

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

WILLIAM CORREIA GUSMÃO

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE TROCADORES DE CALOR NO
LABORATÓRIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DA FACULDADE DE ENGENHARIA**

Guaratinguetá
2013

WILLIAM CORREIA GUSMÃO

Comparação da eficiência térmica de trocadores de calor no laboratório de sistemas térmicos da faculdade de engenharia

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá
2013

G982c Gusmão, William Correia
Comparação da eficiência térmica de trocadores de calor no laboratório de sistemas térmicos da Faculdade de Engenharia / William Correia
Gusmão – Guaratinguetá : [s.n], 2013.
97 f : il.
Bibliografia: f. 80-81

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

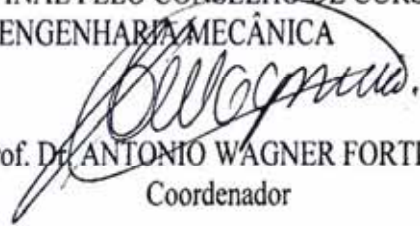
1. Calor – transmissão I. Título

CDU 536.24

WILLIAM CORREIA GUSMÃO

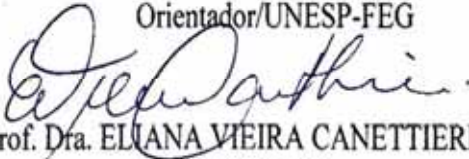
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dra. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG

Dezembro de 2013

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e aos meus pais que sempre foram os pilares da minha educação, me incentivando e me apoiando em meus projetos de vida.

à minha irmã, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho pela ajuda, apoio e orientação neste trabalho.

à todos os meus irmãos de república e amigos pessoais que contribuíram de certa forma para meu crescimento.

à república Casa do Cai Alho, meu amado lar na cidade de Guaratinguetá.

à UNESP-FEG, de forma geral que me proporcionou muitas oportunidades ao longo dos anos.

GUSMÃO, W. C. Comparação da eficiência térmica de trocadores de calor no laboratório de sistemas térmicos da faculdade de engenharia. 2013. 97 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo verificar e comparar a eficiência dos trocadores de calor utilizados no laboratório de sistemas térmicos da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - UNESP. Basicamente foram estudados dois tipos de trocadores de calor: tipo placas, operando em fluxo paralelo e em contra fluxo, e o tipo casco e tubo também operando em fluxo paralelo e em contra fluxo. Inicialmente são apresentados os equipamentos didáticos e os procedimentos para utilização destes trocadores de calor nos experimentos propostos. Com os resultados obtidos nos experimentos foram realizadas comparações a fim de se definir o comportamento desses trocadores de calor para as diferentes variáveis. Com o estudo, chega-se a conclusão de que os resultados do trocador de calor do tipo casco e tubo, utilizado no laboratório de sistema térmicos, são superiores em todas as condições analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Trocador de calor. Casco e Tubo. Placas. Eficiência. Equipamento didático.

GUSMAO, W. C. **Comparison of the thermal efficiency of heat exchangers in the laboratory of thermal systems engineering college**. 2013. 97 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This work aims to verify and compare the efficiency of heat exchangers used in the thermal systems laboratory at Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá - UNESP. Basically, it has been studied two types of heat exchangers: plate type, operating in parallel flow and counter-flow, shell and tube type and also operating in parallel flow and counter flow. Initially it has been presented the didactic equipment and procedures for use of these heat exchangers in the proposed experiments. With the results obtained from the experiments, comparisons were made in order to define the behavior of the heat exchangers regarding some variables. In the study, one comes to the conclusion that the results from shell and tube type of heat exchanger, used in the thermal systems lab, are superior in all conditions analyzed.

KEYWORDS: Heat exchanger. Shell and tube. Plates. Efficiency. Teaching equipment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trocador de calor de tubo duplo	15
Figura 2 - Esquema de um trocador de calor multitubular	16
Figura 3 - Trocador de calor de placas com gaxeta.....	18
Figura 4 - Partes principais do trocador de calor tipo placa	19
Figura 5 - Fluxograma de projeto de um trocador de calor	22
Figura 6 - Parede plana.....	25
Figura 7 - Parede cilíndrica	26
Figura 8 - Distribuição de temperatura em um condensador de passe único	28
Figura 9 - Distribuição de temperatura em um evaporador de passe único	28
Figura 10 - Distribuição de temperatura num trocador de calor de correntes paralelas.....	29
Figura 11 - Distribuição de temperatura num trocador de calor de correntes contrárias	29
Figura 12 - Fator de correção para trocadores de calor casco e tubo, com um passe no casco e qualquer número par de passes nos tubos	35
Figura 13 - Fator de correção para trocadores de calor casco e tubo, com um passe no casco e qualquer número par de passes nos tubos	36
Figura 14 - Módulo de Serviço (TD360) e um trocador de calor opcional (TD360c)	38
Figura 15 - Válvula de Controle de Vazão do Circuito Frio	39
Figura 16 - Painel frontal do Módulo de Serviço	40
Figura 17 - Válvula de Controle de Vazão do Circuito Quente	41
Figura 18 - O Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c).....	43
Figura 19 - Resultados de vazão máxima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas	66
Figura 20 - Resultados de vazão mínima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas	67
Figura 21 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas.....	68
Figura 22 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas.....	68
Figura 23 - Resultados de vazão máxima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo	69

Figura 24 - Resultados de vazão mínima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo	69
Figura 25 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo	70
Figura 26 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo	71
Figura 27 - Resultados de temperatura mais baixa no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas	72
Figura 28 - Resultados de temperatura mais alta no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas	72
Figura 29 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas.....	73
Figura 30 - Resultados gerais do Contra Fluxo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas.....	74
Figura 31 - Resultados de temperatura mais baixa no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo.....	74
Figura 32 - Resultados de temperatura mais alta no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo.....	75
Figura 33 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo	76
Figura 34 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo	76
Figura 35 - A Diferença entre o Fluxo Paralelo e o Contra Fluxo	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Notações	44
Tabela 2 - Variação da vazão de água fria no trocador de calor de casco e tubo - Fluxo Paralelo.....	52
Tabela 3 - Variação da vazão de água fria no trocador de calor de casco e tubo - Contra fluxo	54
Tabela 4 - Variação da vazão de água fria no trocador de placas - Vazão Paralela.....	56
Tabela 5 - Variação da vazão de água fria no trocador de placas - Contra fluxo.....	57
Tabela 6 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de casco e tubo - Fluxo Paralelo	60
Tabela 7 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de casco e tubo - Contra fluxo	62
Tabela 8 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de placas - Vazão Paralela	64
Tabela 9 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de placas - Contra Fluxo	65
Tabela 10 - Resultados gerais para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas.....	67
Tabela 11 - Resultados gerais para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo....	70
Tabela 12 - Resultados gerais para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas.....	73
Tabela 13 - Resultados gerais para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	TROCADORES DE CALOR	13
2.1.1	Recuperadores e regeneradores	13
2.1.2	Processo de transferência de calor	14
2.1.3	Tipo de construção dos trocadores de calor	14
2.1.3.1	Trocadores de calor tubular	14
2.1.3.2	Trocadores de calor de placas	17
2.1.4	Configuração do escoamento	19
2.2	SELEÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR	20
2.3	PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR	20
3	DIMENSIONAMENTO DOS TROCADORES DE CALOR	23
3.1	BALANÇO DE ENERGIA	23
3.2	COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	24
3.3	MÉDIA LOGARÍTMICA DAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURA	27
3.4	DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR	32
3.4.1	Definição da localização dos fluidos	32
3.4.2	Fator de correção do MLDT (F)	34
4	METODOLOGIA	37
4.1	DESCRIÇÃO	38
4.1.1	O Módulo de serviço (TD360)	38
4.1.2	Trocador de calor por placas (TD360b)	41
4.1.3	Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c)	42
4.2	NOTAÇÃO, EQUAÇÕES ÚTEIS E TEORIA	43
4.2.1	Equações úteis	44

4.2.2	Transferência de calor, Equilíbrio de energia e Eficiências.....	46
4.3	EXPERIMENTOS.....	48
4.3.1	Procedimento para montar um Trocador de calor na bancada	49
4.3.2	Experimento 1.....	50
4.3.3	Experimento 2.....	58
4.4	RESULTADOS	66
4.4.1	Experimento 1 - O efeito da variação da vazão	66
4.4.2	Experimento 2 - O efeito da variação da temperatura	72
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	77
6	CONCLUSÕES	79
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
8	ANEXOS.	82

1 INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são amplamente utilizados nas indústrias, por isso conhecer sua eficiência térmica é fundamental para qualquer projeto de engenharia que envolva a seleção desses equipamentos. Os modelos didáticos de trocadores de calor utilizados no laboratório da faculdade precisam ser avaliados para que possam passar conhecimento aos alunos do curso de engenharia, por essa razão neste trabalho será realizado o estudo da eficiência térmica de trocadores de calor do tipo casco e tubo e do tipo placas operando com água nas instalações do laboratório de sistemas térmicos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. O objetivo principal desse estudo é comparar a eficiência térmica dos trocadores de calor do tipo casco e tubo e do tipo placas em diferentes regimes de operação e verificar se os resultados estão de acordo com o que é esperado.

