENGEL; BOLES, 2013).

No estudo de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor U , que representa a contribuição da resistência do material e dos fluidos a transferência de calor. Na análise da eficiência e projeto dos trocadores de calor, diversos métodos têm sido estudados ao longo dos anos. Dentre os métodos mais utilizados estão o LMTD (método da média logarítmica da diferença de temperatura), quando as temperaturas de entrada e saída são conhecidas, e o método da efetividade-NUT (número de unidades de transferência), quando as temperaturas de saídas não são conhecidas. Basicamente, estes métodos exploram a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa máxima possível (PERUSSI, 2010).

Os trocadores de calor são equipamentos que não sofrem grandes alterações em seu funcionamento durante longos períodos de tempo, assim de uma maneira simplificada, eles podem ser modelados como equipamentos de regime permanente, ou seja, as propriedades dos fluidos permanecem constantes em um determinado ponto do trocador de calor. Admita-se também que o equipamento é totalmente isolado, portanto não há troca de calor com o ambiente externo, ocorrendo apenas entre os fluidos, ou seja, a taxa de transferência de calor sofrida pelos fluidos é igual. A taxa de transferência de calor dos fluidos frio e quente podem ser calculadas de maneira simplificada com as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\dot{Q} = \dot{m}_f C_f (T_{s,f} - T_{e,f}) \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_q C_q (T_{s,q} - T_{e,q}) \quad (2)$$

Onde,

$\dot{Q}$ = Taxa de transferência de calor [W]

C_f = Calor específico do fluido frio [$J. (Kg. K)^{-1}$]

C_q = Calor específico do fluido quente [$J. (Kg. K)^{-1}$]

$T_{s,f}$ = Temperatura de saída do fluido frio [$^{\circ}C$]

$T_{e,f}$ = Temperatura de entrada do fluido frio [$^{\circ}C$]

$\dot{m}_f$ = vazão mássica do fluido frio [$Kg. s^{-1}$]

$T_{s,q}$ = Temperatura de saída do fluido quente [$^{\circ}C$]

$T_{e,q}$ = Temperatura de entrada do fluido quente [$^{\circ}C$]

$\dot{m}_q$ = vazão mássica do fluido quente [$Kg. s^{-1}$]

Na análise de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com a taxa de capacidade térmica dos fluidos quentes e frios, ela é definida como o produto do calor específico do fluido e sua vazão mássica. Segundo Çengel (2012), a taxa de capacidade térmica de um escoamento representa a quantidade de energia em forma de calor por unidade de tempo necessária para alterar a temperatura de um fluido em $1^{\circ}C$ em um trocador de calor. Dessa forma, as Equações 1 e 2, podem ser expressas como a Equação 3 abaixo:

$$\dot{Q} = C_p (T_s - T_e) \quad (3)$$

Onde,

C_p = Capacidade térmica [$J. (^{\circ}C. s)^{-1}$]

T_s = Temperatura de saída [$^{\circ}C$]

T_e = Temperatura de entrada [$^{\circ}C$]

Nota: A variação de temperatura dos fluidos será igual, quando a taxa de capacidade térmica dos fluidos for a mesma.

3.5 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A determinação do coeficiente global de transferência de calor é fundamental na análise ou seleção de um trocador de calor. Ele está relacionado à resistência térmica total existente na transferência de calor, sendo uma parcela da convecção dos fluidos e

outra da condução do material que separa os fluidos (Figuras 10 e 11). Assim, na análise de trocadores de calor, admitindo-o sem impurezas ou incrustações causadas pelo fluido e sem aletas, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor U ou com a resistência térmica total R , expresso na Equação 4.

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{parede} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (4)$$

Onde,

U = Coeficiente global de transferência de calor [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$]

U_i = Coeficiente global de transferência de calor interno [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$]

U_o = Coeficiente global de transferência de calor externo [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$]

A_s = Área da superfície [m^2]

A_i = Área da superfície interna [m^2]

A_o = Área da superfície externa [m^2]

R_{parede} = Resistência térmica da parede do tubo [$K \cdot W^{-1}$]

h_i = Coeficiente de convecção interno [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$]

h_o = Coeficiente de convecção externo [$W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$]

Tabela 1 – Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor em trocadores de calor

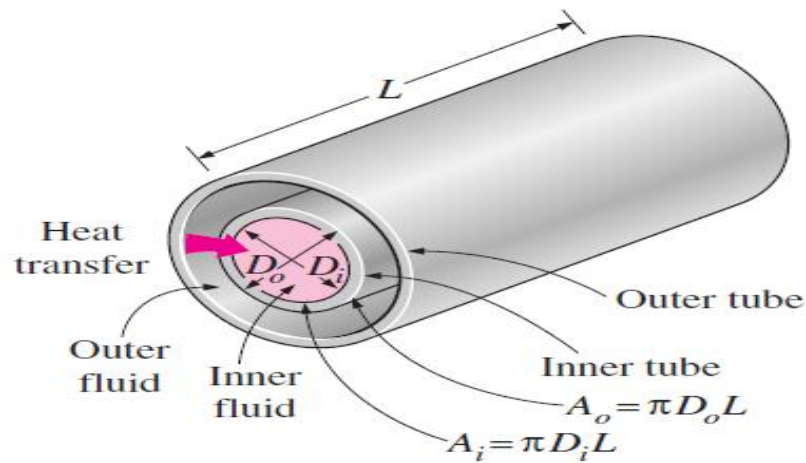
Tipo de trocador de calor U , $W/m^2 \cdot ^\circ C^*$	
Água-água	850- 1700
Água-óleo	100- 350
Água-gasolina ou querosene	300- 1000
Aquecedores de água de alimentação	1000- 8500
Vapor-óleo combustível leve	200- 400
Vapor-óleo combustível pesado	50- 200
Condensador de vapor	1000- 6000
Condensador de Freon (resfriado a água)	300- 1000
Condensador de amônia (resfriado a água)	800- 1400
Condensador de álcool (resfriado a água)	250- 700
Gás-gás	10- 40
Água-ar em tubos aletados (água nos tubos)	30- 60*
	400- 850*
Vapor-ar em tubos aletados (vapor tubos)	30- 300*
	400- 4000*

* Com base na superfície do lado do ar.

** Com base na superfície do lado da água ou do vapor.

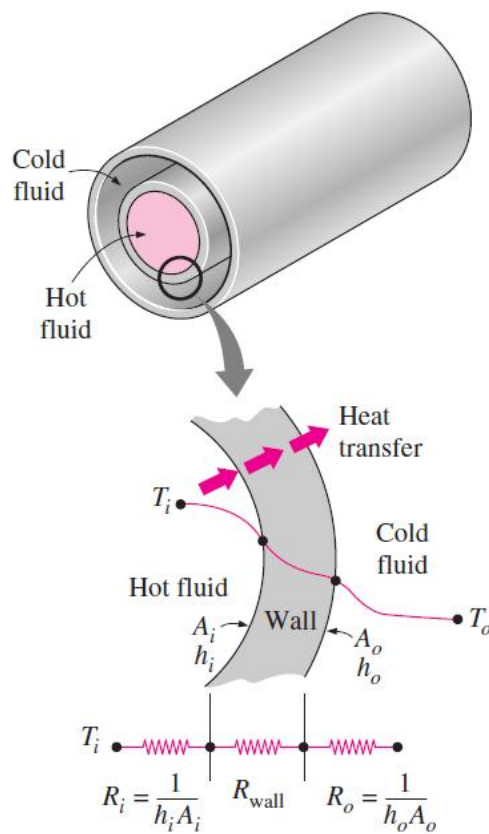
Fonte: Çengel e Ghajar(2012).