No capítulo 2 serão apresentados conceitos sobre trocadores de calor, como sua classificação, os tipos de construção, regime de fluxo. No capítulo 3 considerações para seleção e projeto. No capítulo 4 são apresentados os equipamentos didáticos utilizados no laboratório juntamente com seus procedimentos e particularidades de operação devido à realidade da faculdade. No capítulo 5 é feita a análise comparativa dos resultados obtidos. Por fim, o capítulo 6 expressa as conclusões sobre o presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TROCADORES DE CALOR

Um trocador de calor é um equipamento usado para implementar a troca de calor entre dois ou mais fluidos que se encontram em temperaturas diferentes. Os trocadores de calor podem ser usados em diferentes aplicações, por exemplo, no condicionamento de ar, na recuperação de calor em processos, em indústrias alimentícias, indústrias químicas, em processos de aciaria e na produção de energia.

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios (KAKAÇ, 2002):

- Recuperadores ou regeneradores;
- Processo de transferência: contato direto e contato indireto;
- Tipo de construção: tubulares, placas e superfícies estendidas;
- Mecanismo de troca de calor: única fase e duas fases;
- Configuração do escoamento: paralelo, contrário e cruzado.

2.1.1 Recuperadores e regeneradores

Recuperadores são um tipo de trocador com transferência de calor entre dois fluidos, um fluido que seguirá para um processo passa por esse trocador de calor e retira (recupera) calor de outro fluido que já está com temperatura superior, essa troca acontece através de uma parede que os separam.

Nos regeneradores a passagem do fluxo é compartilhada pelos dois fluidos, mas alternadamente. Por exemplo, o fluido quente se move e armazena energia térmica na matriz durante sua passagem e quando o fluido frio passa, posteriormente, este calor armazenado é transferido da matriz para ele. Além disso, os regeneradores são frequentemente utilizados na troca térmica entre gases (INCROPERA, 2008).

2.1.2 Processo de transferência de calor

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

- Contato indireto: neste tipo de trocador de calor os fluidos não se misturam, percorrem caminhos diferentes e há um fluxo contínuo de calor do fluido quente ao frio através de uma parede que os separa.

- Contato direto: neste tipo de trocador de calor os fluidos se misturam, normalmente são utilizados em aplicações que envolvem transferência de calor e de massa, mas só podem ser aplicados nos casos em que o contato direto entre os fluidos não resulta em problemas. Em comparação com os trocadores de calor do tipo de contato indireto, as taxas de transferência de calor alcançadas pelo de contato direto são muito superiores.

2.1.3 Tipo de construção dos trocadores de calor

Os principais tipos de trocadores de calor são: tubular, de placas e de superfície estendida. Podem ser detalhados em termos de suas características de construção, como mostrado a seguir.

2.1.3.1 Trocadores de calor tubular

Trocadores de calor tubular são construídos a partir de tubos circulares. Nesses trocadores, um fluxo percorre o interior dos tubos e o outro fluxo passa pelo lado de fora dos tubos. Características como: diâmetro dos tubos, número de tubos, comprimento, distância entre os tubos e o arranjo destes tubos, podem ser mudadas neste trocador de calor. Assim, este tipo de trocador possui uma considerável flexibilidade de projetos.

Os trocadores de calor do tipo tubular podem ser classificados como (KAKAÇ, 2002):

- Trocador de calor de tubo duplo

- Trocador de calor casco e tubo
- Trocador de calor tipo serpentina

a. Trocador de calor de tubo duplo

Normalmente, um trocador de calor de tubo duplo consiste de um tubo concêntrico dentro de outro tubo de maior diâmetro, de forma que um fluxo com certa temperatura possa fluir por dentro do tubo de menor diâmetro e o outro fluxo, com temperatura diferente, passe pelo tubo de maior diâmetro. Este trocador de calor é principalmente usado em processos que necessitem de sensível aquecimento ou resfriamento, onde pequenas áreas são requeridas (até 50 m²) e também quando um ou ambos os fluidos encontram-se em altas pressões. As principais desvantagens do trocador de calor de tubo duplo são seu custo e tamanho elevados em relação a outros tipos de trocadores de calor. Um único tubo ou vários tubos podem ser usados internamente, como ilustra a Figura 1. Podem-se usar tubos aletados no caso do coeficiente de troca de calor do tubo interno ser pequeno.

Figura 1 - Trocador de calor de tubo duplo



Fonte: (KAKAÇ, 2002).

b. Trocador de calor tipo casco e tubo

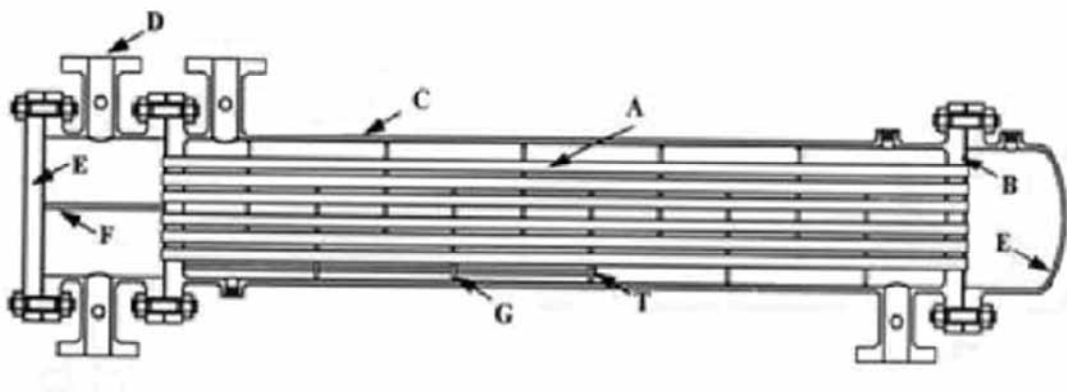
A construção desse trocador de calor consiste em tubos montados dentro de grandes carcaças cilíndricas. Entre a carcaça e os tubos passa um fluido e outro fluido passa por dentro dos tubos. Existe uma gama de possibilidades de tipos construtivos destes trocadores de calor, dependendo do desempenho, da transferência de calor desejada, da perda de carga e dos métodos usados para reduzir tensões térmicas, prevenir vazamentos, facilitar a limpeza, suportar altas temperaturas e pressões elevadas e também suportar diferentes situações de corrosão. Geralmente eles são utilizados como pré-aquecedores em usinas, resfriadores de óleo e em várias aplicações de processos industriais.

São trocadores de calor robustos e utilizados em condições operacionais de temperatura e pressão altas, atmosfera altamente corrosiva, multicomponentes, fluidos muito viscosos, misturas e outras.

Trocadores de calor do tipo casco e tubo fornecem taxas relativamente grandes de transferência de calor.

A Figura 2 apresenta o esquema de um trocador de calor multitubular com seus respectivos componentes construtivos.

Figura 2 - Esquema de um trocador de calor multitubular



Fonte: (ESTEVES, 2009).

A - Tubos: Componentes básicos, onde ocorre a troca de calor entre os fluidos interno e externo;

B - Espelhos: Elementos de fixação das extremidades dos tubos do trocador de calor;

C - Casco: Componente por onde circulará o outro fluido, ela é que define o diâmetro das chicanas. É dentro do casco que estão os feixes de tubos, as chicanas e os tirantes;

D - Bocais do casco: Elemento que dá acesso ao fluido passar para o interior do trocador de calor;

E - Cabeçotes: Controla e orienta o escoamento no feixe de tubos;

F - Chicanas longitudinais - Promove a multiplicidade de passagens das correntes dos fluidos no trocador;

G - Chicanas: dão sustentação ao feixe de tubos, diminuem os efeitos das vibrações e auxiliam no aumento de troca térmica.

c. Trocador de calor tipo serpentina

Uma ou mais bobinas organizadas em forma de espiral (serpentina) em uma carcaça formam este tipo de trocador de calor. Um tubo em espiral resulta em uma transferência de calor mais alta em comparação a um tubo reto. Possui a vantagem de poder acomodar uma grande superfície de troca de calor em um espaço pequeno. São apropriados para expansão térmica.

2.1.3.2 Trocadores de calor de placas

Estes são construídos a partir de placas finas que formam canais de escoamento, a troca térmica acontece nessas finas chapas metálicas. Os fluidos são separados por estas placas (que podem ser lisas ou onduladas) que formam um canal entre as aletas. Segundo a classificação dos trocadores de calor de placas, eles podem ser em espiral, lamela e trocador de calor a placas com gaxeta (normalmente designados pela sigla PHE - plate heat exchanger). Os trocadores têm como uma característica comum as placas paralelas que formam canais para o escoamento alternado dos fluidos.

A Figura 3 apresenta um modelo de trocador de calor de placas com gaxeta da fabricante Alfa Laval.

Figura 3 - Trocador de calor de placas com gaxeta



Fonte: (ALFA LAVAL, 2012).

Atualmente os trocadores de calor tipo placa com gaxeta são muito empregados em processos que exijam alta eficiência e flexibilidade, com temperaturas inferiores a 250 °C e pressões menores que 25 bar (KAÇAK, 2002).

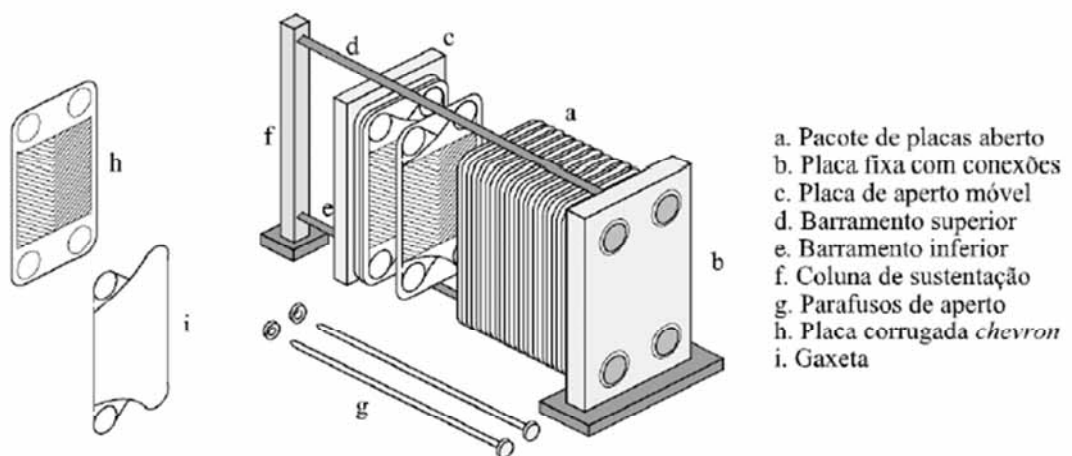
Em comparação aos trocadores de casco e tubo, os trocadores de calor de placas são bastante compactos e dessa forma, exigem pouco espaço físico para instalação, eles também são adaptáveis ao possibilitar que sejam retiradas ou incluídas placas dependendo da demanda térmica. Essa facilidade de montar e desmontar as placas do trocador proporciona uma melhor

limpeza e manutenção. São diversas as aplicações deste tipo de trocador de calor, por exemplo, resfriamento de óleo de turbinas a vapor, resfriamento da água de geradores ou de plantas nucleares e resfriamento de banhos de acabamento de metais e também em processos de regeneração de calor (GUT, 2003).

A distinção dos trocadores de calor tipo placa com gaxeta consiste no pacote de placas corrugadas agrupadas e comprimidas em um pedestal de aço carbono. A vedação é feita por gaxetas e os orifícios de passagem nos quatro cantos forma uma sequencia de canais por onde o fluido quente e frio passam alternadamente.

A Figura 4 mostra os principais componentes de um trocador de calor de placas com gaxetas.

Figura 4 - Partes principais do trocador de calor tipo placa



Fonte: (GUT, 2003).

2.1.4 Configuração do escoamento

Os trocadores de calor também podem ser classificados de acordo com o caminho do fluxo dos fluidos através do trocador de calor. As três configurações básicas são:

- Fluxo paralelo

- Fluxo contrário ou contracorrente
- Fluxo cruzado

No caso do fluxo paralelo os fluidos entram e fluem na mesma direção e sentido. Em trocadores de calor de fluxo contrário, os dois fluxos fluem na mesma direção, mas em sentidos diferentes. O fluxo cruzado consiste em um dos fluidos escoando em um sentido, enquanto o outro flui formando um ângulo de 90° com este, na superfície de transferência de calor.

2.2 SELEÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Segundo Kaçak (2002), os critérios básicos para seleção de um trocador de calor são:

- O trocador de calor deve atender as especificações do processo, e deve estar apto ao uso até a próxima parada programada para manutenção;
- O trocador de calor deve suportar as condições de serviço do local, deve também resistir à corrosão dos fluxos que por ele passaram bem como a do meio ambiente onde será exposto. O trocador de calor deve também resistir às incrustações;
- O trocador de calor deve ser de fácil manutenção, o que implica na escolha de uma configuração e posicionamento que facilite a limpeza ou a substituição de algum componente;
- O trocador de calor deve também possuir bom custo benefício. Os custos de instalação, de operação e de manutenção, incluindo as perdas de produção devido à eventual indisponibilidade do trocador de calor devem ser calculados e o trocador de calor deve custar o mínimo possível.

2.3 PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR

As demandas do processo são a prioridade do projeto, portanto o trocador de calor deve primeiramente, atender a todas essas demandas. Deve-se definir o problema com todas as variáveis detalhadas, pressões operacionais, a vazão dos fluidos, perda de carga, temperaturas,

dimensões. Algumas restrições do projeto também devem ser respeitadas como, duração, custos e tipos de materiais.

O tipo do trocador de calor, juntamente com o tipo de fluxo, a geometria e os materiais adequados serão baseados nessas especificações do projeto.

Os problemas do projeto de trocadores de calor depararam com duas linhas, a de dimensionamento (elaboração de um projeto novo) ou a de avaliação de um trocador já existente (análise de desempenho).

Para o dimensionamento são definidas as dimensões do trocador e a área da superfície de troca de calor. As variáveis para um problema de dimensionamento são: vazão dos fluidos, temperaturas de entrada e saída, propriedades termofísicas dos fluidos e materiais, restrições de perda de carga, geometria da superfície.

No caso da avaliação de desempenho, o trocador de calor já existe ou a configuração do trocador de calor é selecionada por dimensionamento aproximado. Assim, serão realizados os cálculos das variáveis de operação e depois serão analisados para se verificar se o desempenho térmico é aceitável e a configuração do trocador de calor se mostra uma solução correta. O quesito econômico (melhor custo x benefício) normalmente é utilizado ao se deparar com mais de um tipo de configuração que atende os requisitos do projeto adequadamente, mas outros critérios também podem ser considerados para se chegar a uma escolha.

O fluxograma para o projeto de um trocador de calor pode ser observado na Figura 5

Figura 5 - Fluxograma de projeto de um trocador de calor



Fonte: (FELÍCIO, 2012).