Figura 8– Resistência térmica em um trocador de calor de duplo tubo



Fonte: Cengel, (2002).

Figura 9– Resistência térmica em um trocador de calor de duplo tubo com parede



Fonte: Cengel, (2002).

Segundo Cengel (2012) , a resistência térmica da parede do tubo é:

$$R_{parede} = L_n(D_o/D_i)/2\pi kL \quad (5)$$

Onde: os subscritos i e o correspondem às superfícies interna e externa da parede que separa os dois fluidos, k corresponde a condutividade térmica do material e L

corresponde ao comprimento do tubo. Quando a espessura do material é pequena ($A_i \approx A_o \approx A_s$) ou a condutividade térmica do material do tubo é elevada, há uma simplificação conforme a Equação 6, pois a resistência térmica da parede torna-se muito pequena em relação as demais.

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (6)$$

3.6 FATOR DE INCRUSTAÇÃO

Com o passar do tempo, o desempenho dos trocadores de calor é diminuído devido ao acúmulo de depósitos nas superfícies de transferência de calor, gerando, assim, um tipo de resistência para troca térmica, ou seja, essa camada de depósitos representa uma resistência adicional à transferência de calor. A diminuição da produção, o aumento dos custos operacionais e de manutenção são importantes consequências da incrustação nestes equipamentos (FIORENTIN, 2004). Dentre os vários tipos de incrustações, os principais tipos de incrustações são: incrustação por corrosão, por formação de particulados, por material biológico/orgânico, cristalização e reação química (ORNELLAS, 2004; EPSTEIN, 2004).

- **Incrustação por corrosão:** Inicia-se por reação eletroquímica na superfície de transferência de calor (VALLE, 2012). Assim, faz-se necessário uma análise sobre a escolha do material para a construção do equipamento.
- **Incrustação por formação de particulados:** Este tipo de incrustação pode ocorrer em sistemas líquidos e gasosos. Nos sistemas líquidos, as partículas que propiciam incrustações podem ser de produtos de corrosões ou decomposições de matéria orgânica (FIORENTIN, 2004). Na indústria petrolífera, podemos citar os sedimentos compostos por óxidos de ferro, sulfetos de ferro e areia. Em sistemas que utilizam água como fluido, o particulado pode ser materiais orgânicos e/ou sujeira (lodo), dessa forma, a água deve ser tratada e seu conteúdo sólido removido antes de entrar no processo.
- **Incrustação por material biológico/orgânico:** Forma-se quando não há um tratamento adequado da água proveniente de rios, lagos ou mar. A incrustação ocorre na superfície do trocador de calor, onde alguns materiais são fungos,

bactérias, algas, mariscos. Este tipo de incrustação é um dos maiores problemas encontrados em sistemas de água de resfriamento.

- **Incrustação por cristalização:** É uma das formas mais comuns de incrustação. Geralmente é bastante encontrada na indústria petrolífera, devido à grande quantidade de sais encontrado no petróleo. Sais podem exibir solubilidade normal (aumenta com o aumento da temperatura) ou solubilidade inversa (diminui com o aumento da temperatura), assim, devido ao incremento de temperatura do óleo através da bateria de pré-aquecimento, os sais que possuem solubilidade inversa cristalizam na superfície de troca térmica quando saturam na emulsão de água (VALLE, 2012).
- **Incrustação por reação química:** É bastante encontrada na indústria alimentícia, petroquímicas e refinarias de petróleo. As superfícies são incrustadas pelo acúmulo de produtos das reações químicas sobre as superfícies. Este tipo de incrustação pode ser evitada através do revestimento dos tubos metálicos com vidro ou com a utilização de tubos de plásticos em vez de metal (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

As incrustações são dependentes das velocidades e das temperaturas dos fluidos, junto com o tempo de serviço do trocador. Segundo Çengele Ghajar (2012), a incrustação aumenta com o aumento da temperatura e com a diminuição da velocidade. O aumento da resistência térmica provocado pelas incrustações é conhecido como fator de deposição ou incrustação (R_d), alguns desses fatores são encontrados na Figura 8. Assim para um trocador de casco e tubo sem aletas, a resistência térmica pode ser expressa como, Equação 7:

$$R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{fi}/A_i + L_n(D_o/D_i)/2\pi K L + R_{fo}/A_o + \frac{1}{h_o A_o} \quad (7)$$

Onde,

R_{fi} = Fator de incrustação da superfície interna [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]

R_{fo} = Fator de incrustação da superfície externa [$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$]

Tabela 2 – Fatores de incrustação

Fatores de incrustações representativos (resistência térmica devida à incrustação para unidade de superfície)	
Fluido	$R_d(m^2.K/W)$
Água destilada, água marinha, águas fluviais, água de alimentação de caldeiras	
Abaixo de 50°C	0,0001
Acima de 50°C	0,0002
Óleo combustível	0,0009
Vapor (livre de óleo)	0,0001
Refrigerantes (líquido)	0,0002
Refrigerantes (vapor)	0,0004
Vapores de álcool	0,0001
Ar	0,0004

Fonte: Çengel e Ghajar(2012).

3.7 MÉTODO LMTD

O método da média logarítmica da diferença de temperatura é bastante utilizado na análise de trocadores de calor, principalmente no dimensionamento, para situações onde as temperaturas são conhecidas ou podem ser determinadas e o tamanho do trocador é requerido(PERUSSI, 2010).

No método LMTD, a taxa de transferência de calor é dada a partir das Equações 8 e 9 a seguir.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{Ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (8)$$

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (9)$$

Onde: ΔT_{lm} é a diferença de temperatura média logarítmica, que é a forma adequada da diferença de temperatura média para utilização de trocadores de calor. Já T_1 e T_2 representam as diferenças de temperatura entre dois fluidos em ambas as extremidades (entrada e saída) do trocador de calor e A_s representa a área da superfície de trocador de calor.

3.8 MÉTODO DA EFETIVIDADE-NUT

Quando apenas as temperaturas de entrada forem conhecidas, o uso do método da média logarítmica da diferença de temperatura (LMTD) exigirá um processo iterativo, o que torna o processo muito trabalhoso. Assim na tentativa de agilizar o processo de obtenção do desempenho do trocador de calor utiliza-se o método da efetividade-NUT (ÇENGEL;GHAJAR, 2012).Esse método proporciona a vantagem de comparar o desempenho dos vários tipos trocadores de calor através do valor encontrado de NTU (GUO et al., 2010).

A efetividade, parâmetro adimensional, é definida como a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência máxima possível, como descrito na Equação 10 abaixo:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\text{Taxa real de transferência de calor}}{\text{Máxima troca de calor possível}} \quad (9)$$

A taxa real de transferência de calor refere-se ao balanço de energia sobre um dos fluidos, quente ou frio.

A máxima transferência de calor é encontrada no trocador de calor, quando temos a máxima diferença de temperaturas entre os fluidos, ou seja, é a diferença de temperatura de entrada entre os fluidos quente e frio. Segundo Çengel e Ghajar (2012), quando as taxas de capacidades térmicas forem diferentes, o que na maioria das vezes ocorre, o fluido com a taxa de capacidade térmica menor sofrerá uma maior variação de temperatura, assim, experimentará a temperatura máxima. Nesse método, o fluido com a taxa de capacidade térmica menor é utilizado como base para aplicação do referido método (CHEN, 2013).

Para o cálculo da transferência máxima possível de calor, utiliza-se a Equação 10 abaixo:

$$Q_{max} = C_{min} (T_{e,q} - T_{e,f}) \quad (10)$$

onde:

Q_{max} - Transferência máxima possível de calor [W]

C_{min} - Taxa de capacidade térmica mínima [$J. (^\circ C. s)^{-1}$]

$T_{e,q}$ - Temperatura de entrada do fluido quente [$^{\circ}C$]

$T_{e,f}$ - Temperatura de entrada do fluido frio [$^{\circ}C$]

A efetividade do trocador depende da sua geometria e do tipo de escoamento, dessa forma, cada trocador de calor possui a sua efetividade. Assim, sabendo da máxima transferência de calor possível e a sua efetividade, é possível determinar a taxa de transferência de calor real, sem conhecer as temperaturas de saída dos fluidos. A efetividade pode ser determinada de acordo com a tabela do anexo A.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os parâmetros geométricos e os equipamentos escolhidos, foram definidos de modo que proporcionem resultados eficazes na análise dos processos de transferência de calor no trocador de calor com um menor custo possível. Externamente ao trocador de calor, são utilizados tubos e mangueiras de PVC para o escoamento dos fluidos, junto com válvulas esferas para realização de bloqueios e regulagem da vazão, como também a mudança do tipo de escoamento. Foi utilizado um aquecedor elétrico para aquecimento do fluido quente.

O fluido quente escoou internamente pelos tubos de alumínio, enquanto o fluido frio escoou pelo casco. Em todos os ensaios foi estabelecida em 40°C a temperatura do fluido quente, pois o fluido foi bombeado com uma bomba de aquário, que por segurança de suas peças não é recomendado a utilização desta bomba acima de 40°C. A temperatura de entrada do fluido frio foi a temperatura ambiente, que nos experimentos variou entre 26 e 26,5°C nos testes 1 e 3 e entre 28 e 28,5°C no teste 2 e 4. Foram realizados quatro testes, dois em regime paralelo (testes 1 e 2) e dois em regime contracorrente (testes 3 e 4). O coeficiente global de transferência de calor foi calculado através da taxa de transferência de calor do fluido quente e a superfície de trocar de calor foi a área lateral externa dos dozes tubos de alumínio. As vazões utilizadas durante os teste foram baixas visando garantir a estanquidade do trocador de calor.

As realizações dos ensaios para aquisição de dados com o trocador de calor ocorreram nas dependências da UACSA - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho e no Laboratório de Combustíveis e Energia (Policom) da Escola Politécnica de Pernambuco, de forma a aproveitar os recursos disponíveis das instituições. A seguir segue uma breve descrição desses componentes apresentados.

Para construção do trocador de calor de casco e tubo supõe-se a utilização dos materiais presente na Tabela3.

Tabela 3. Materiais utilizados na construção do trocador de calor casco e tubo.

material	tipo	quantidade	observação
1 tubos 12,7mm	alumínio	12	tubos internos do trocador com 1 metro de comprimento
2 tubo de 100 mm	acrílico	1	casco do trocador de calor

3	placa arduíno	arduíno uno	2	equipamento para aquisição de dados.
4	aquecedor elétrico	resistência elétrica	2	aquecedor elétrico para fluido quente com potência de 1000W cada.
5	registros (válvulas)	esfera	5	bloquear e regular as vazões.
6	sensor ds18b20	arduíno	3	medir as temperaturas dos fluidos.
7	sensor de fluxo	arduíno	2	medir as vazões dos fluidos.
8	mangueira transparente	pvc	2	circulação dos fluídos.
9	tampão(cap)	pvc	2	fechar o casco do trocador com 100 mm cada.
10	barras rosqueadas	aço	3	sustentação do trocador.
11	porcas	aço	30	fixação das barras rosqueadas.
13	bombas	centrífuga	1	proporcionar energia aos fluidos
14	tubos	pvc	2m	transporte dos fluidos
15	controlador	PID	1	Controlar temperatura do fluido quente
16	Cola Brascola	Veda Calha	1	Vedar o trocador de calor
17	Bomba d'água	aquário	1	Bombear o fluido quente
18	Conexões	Joelho	6	Conectar tubo pvc
19	Conexões	T	3	Conectar tubo pvc

Fonte: Autor.

4.1 CASCO DO TROCADOR

O casco do trocador de calor é de acrílico (Figura 11) com um metro de comprimento, de modo que venha proporcionar uma melhor visualização dos componentes internos do trocador de calor. No interior do casco estão instaladas as chicanas, os tubos de alumínio (Figura 12) e os parafusos de rosca sem fim proporciona

maior sustentação e rigidez ao trocador de calor. Nas extremidades do trocador de calor serão utilizados tampões de PVC sobre os espelhos (figura 13).

Figura 11 – Casco do trocador de calor de casco e tubo



Fonte: Autor.

Figura 12 – Tubos de alumínio do trocador de calor



Fonte: Autor.

Figura 13 – Espelho do trocador de calor



Fonte: Autor.

4.2 CHICANAS

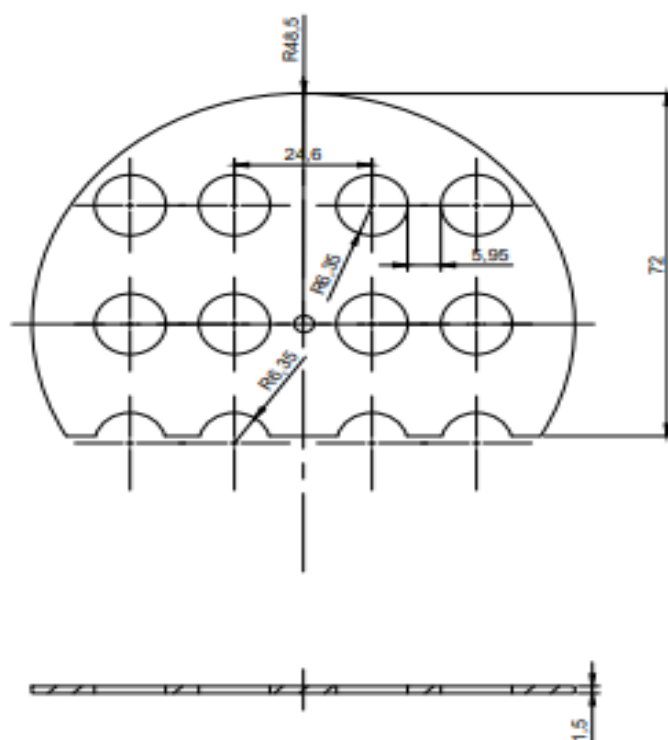
As chicanas são equipamentos utilizados no interior dos trocadores de calor para provocar um regime turbulento do fluido, desse modo, aumentando a taxa de transferência de calor (MADI, 2005). São utilizadas neste projeto quatro chicanas de acrílico. Tanto as chicanas como os espelhos foram cortados com máquina de corte a laser visando proporcionar uma maior precisão (figura 14, 15 e 16). As chicanas e os espelhos são de acrílico com 1,5mm de espessura. A manufatura destes componentes foi realizada através da terceirização do serviço, uma vez que o corte e furação manuais seriam dispendiosos e ainda poderiam causar fissuras no material.