3 DIMENSIONAMENTO DOS TROCADORES DE CALOR

3.1 BALANÇO DE ENERGIA

Pode-se escrever o balanço de energia para sistemas abertos da seguinte forma:

$$\Delta E = Q + W - \Delta(H + Ec + Ep) \quad (1)$$

Sendo E a energia total, Q o calor transferido, W o trabalho mecânico ou elétrico realizado, H a entalpia, Ec a energia cinética e Ep a energia potencial.

Se for considerado um estado estacionário na operação do trocador de calor, não haverá trabalho realizado, as energias potencial e cinética podem ser desprezadas e não há armazenamento de energia, assim para cada corrente no trocador a equação (1) se reduz a:

$$q = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \quad (2)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido em circulação, h_1 e h_2 as entalpias por unidade de massa dos fluxos na entrada e na saída, respectivamente.

As trocas de calor que possam ocorrer entre o ambiente e o equipamento trocador de calor podem ser desprezadas, já que essa quantidade de troca é pequena em comparação com as trocas entre os fluidos. A partir desta suposição, pode se assumir que o calor que um fluido sede é igual ao calor recebido pelo outro fluido.

Para o fluido quente, onde a vazão mássica é representada por \dot{m}_q , as temperaturas de entrada e saída por T_{q1} e T_{q2} e as entalpias h_{q1} e h_{q2} temos:

$$q_q = \dot{m}_q \times (h_{q2} - h_{q1}) \quad (3)$$

Para o fluido frio, onde a vazão mássica é representada por \dot{m}_f , as temperaturas de entrada e saída por T_{f1} e T_{f2} e as entalpias h_{f1} e h_{f2} temos:

$$q_f = \dot{m}_f \times (h_{f2} - h_{f1}) \quad (4)$$

Como o fluido frio recebe o calor do fluido quente temos:

$$q_f = -q_q \quad (5)$$

$$\dot{m}_f \times (h_{f2} - h_{f1}) = \dot{m}_q \times (h_{q2} - h_{q1}) \quad (6)$$

Não havendo mudança de fase em nenhum dos fluidos, apenas calor sensível será trocado, portanto as equações 3 e 4 podem ser escritas como:

$$\dot{m}_f \times C_p \times (T_{f2} - T_{f1}) = \dot{m}_q \times C_p \times (T_{q2} - T_{q1}) \quad (7)$$

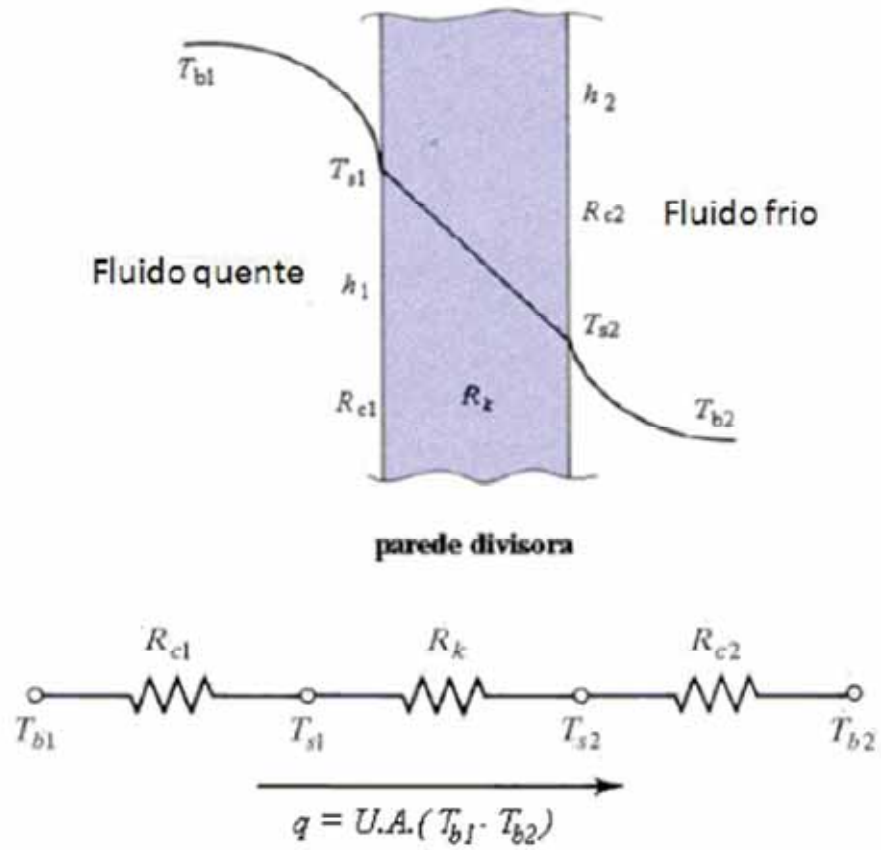
3.2 COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A determinação do coeficiente global de transferência de calor é fundamental na análise ou seleção de um trocador de calor. O coeficiente está relacionado à resistência térmica total existente na transferência de calor.

Este coeficiente é determinado em função das resistências convectivas e condutivas entre fluidos separados por algum material.

Por exemplo, no caso de paredes planas, ilustrado na Figura 6, tem-se:

Figura 6 - Parede plana



Fonte: (INCROPERA, 2008).

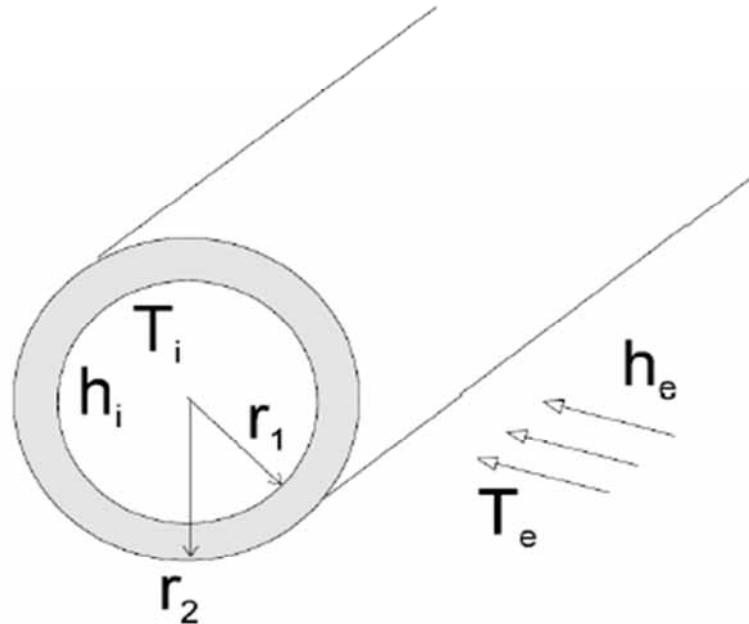
Então, para este circuito, temos:

$$q = U \times A \times (T_{b1} - T_{b2}) \quad (8)$$

Onde T_b indica a temperatura média de mistura de cada um dos fluidos.

Demonstra-se na figura 7 o caso das paredes cilíndricas:

Figura 7 - Parede cilíndrica



Fonte: (INCROPERA, 2008).

$$q = \frac{(\Delta T)_{total}}{R_t} = \frac{(\Delta T)_{total}}{\frac{1}{h_i \times A_i} + R_{cond} + \frac{1}{h_e \times A_e}} \quad (9)$$

Sendo:

$(\Delta T)_{total}$ = diferença de temperatura entre os fluidos

h_i, h_e = coeficientes de película dos fluidos interno e externo.

A_i, A_e = áreas superficiais internas e externas dos tubos.