Figura 14 – Máquina de corte à laser



Fonte: Autor.

Figura 15 – Corte das chicanas



Fonte: Autor.

Figura 16– Chicanas



Fonte: Autor.

4.3 CONTROLADOR PID

É utilizado um controlador de temperatura, REX-C100FK02-V-AN, junto com um relé de estado sólido, FOTEK SSR-40 DA, para manter o reservatório quente aquecido na temperatura desejada de 40°C(Figura 17).

Figura 17 – Controlador PID (esquerda) e Relé de estado sólido.

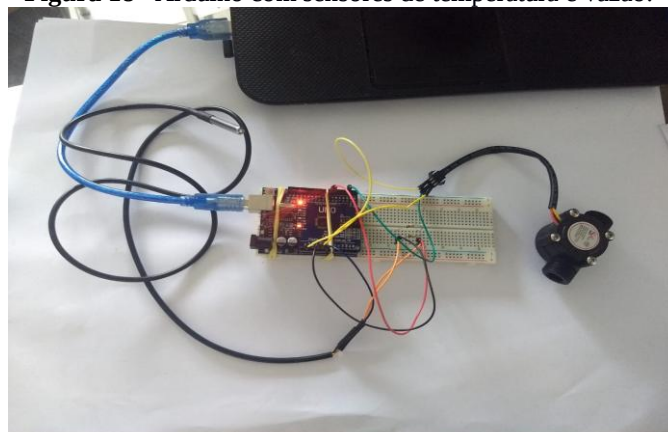


Fonte: Autor.

4.4 ARDUÍNO

O arduíno é uma plataforma de prototipação e desenvolvimento de projetos de baixo custo. O arduíno utilizado é do tipo UNO (Figura 18). Para obtenção de dados de vazão e temperaturas de saída dos fluidos, foram utilizados dois sensores de vazão, SEA YF- S201, e dois sensores de temperatura, DS18B20, respectivamente, conectados ao Arduíno (Figura 18). Os sensores de temperatura foram posicionados dentro dos reservatórios térmicos nas saídas do trocador de calor para verificar a variação das temperaturas tanto do fluido frio, quanto do fluido quente.

Figura 18– Arduíno com sensores de temperatura e vazão.



Fonte: Autor.

4.5 TROCADOR DE CALOR

O fluido frio entra e sai no casco do trocador de calor através das torneiras brancas instalas em direções opostas. O fluido quente entra e sai no trocador de calor através das tubulações de pvc colocadas em suas extremidades. São instaladas em cada extremidade do trocador de calor duas válvulas, sendo uma para saída do fluido quente (caso a entrada do fluxo seja pela outra extremidade) e outra para entrada do fluido quente (caso seja a extremidade escolhida para entrada do fluido quente). A mudança do tipo de escoamento é realizada através do manuseio das válvulas mencionadas acima. Ver figura 19.

Figura 19 – Casco do trocador de calor de casco e tubo com conexões.



Fonte: Autor.

As mudanças do regime de escoamento são realizadas através do manuseios das válvulas V3 ,V4, D1 e D2 do fluido quente, onde V3 e V4 são válvulas de entrada e D1 e D2 são válvulas de saída. No regime paralelo V4 e D1 ficam abertas e V3 e D2 fechadas, já para o regime contracorrente V4 e D1 ficam fechadas e V3 e D2 ficam abertas. S4 e S5 são sensores de vazão, sendo S4 para fluido frio e S5 para o fluido quente. S1 é o sensor de temperatura de saída do fluido frio e S2 e S3 são sensores de temperatura de saída para o fluido quente. C1, C2 e C3 são reservatórios térmicos de saída dos fluidos. V1 e V2 são válvulas de entrada e saída do fluido frio respectivamente. Ver fluxograma do anexo B.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conseguiu-se construir um trocador de calor de casco e tubo de bancada, em que o material do casco é de acrílico e os tubos internos são de alumínio. O trocador de calor possui doze tubos de alumínio de 12,7mm e um metro de comprimento cada. Utilizaram-se tubos de alumínio, devido a sua boa condutividade térmica e por ser muito mais barato que o cobre. O uso da cola Brascolla do tipo veda calha, proporcionou uma boa estanqueidade entre os tubos e os espelhos, como também entre os espelhos e o casco. As quatro chicanas ficaram dispostas no interior do trocador com aproximadamente 20cm de comprimento entre elas e garantiram uma boa sustentação ao feixe de tubos. Os caps de 100mm proporcionaram uma excelente vedação, impedindo os vazamentos do fluido quente pelo casco. Ver figura 20.

Figura 20 – Trocador de calor de casco e tubo



Fonte: Autor.

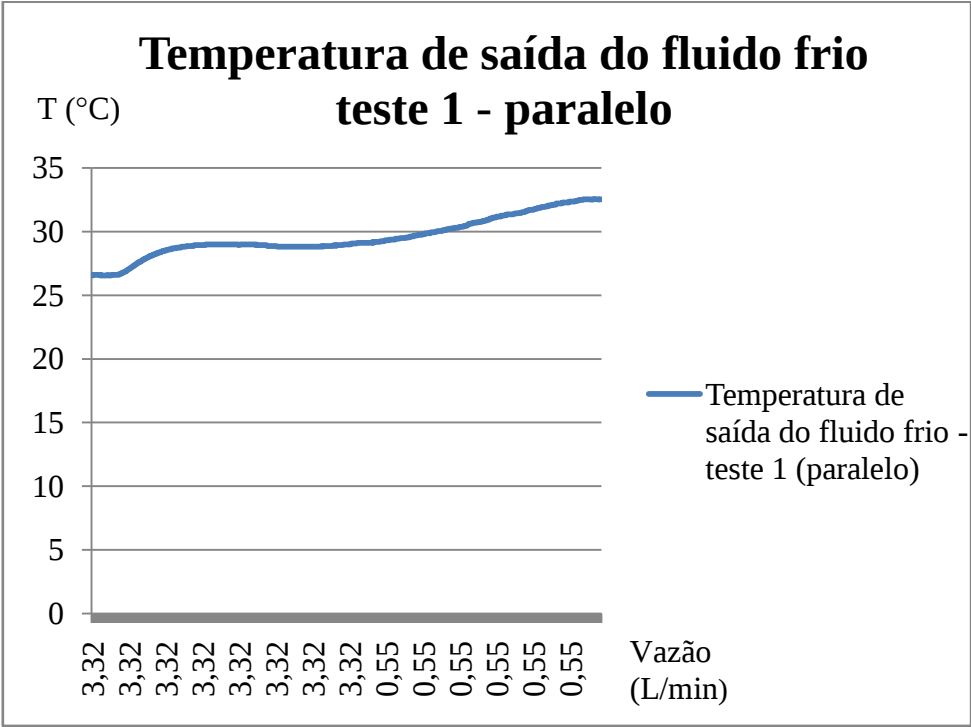
Para análise do trocador de calor foram realizados quatro testes, dois testes em escoamento paralelo e dois em contracorrente.