R_{cond} = resistência térmica a condução nos tubos

Se for desprezada a resistência térmica por condução na parede fina de metal dos tubos de um trocador de calor, a equação 9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q = \frac{A_e \times (\Delta T)_{total}}{\frac{A_e}{h_i \times A_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (10)$$

As áreas superficiais interna e externa dos tubos são praticamente iguais ($A_e = A_i$), além disso com o objetivo de facilitar a troca térmica, são utilizadas paredes finas nos tubos metálicos, logo ($r_e \sim r_i$) resultando em:

$$q = \frac{A_e \times (\Delta T)_{total}}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (11)$$

O coeficiente global de transferência de calor é definido como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (12)$$

Combinando as equações 11 e 12 temos então:

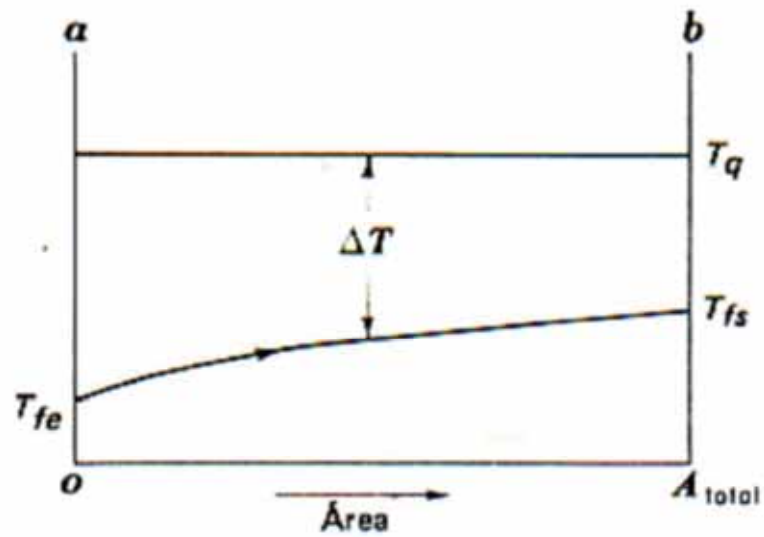
$$q = U \times A \times (\Delta T)_{total} \quad (13)$$

3.3 MÉDIA LOGARÍTMICA DAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURA

As temperaturas dos fluidos no interior de um trocador de calor variam em função da posição no trocador de calor.

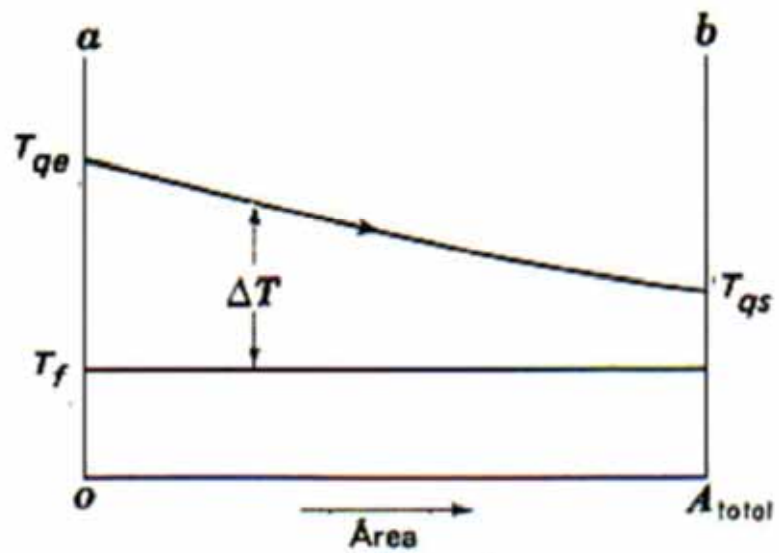
As Figuras 8, 9, 10 e 11, ilustram como pode ocorrer a variação de temperatura no interior de um trocador de calor simples.

Figura 8 - Distribuição de temperatura em um condensador de passe único



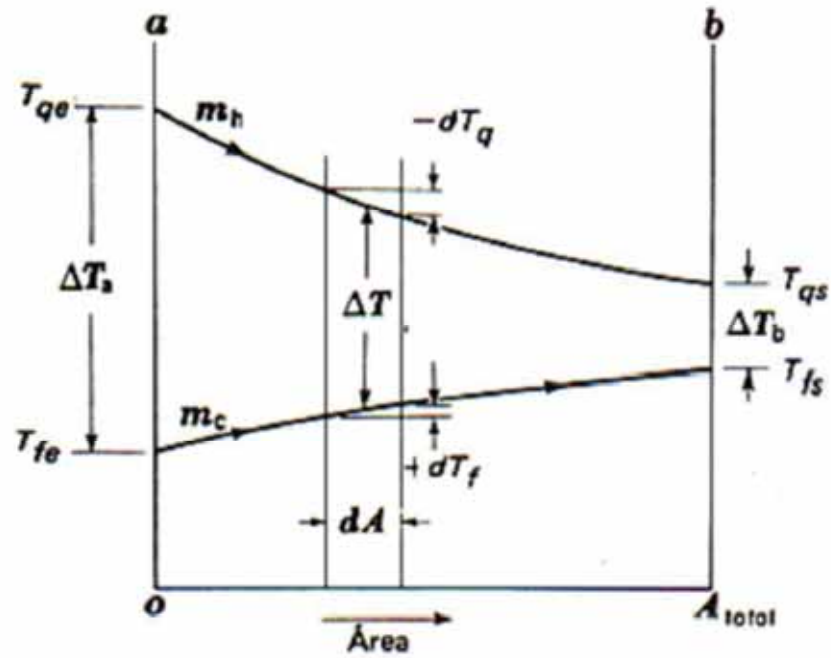
Fonte: (INCROPERA, 2008).

Figura 9 - Distribuição de temperatura em um evaporador de passe único



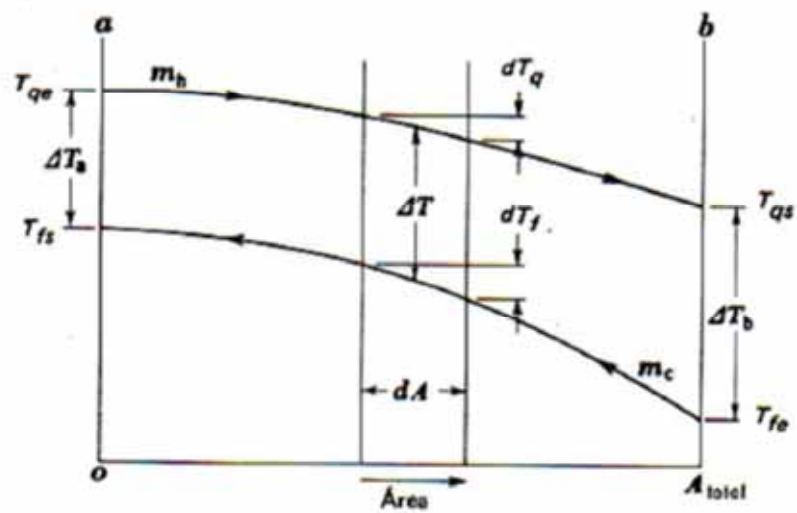
Fonte: (INCROPERA, 2008).

Figura 10 - Distribuição de temperatura num trocador de calor de correntes paralelas



Fonte: (INCROPERA, 2008).

Figura 11 - Distribuição de temperatura num trocador de calor de correntes contrárias



Fonte: (INCROPERA, 2008).

No estado estacionário, para uma seção diferencial do trocador de calor, o balanço de energia pode ser representado por:

$$dq = U\Delta_t A \quad (14)$$

Deve-se integrar a equação 14 sobre a área de transferência de calor (A) e ao longo de todo comprimento do trocador de calor, para se determinar a quantidade de calor transferido por unidade de tempo.