5.1 TESTE 1: REGIME PARALELO

Neste teste, o trocador de calor foi submetido ao escoamento paralelo, ou seja, os fluidos escoam no mesmo sentido e direção. Os fluidos quente e frio possuem uma vazão média de 3,48L/min e 3,32L/min respectivamente. Após o estabelecimento do regime permanente, quando não mais ocorre variação das temperaturas de saída dos fluidos durante um intervalo de tempo, foi constatado uma temperatura de 29,12°C e 34,52°C para os fluidos frio e quente respectivamente. Logo após ter atingindo o regime permanente, visando verificar o comportamento da temperatura de saída dos fluidos em função da vazão, a vazão do fluido frio foi alterada para um valor menor (0,55L/min), enquanto a vazão do fluido quente permaneceu constante, os resultados das temperaturas de saída dos fluidos encontram-se na tabela 4. O Comportamento das

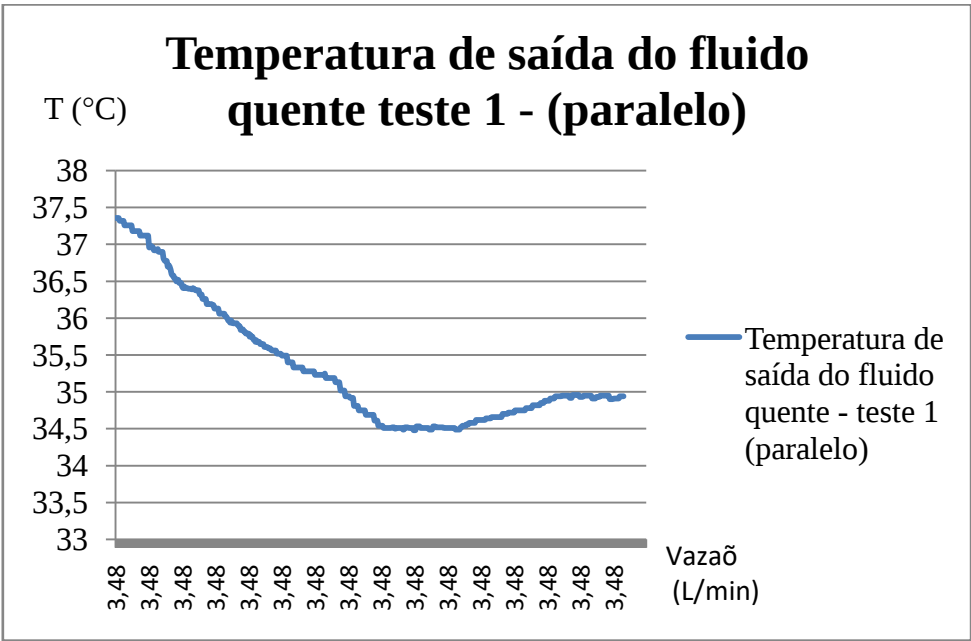
temperaturas de saídas em função da vazão do fluido frio e quente, podem ser verificadas nos gráficos1 e gráfico 2 respectivamente.

Gráfico 1: Teste 1 –Fluido Frio



Fonte: Autor.

Gráfico 2: Teste 1 – Fluido quente



Fonte: Autor.

Tabela 4.Resultados do escoamento paralelo

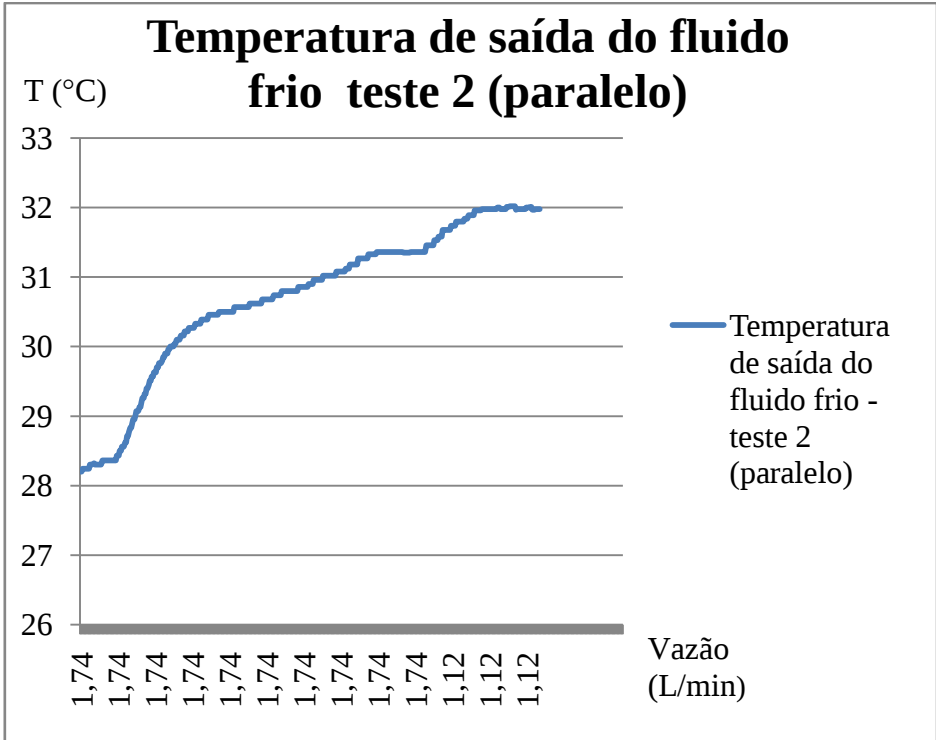
Escoamento paralelo							
Teste	Fluxo médio quente (L/min)	T - quente Entrada (°C)	T - quente Saída (°C)	Fluxo médio Frio (L/min)	T - frio Entrada (°C)	T - frio Saída (°C)	ΔT_{lm}
1	3,48	40	34,52	3,32	26,62	29,12	8,79472
2	3,48	40	35,98	1,74	28,2	31,36	7,65699
2	3,48	40	36,25	1,12	28,2	31,98	7,40788
1	3,48	40	34,95	0,55	26,62	32,54	6,39973

Fonte: Autor.

5.2 TESTE 2: REGIME PARALELO

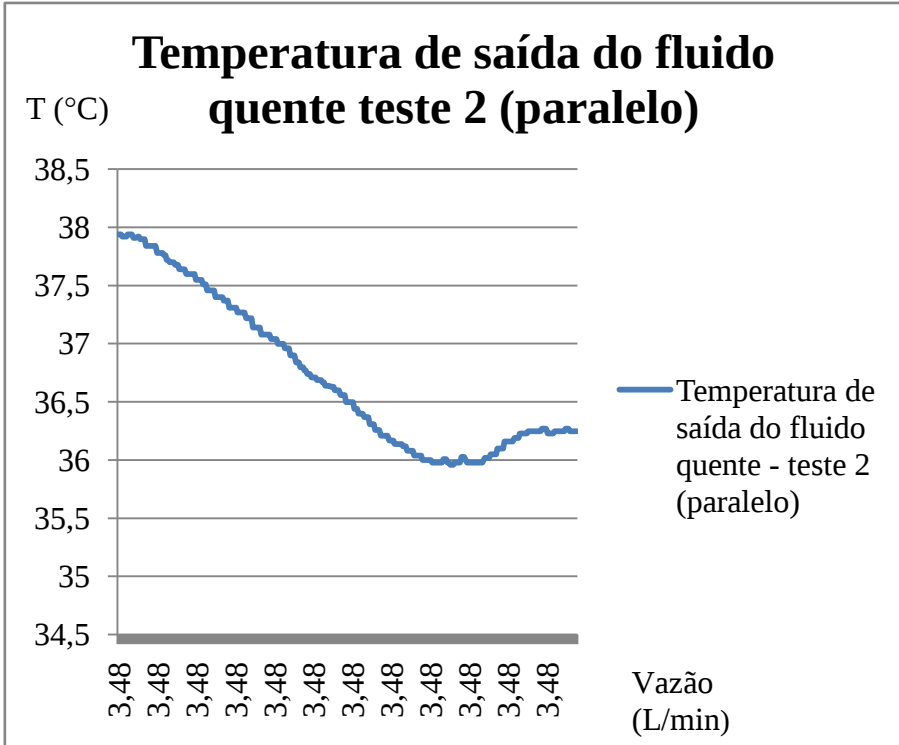
Neste teste, o trocador de calor foi submetido também ao escoamento paralelo. Os fluidos quente e frio possuem uma vazão média de 3,48L/min e 1,74L/min respectivamente. Após o estabelecimento do regime permanente, foi constatado uma temperatura de 31,36°C e 35,98°C para os fluidos frio e quente respectivamente. Logo após ter atingindo o regime permanente, visando verificar o comportamento da temperatura de saída dos fluidos em função da vazão, a vazão do fluido frio foi alterada para um valor menor (1,12L/min), enquanto a vazão do fluido quente permaneceu constante, os resultados das temperaturas de saída dos fluidos encontram-se na tabela 4. O Comportamento das temperaturas de saída em função da vazão do fluido frio e quente, podem ser verificadas nos gráficos 3 e gráfico 4 respectivamente.

Gráfico 3: Teste 2 - Fluido Frio



Fonte: Autor.

Gráfico 4: Teste 2 – Fluido quente

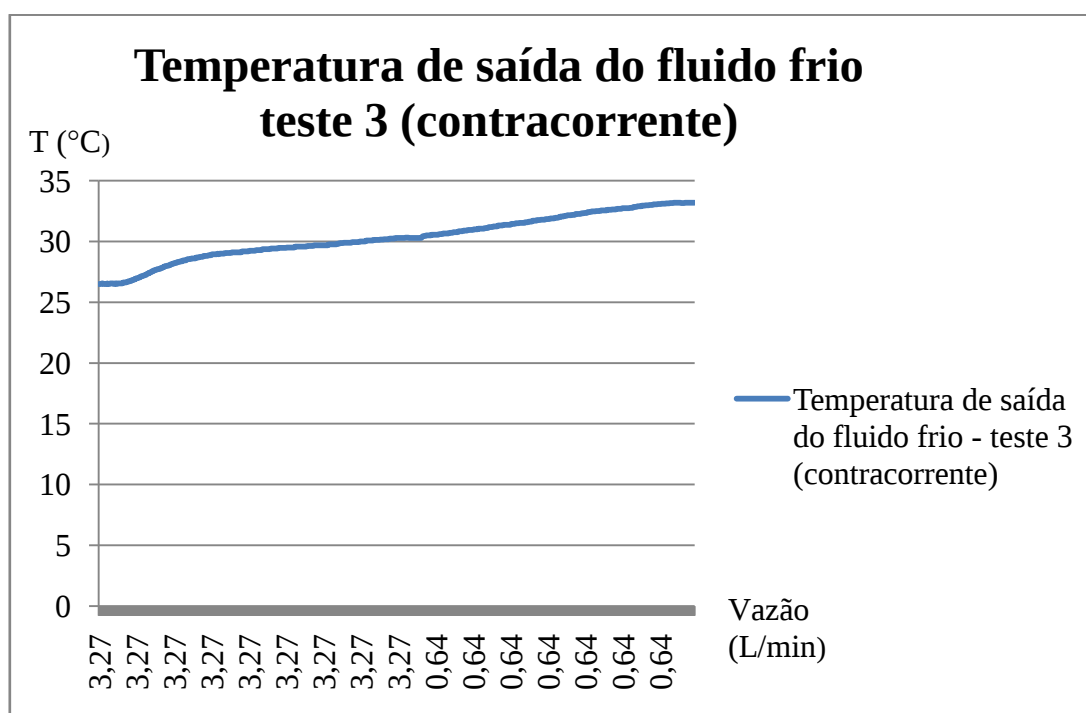


Fonte: Autor.

5.3 TESTE 3: REGIME CONTRACORRENTE

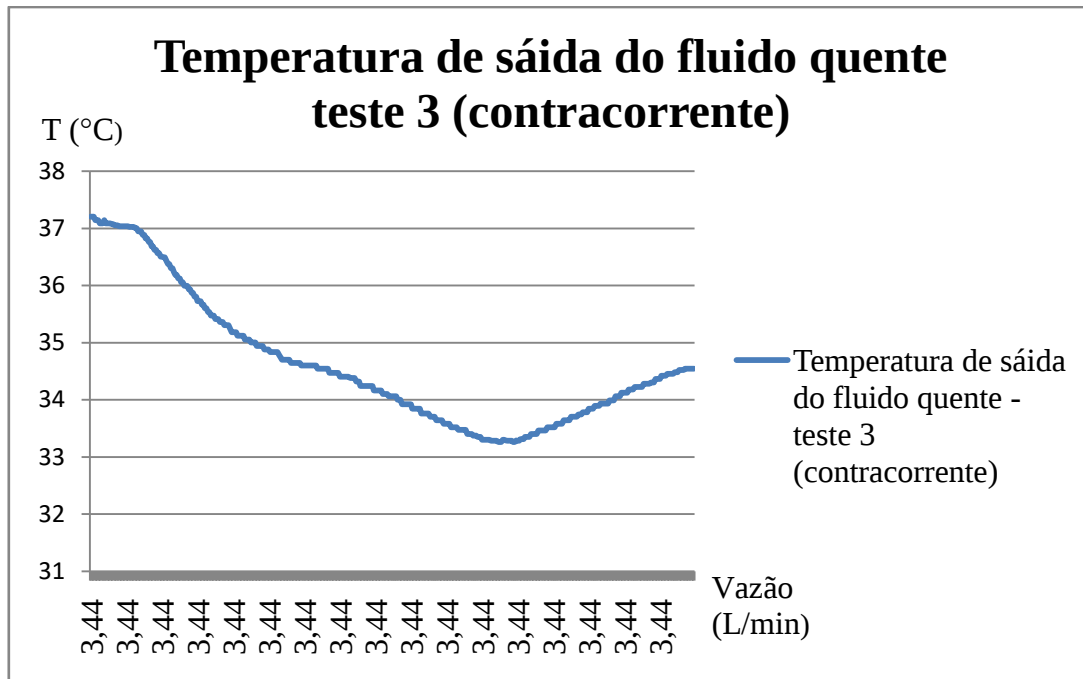
Neste teste, o trocador de calor foi submetido ao escoamento contracorrente, ou seja, os fluidos fluem escoam na mesma direção, porém em sentidos diferentes. Os fluidos quente e frio possuem uma vazão média de 3,44L/min e 3,27L/min. Após o estabelecimento do regime permanente, as temperaturas de saída dos fluidos obtidas nesse teste foram 34,02°C e 29,76°C para o fluido quente e frio respectivamente. Logo após ter atingindo o regime permanente, visando verificar o comportamento da temperatura de saída dos fluidos em função da vazão, a vazão do fluido frio foi alterada para um valor menor (0,64L/min), enquanto a vazão do fluido quente permaneceu constante. Os resultados das temperaturas de saída dos fluidos encontram-se na tabela 5. O Comportamento das temperaturas de saída em função da vazão do fluido frio e quente, podem ser verificadas nos gráficos 5 e gráfico 6 respectivamente.