Considerando constante o coeficiente global de transferência de calor U, desprezando a troca de calor com o ambiente e as variações de energia cinética, a equação 14 pode ser integrada para os casos de correntes paralelas e contra corrente, obtendo-se:

$$dq = -\dot{m}_f \times C_p \times dT_f = \dot{m}_q \times C_p \times dT_q = U dA (T_q - T_f) \quad (15)$$

Considerando,

$$C_q = \dot{m}_q \times C_p = \text{Capacidade térmica do fluido quente}$$

$$C_f = \dot{m}_f \times C_p = \text{Capacidade térmica do fluido frio}$$

Substituindo na equação 7, temos:

$$T_{q2} = T_{q1} - \frac{C_f}{C_q} \times (T_{f2} - T_{f1}) \quad (16)$$

De onde se obtém:

$$T_{q2} - T_{f2} = - \left(1 + \frac{C_f}{C_q} \right) \times T_{f2} + \frac{C_f}{C_q} \times T_{f1} + T_{q1} \quad (17)$$

Substituindo na equação 15 o valor de $T_q - T_f$ da equação 17, obtém-se:

$$\frac{dT_{f2}}{- \left[1 + \left(\frac{C_f}{C_q} \right) \right] \times T_{f2} + \left(\frac{C_f}{C_q} \right) \times T_{f1} + T_{q1}} = \frac{U dA}{C_f} \quad (18)$$

Integrando a equação 18, tem-se:

$$\ln \left[\frac{\left(1 + \frac{C_f}{C_q}\right) \times (T_{f1} - T_{f2}) + T_{q1} - T_{f1}}{T_{q1} - T_{f1}} \right] = - \left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_q} \right) \times U \times A \quad (19)$$

Como:

$$\frac{C_f}{C_q} = - \frac{T_{q2} - T_{q1}}{T_{f2} - T_{f1}} \quad (20)$$

Obtém-se a equação 19:

$$\ln \left(\frac{T_{q2} - T_{f2}}{T_{q1} - T_{f1}} \right) = [(T_{q2} - T_{f2}) - (T_{q1} - T_{f1})] \times \frac{U \times A}{q} \quad (21)$$

Pois

$$q = C_f \times (T_{f2} - T_{f1}) = C_q \times (T_{q1} - T_{q2})$$

Fazendo $T_q - T_f = \Delta T$, a equação 19 pode ser reescrita como:

$$q = U \times A \times \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (22)$$

Onde os índices a e b se referem às extremidades do trocador de calor, conforme figura 10 e 11.

Então,

$$MLDT = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (23)$$

3.4 DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR

3.4.1 Definição da localização dos fluidos

No início do projeto do trocador de casco e tubo é necessário definir qual dos fluidos circulará na parte interna, mais especificamente no feixe de tubos e qual circulará na parte externa desse feixe, entende-se no casco.

Para decidir a localização dos fluidos deve-se considerar:

- Fluido com maior tendência de incrustação

A velocidade de escoamento é um dos fatores que influenciam na escolha do fluido que circulará nos tubos, como nos tubos a velocidade é mais uniforme e mais fácil de controlar, prefere-se que o fluido mais sujo (com maior fator de incrustação) circule através deles. No casco há chicanas e outros tipos de desvio, a velocidade não é regular em todo o trajeto do fluxo, podendo existir regiões com velocidades pequenas ou até nulas, favorecendo o depósito. Pois além da velocidade existe ainda a facilidade de limpeza mecânica ou química, que no lado do tubo é bem mais fácil de ser realizada que no casco.

- Fluido corrosivo

No caso de um fluido corrosivo é melhor que circule pelo lado do tubo. Os tubos podem ser construídos com materiais mais resistentes a corrosão ou até serem revestidos internamente para proteção. O material de construção e o grau de acabamento do casco poderão ser diferentes, uma vez que não entrarão em contato com o fluido corrosivo, barateando o custo final.

- Fluidos a alta temperatura ou pressão

Para fluidos a alta temperatura ou pressão os cuidados têm que ser grandes, talvez seja necessário vedação e materiais de construção especiais, então pelo mesmo motivo dos fluidos corrosivos, estes fluidos devem ser colocados do lado do tubo, além disso, em caso de algum tipo de vazamento o risco de acidente grave é reduzido.

- Fluido mais viscoso

Um fluido com alta viscosidade tem sua troca térmica prejudicada, por ser possível a colocação de chicanas que aumentam a turbulência do fluido e por consequência aumentam também sua troca de calor, é indicado que os fluidos viscosos devam fluir pelo lado do casco. Mas se a diferença de viscosidade entre os dois fluidos for pequena torna-se indiferente a localização do fluido no trocador.

Com estas informações, neste projeto, deve-se decidir como melhor opção pelo fluido frio circulando pelo lado do tubo e o fluido quente pelo lado do casco, pois o fluido frio é água industrial com maior incrustação que o fluido quente é água desmineralizada. Assim a incrustação será maior no tubo.

- Fluido com diferença entre as temperaturas terminais muito elevada:

Se as temperaturas de entrada e saída forem muito diferentes (variação maior que 150 °C) e se o número de passagens pelo lado dos tubos for maior que um, recomenda-se circular esse fluido pelo casco. Esse procedimento minimiza problemas construtivos causados pela expansão térmica.

Em muitos casos, podem ocorrer situações conflitantes, por exemplo, um dos fluidos é muito incrustante e o outro escoar com temperatura muito elevada, seguindo as orientações anteriores, os dois fluidos deveriam circular pelo lado dos tubos.

Uma prioridade que serve de orientação é dada pela seguinte relação onde o fluido de posição anterior é em geral alocado nos tubos:

Água de resfriamento;

Fluido corrosivo ou fluido com alta tendência de incrustação;

Fluido menos viscoso;

Fluido de temperatura e pressão elevadas;

3.4.2 Fator de correção do MLDT (F)

A média logarítmica da diferença de temperatura foi demonstrada para o caso de trocadores de calor de um único passe no casco, ou ainda, para trocadores de calor com igual número de passagens no casco e no tubo.

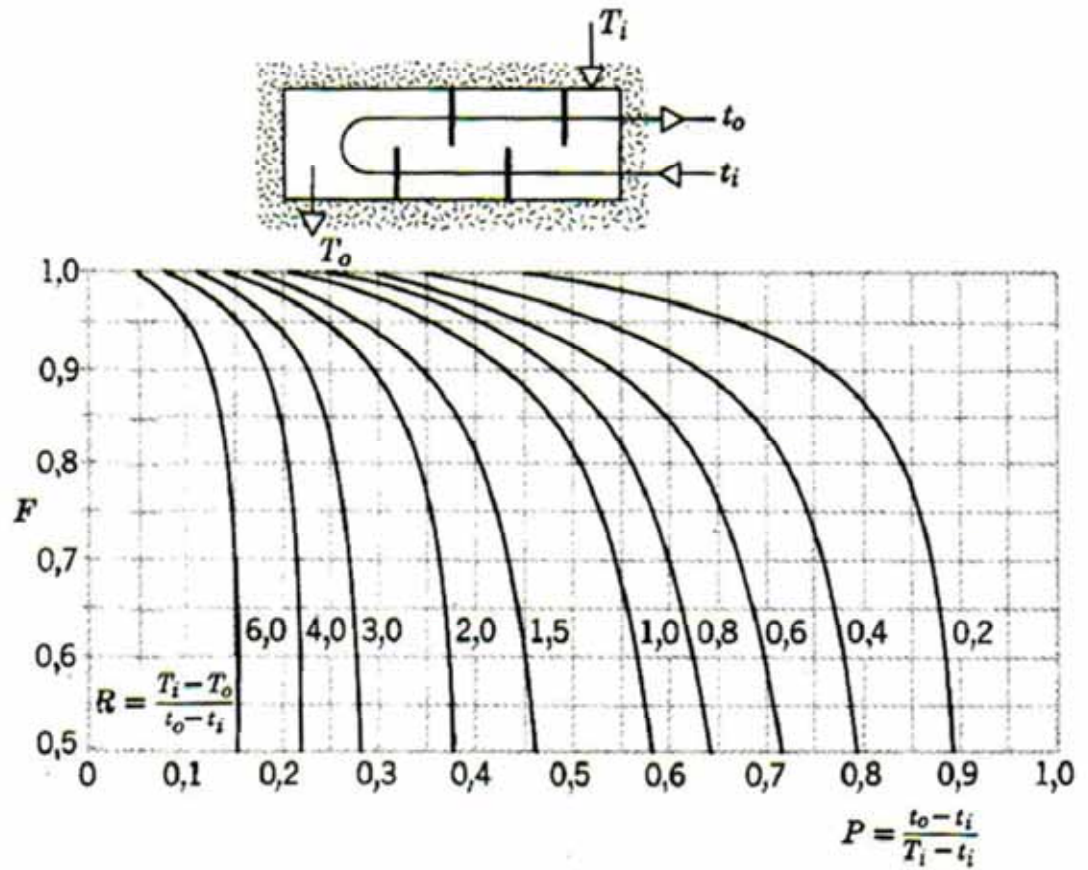
O número de vezes que o fluido passa de uma extremidade do trocador de calor até a outra é chamado de “passe”. Por exemplo, no trocador de um passe, o fluido entra por uma extremidade e sai pela outra, atravessando o trocador de calor uma única vez. No caso do fluido entrar em uma extremidade, percorrer o trocador de calor até a outra extremidade e depois retornar para a extremidade inicial antes de finalmente sair, este é de dois passes, e assim sucessivamente.