Gráfico 5: Teste 3 – fluido frio



Fonte: Autor.

Gráfico 6: Teste 3 – Fluido quente



Fonte: Autor.

Tabela 5. Resultados do escoamento contracorrente

Escoamento contracorrente							
Teste	Fluxo médio quente (L/min)	T - quente Entrada (°C)	T - quente Saída (°C)	Fluxo médio Frio (L/min)	T - frio Entrada (°C)	T - frio Saída (°C)	ΔT_{lm}
3	3,44	40	34,02	3,27	26,5	29,76	8,810131
4	3,44	40	35,94	1,09	28,2	31,58	8,075229
4	2,17	40	35,05	1,09	28,2	31,19	7,788942
3	3,44	40	34,54	0,64	26,5	33,18	7,413276

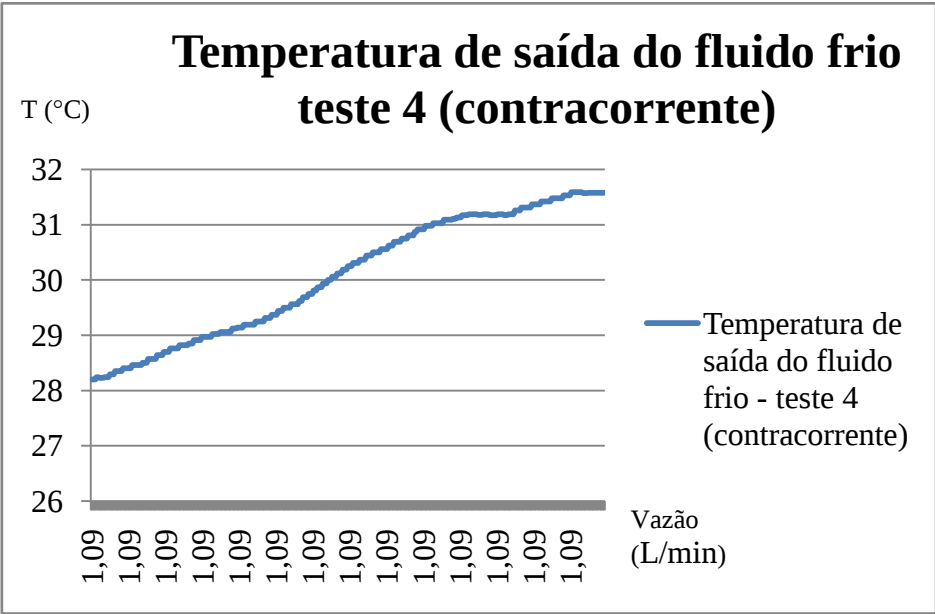
Fonte: Autor.

5.4 TESTE 4: REGIME CONTRACORRENTE

Neste teste, o trocador de calor foi submetido ao escoamento contracorrente, ou seja, os fluidos escoam na mesma direção, porém em sentidos diferentes. Os fluidos quente e frio possuem uma vazão média de 3,44L/min e 1,09L/min. Após o estabelecimento do regime permanente, as temperaturas de saída dos fluidos obtidas foram 35,94°C e 31,58°C para o fluido quente e frio respectivamente. Logo após ter atingindo o regime permanente, visando verificar o comportamento da temperatura de

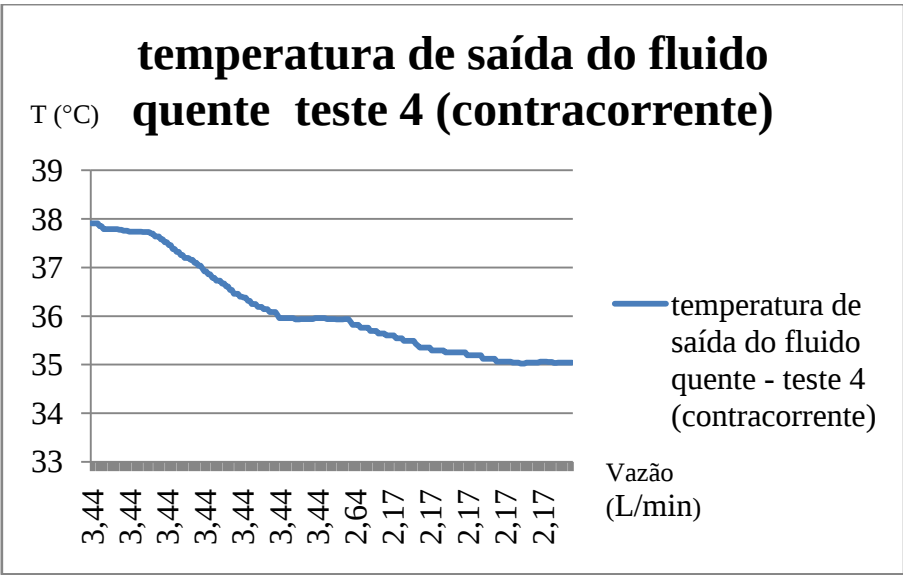
saída dos fluidos em função da vazão, a vazão do fluido quente foi alterada para um valor menor (2,17L/min), enquanto a vazão do fluido frio permaneceu constante, os resultados das temperaturas de saída dos fluidos encontram-se na tabela 5. O Comportamento das temperaturas de saída em função da vazão do fluido frio e quente, podem ser verificadas nos gráficos 7 e gráfico 8 respectivamente.

Gráfico 7: Teste 4 – Fluido frio



Fonte: Autor.

Gráfico 8: Teste 4 – Fluido quente



Fonte: Autor.

5.5 ANÁLISE DOS TESTES

Para análise do trocador de calor foram realizados quatro testes, dois testes em escoamento paralelo e dois em contracorrente. Foi utilizado a taxa de transferência de calor do fluido quente para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, pois o fluido frio que passa no casco perde muito calor para o ambiente por convecção. A área (A_s) utilizada para os cálculos foi a área lateral externa de doze tubos de alumínio de 12,7mm de diâmetro externo e um metro de comprimento cada. As variáveis obtidas para ambos os tipos de escoamento encontram-se nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Variáveis do escoamento paralelo

Escoamento paralelo						
Teste	Fluido frio (L/min)	Fluido Quente (L/min)	$\dot{Q}$ - frio W	$\dot{Q}$ - quente W	U W/m².°C	As m²
1	3,32	3,48	578,371	1328,889	157,808	0,9575
1	0,55	3,48	226,834	1224,614	199,847	0,9575
2	1,74	3,48	383,146	974,841	132,965	0,9575
2	1,12	3,48	295,011	909,367	128,206	0,9575

Fonte: Autor.