Quando há, por exemplo, duas passagens pelo tubo, ocorre uma alternância do fluxo paralelo e contracorrente. Uma passagem será em paralelo com o fluido do casco, enquanto a outra estará em contracorrente, ou seja, ao contrário do que ocorre em trocadores de casco e tubo com um único passe, onde o tipo de fluxo está definido.

A MLDT, nesses casos, resultará em um valor inferior ao obtido em contracorrente pura, devido a uma das passagens estar em paralelo com o casco. Como a operação em paralelo fornece MLDT menor que a operação em contracorrente, aplica-se então um fator de correção F.

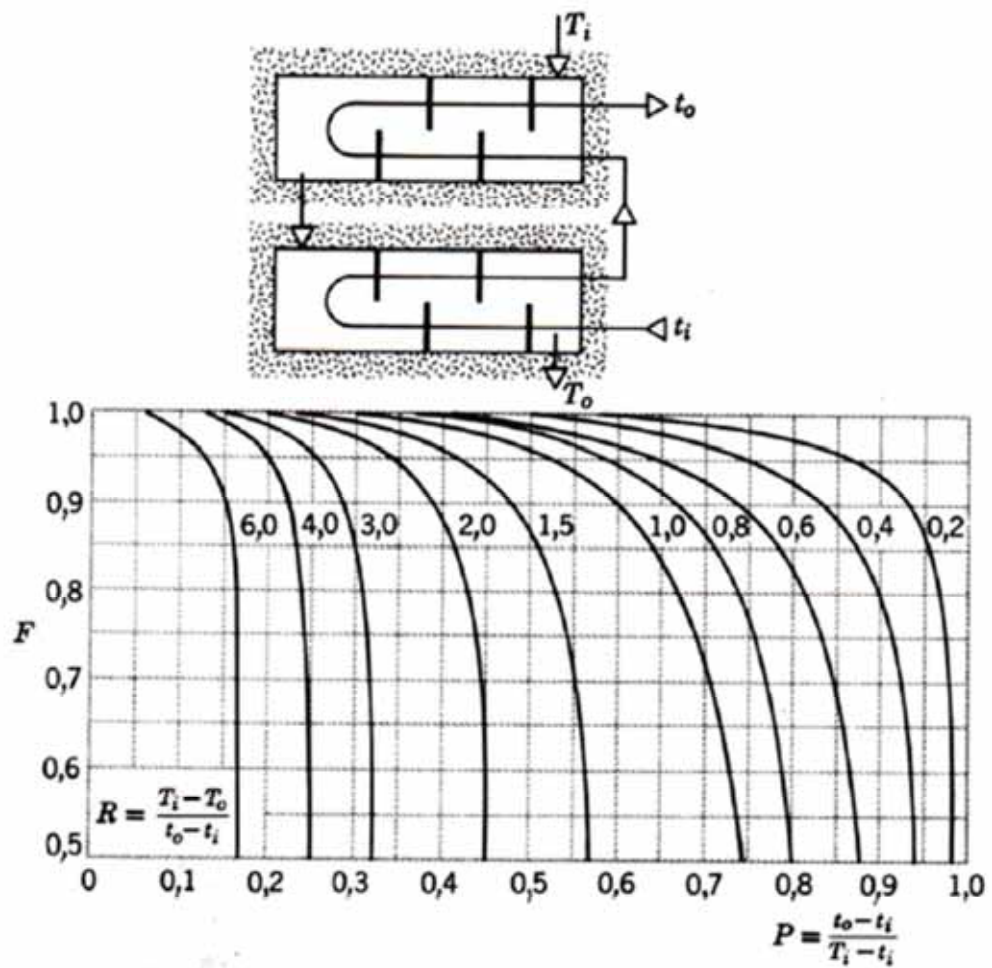
Este fator de correção pode ser determinado através de gráficos, Figuras 12 e 13, em função de números adimensionais de temperatura R e P.

Figura 12 - Fator de correção para trocadores de calor casco e tubo, com um passe no casco e qualquer número par de passes nos tubos



Fonte: (INCROPERA, 2008).

Figura 13 - Fator de correção para trocadores de calor casco e tubo, com um passe no casco e qualquer número par de passes nos tubos



Fonte: (INCROPERA, 2008).

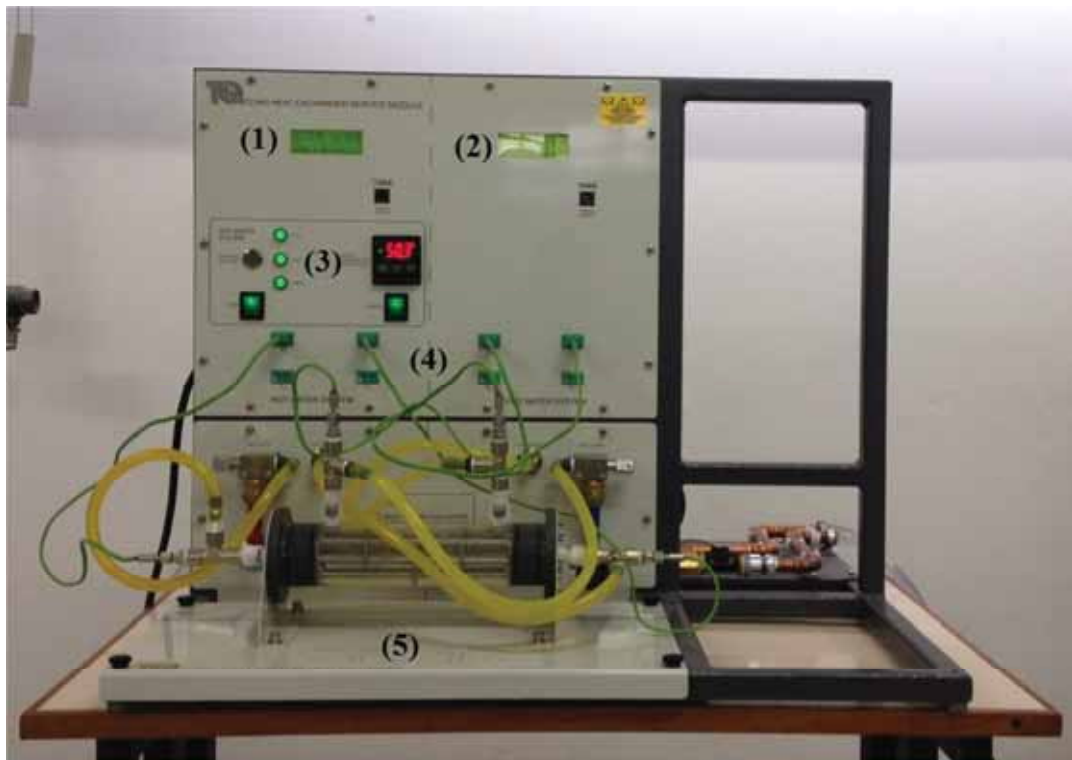
4 METODOLOGIA

Para mostrar o funcionamento dos trocadores de calor aos estudantes na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), são utilizados os trocadores de calor em escala de casco e tubo e trocador de calor por placas. É válido lembrar que esses trocadores em escala se assemelham aos trocadores de calor mais comumente utilizados na indústria e a Bancada de Trocadores de Calor da TecQuipment (representada no Brasil pela Nova Didacta) facilita a montagem e a comparação do funcionamento deles para diferentes vazões e temperaturas.