Tabela 7. Variáveis do escoamento contracorrente

Escoamento Contracorrente						
Teste	Fluido frio (L/min)	Fluido Quente (L/min)	$\dot{Q}$ - frio W	$\dot{Q}$ - quente W	U W/m².°C	As m²
3	3,27	3,44	742,838	1433,469	169,929	0,9575
3	0,64	3,44	297,91	1308,82	184,3873	0,9575
4	1,09	3,44	256,727	973,225	130,4956	0,9575
4	1,09	2,17	227,105	748,503	100,364	0,9575

Fonte: Autor.

De acordo com as tabelas 6 e 7, nos testes 1,2,3 e 4 é importante observar que a taxa de transferência de calor do fluido quente é muito maior que a do fluido frio, essa diferença não deveria ser tão elevada de acordo com as literaturas, mas provavelmente esse fato é proveniente da perda de calor do fluido frio por convecção para o ambiente, já que o casco não possui sistema de isolamento térmico.

As mudanças de vazões do fluido frio ou do fluido quente contribui diretamente nas suas respectivas temperaturas de saída, porém ocasiona pequena variação na temperatura do fluido que ficou com a vazão constante. Nos testes 1,2 e 3, por mais que a taxa de transferência de calor seja proporcional a vazão, o fluido frio tem um aumento da temperatura de saída ao diminuir sua vazão, isso se deve ao fato do fluido frio ficar mais tempo no casco trocando calor com o fluido quente em um maior intervalo de tempo, aumentando assim sua temperatura de saída.

Do mesmo modo no teste 4, em que a vazão do fluido quente é reduzida, a sua temperatura de saída também diminui, pois, o fluido quente troca calor em um maior intervalo de tempo com o fluido frio do casco, diminuindo assim sua temperatura de entrada.

Os comportamentos das temperaturas de saída dos fluidos para ambos regimes de escoamentos verificados nos gráficos 1 ao 8 assemelham aos encontrados nas literaturas.

Para condições de operação bem próximas (vazão e temperatura de entrada), foi possível verificar através das Tabelas 4 e 5 que os fluidos sofrem maior variação de suas temperaturas no regime contracorrente, fato também comprovado pelas literaturas. Dessa forma, a eficiência em regime em contracorrente é maior em relação ao regime paralelo.

Através das tabelas 6 e 7, em condições de operação bem próximas (vazão e temperatura de entrada), foi possível verificar que os valores de coeficiente global de transferência de calor são bem próximos para os dois tipos de escoamento, paralelo e contracorrente, ou seja, o tipo de regime de escoamento não influencia no valor desse coeficiente, resultado esperado de acordo com as literaturas.

6. CONCLUSÕES

A partir do trocador de calor de bancada construído, conseguiu-se verificar a eficiência do trocador em dois tipos de fluxos, sendo o regime contracorrente mais eficiente em relação ao paralelo, pois as variações das temperaturas dos fluidos foram maiores para condições de operações bem próxima, e demonstrar alguns dos principais componentes que constituem os trocadores de calor do tipo casco e tubo.

Conseguiu-se verificar a variação das temperaturas de saída dos fluidos, quente e frio, para as duas configurações de escoamento (paralelo e contracorrente) para diferentes vazões.

Com o auxílio do Arduíno juntamente com seus sensores de temperatura e vazão, foi possível adquirir dados para geração de gráficos, facilitando a análise do comportamento das temperaturas de saída dos fluidos.

De maneira geral, exceto o tubo de Acrílico para uma melhor visualização, os materiais utilizados para esse trabalho foram baratos e de fácil manuseio, como por exemplo: tubo pvc, mangueira de plástico, bomba de aquário, arduíno e seus sensores, cola e etc.

Após realização dos testes, o trocador de calor não possuiu avarias para seu correto funcionamento, sendo assim, um equipamento que ficará disponível para os alunos da Uacsa realizarem testes em diferentes condições de operação.

7. SUGESTÕES E MELHORIAS

- Utilizar válvulas solenóides para controle da vazão nos lugares das válvulas manuais, pois possuem uma maior precisão;
- Posicionar os sensores de temperatura na tubulação de entrada e saída, para obtenção de valores mais próximos do real;
- Construção de uma bancada didática para utilização do trocador de calor construído;
- Construção de um vente no casco do trocador de calor para despressurizarão do ar no interior do casco, visando facilitar seu preenchimento com fluido.
- Reutilização de toda água utilizada nos testes, evitando desperdício.
- Melhorias na instrumentação de todo projeto;
- Construção de outro tipo de trocador de calor para comparar as suas eficiências;
- Utilização de tubos de cobre para comparação das trocas térmicas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBUENO BICCA, G. Modelagem Hierárquica de Trocadores de Calor Casco e Tubo. 2006.
- CARVALHO, P. R. F. Física aplicada, termometria, calometria e transmissão de calor, 2002.
- ÇENGEL, YUNUS A; BOLES, M. A. Termodinâmica - Cengel 7th.pdf, 2013.
- ÇENGEL, YUNUS A; GHAJAR, A. J. Livro Transferência de Calor-Çengel (4ª edição).pdf, 2012.
- CENGEL, Y. A. A Practical Approach. second ed.
- CHEN, Q. Entransy dissipation-based thermal resistance method for heat exchanger performance design and optimization. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 60, n. 1, p. 156–162, 2013.
- COSTA, A. L. H.; QUEIROZ, E. M. Design optimization of shell-and-tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering, v. 28, n. 14–15, p. 1798–1805, 2008.
- FIORENTIN, L. D. Estudo de modelos matemáticos para previsão da incrustação por coque em tubulações. 2004.
- FRANK KREITH; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. Principios de Transferencia de Calor.
- GUO, Z. Y. et al. Effectiveness-thermal resistance method for heat exchanger design and analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 53, n. 13–14, p. 2877–2884, 2010.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa Water, 2008. Disponível em:
http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=6008324
- KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design, Third Edition. v. 6
- MADI, M. Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo. 2005.
- PATEL, V. K.; RAO, R. V. Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique. Applied Thermal Engineering, v. 30, n. 11–12, p. 1417–1425, 2010.
- PERUSSI, R. Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica . Área de Co. 2010.
- VALLE, R. O. DO. determinação da taxa de incrustação em trocadores de calor com o auxílio de métodos de otimização. 2012.
- VIANA, A. modelagem matemática de trocadores de calor tipo casco e tubos. 2014.

ANEXO A - Relações de efetividade para trocadores de calor

Figura A1: relações de efetividade para trocadores de calor

Effectiveness relations for heat exchangers: $NTU = UA_s/C_{\min}$ and $c = C_{\min}/C_{\max} = (\dot{m}C_p)_{\min}/(\dot{m}C_p)_{\max}$ (Kays and London, Ref. 5.)

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 <i>Double pipe:</i>	
Parallel-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$
2 <i>Shell and tube:</i>	
One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU\sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i>	
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$
$C_{\max}$ mixed, $C_{\min}$ unmixed	$\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp \{1 - c[1 - \exp(-NTU)]\})$
$C_{\min}$ mixed, $C_{\max}$ unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 <i>All heat exchangers with $c = 0$</i>	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Fonte: Cengel(2002).

ANEXO B - Fluxograma do trocador de calor

Figura B1: Fluxograma do trocador de calor