A base do sistema é o Módulo de Serviço (TD360), que consiste em uma estrutura com dois circuitos de água (quente e frio) prontos e instrumentos para medir e mostrar a vazão e a temperatura da água. Nessa estrutura são instalados os trocadores de calor (trocador de calor por Placas - TD360b e trocador de calor de Casco e Tubo - TD360c). Cada trocador de calor se encaixa na parte frontal do Módulo de Serviço e se conecta aos seus circuitos de água e circuitos de medição de temperatura.

A proposta é que os estudantes realizem experimentos com cada um dos trocadores de calor disponíveis, anotando as alterações na vazão e na temperatura para observar quão bem funciona o trocador de calor. Posteriormente, pode-se comparar os dois trocadores para ver qual é o melhor para cada aplicação.

Figura 14 - Módulo de Serviço (TD360) e um trocador de calor opcional (TD360c)



Fonte: (Autoria própria, 2013).

- (1) - Mostrador do circuito de água quente
- (2) - Mostrador do circuito de água fria
- (3) - Controles do módulo de serviço
- (4) - Conectores dos termopares
- (5) - Trocador de calor de Casco e Tubo (TD360c)

4.1 DESCRIÇÃO

4.1.1 O Módulo de serviço (TD360)

O Módulo de serviço consiste em uma estrutura de montagem em forma de bancada que se conecta a uma alimentação elétrica adequada e a um dreno. Ele possui dois circuitos de água, cada um desses circuitos tem um sensor de vazão para medir e apresentar a vazão, um para a água quente e outro para água fria.

O circuito de água fria consiste no recebimento da alimentação de água fria, essa água passa por uma válvula de controle de vazão ajustada manualmente, logo após, através do trocador de calor selecionado e finalmente, sai do sistema através do dreno.

Figura 15 - Válvula de Controle de Vazão do Circuito Frio



Fonte: (Autoria própria, 2013).

No circuito de água quente existe um tanque com aquecedor elétrico. Um controlador ajustável define a temperatura desse tanque. Além desse controlador, o tanque possui também sensores de boia de nível de água conectados a indicadores da quantidade de água dentro do tanque. São mostradas três situações possíveis, tanque cheio, metade e vazio; respectivamente escrito na estrutura: FULL, HALF e EMPTY (como mostra a Figura 15).

Figura 16 - Painel frontal do Módulo de Serviço



Fonte: (Autoria própria, 2013).

O botão na parte frontal do painel "pressione para encher o tanque" (PRESS TO FILL TANK) quando pressionado aciona uma válvula solenoide, adicionando mais água ao tanque. A água quente do tanque recircula no circuito através de uma bomba. Essa água quente sai do tanque através de uma válvula de controle de vazão com ajuste manual, passa através do trocador de calor e retorna ao tanque. Segundo o fabricante, o tanque possui sensores que garantem a segurança da operação¹.

¹ O tanque possui um sensor de segurança que desliga a alimentação do aquecedor se a temperatura ficar perigosa; o sensor de tanque "cheio" desconecta o solenoide de enchimento do tanque para que não seja possível encher demais o tanque; a bomba e o aquecedor não funcionam a menos que o tanque de aquecimento esteja com pelo menos metade da capacidade de água.

Figura 17 - Válvula de Controle de Vazão do Circuito Quente



Fonte: (Autoria própria, 2013).

Os circuitos de água quente e fria são conectados do Módulo de Serviço até os trocadores de calor através de tubos flexíveis com conectores de engate rápido. Os circuitos de água quente e fria possuem conectores diferentes para se reduzir o risco de erros de conexão. Para a medição da temperatura da água na entrada e na saída dos trocadores de calor existe próximo de cada conector, um termopar que se conecta a soquetes no Módulo de Serviço.

4.1.2 Trocador de calor por placas (TD360b)

Como visto anteriormente no capítulo 2 desse trabalho, o trocador de calor por placas consiste em camadas de placas de metal separadas por juntas (ou espaçadores). As placas e juntas possuem furos, permitindo aos circuitos de água quente e de água fria passagem alternada através das placas. Os circuitos são completamente separados, mas o calor é transferido através deles por intermédio das placas de metal. A principal vantagem deste trocador é seu tamanho compacto aliado com sua eficiência, tornando-o bom para aplicações com espaço limitado.

Como Funciona o Trocador de Calor por Placas

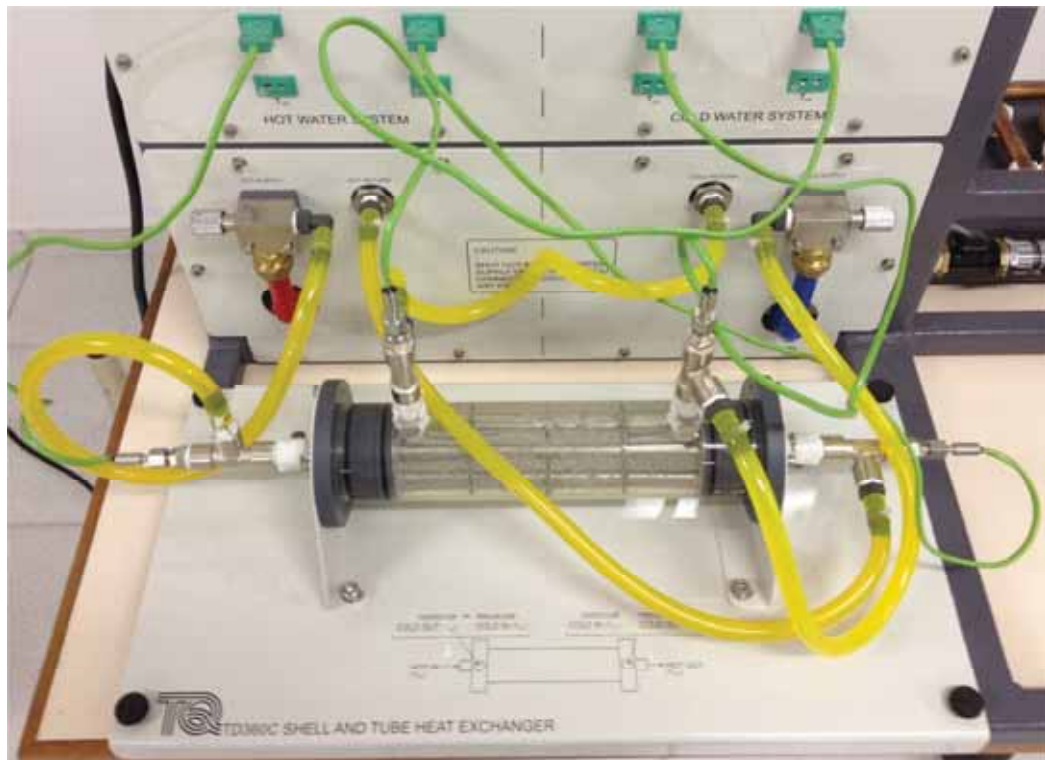
O desempenho desse trocador de calor depende do tamanho e da quantidade de placas que o compõe. Mais placas significa mais área de transferência de calor, no entanto também é aumentada a resistência ao escoamento. Os trocadores de calor comerciais por placas possuem placas com formas de espinha de peixe conformadas na sua superfície para aumentar a área superficial de troca de calor e causar um maior distúrbio durante o escoamento, possibilitando assim, uma melhor troca de calor. No caso do trocador de calor por placas utilizado nos experimentos, as placas possuem pequenos rebaixos para causar distúrbios ao escoamento, executando a mesma tarefa que as formas de espinha de peixe no trocador comercial.

Um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostra aos estudantes como conectar o trocador de calor corretamente.

4.1.3 Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c)

Também visto no capítulo 2 deste trabalho, o trocador de calor de casco e tubo é o mais comumente utilizado nas indústrias, especialmente em refinarias de petróleo e em indústrias químicas.

Figura 18 - O Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c)



Fonte: (Autoria própria, 2013).

Ele consiste em um grande tubo (a casco) que circunda vários tubos menores no seu interior. Um circuito de água passa através dos tubos menores, enquanto o outro passa através da casco, por fora destes tubos, transferindo o calor entre eles. Os tubos menores possuem defletores que ajudam a criar um escoamento turbulento dentro da casco.

Esse modelo também possui um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostrando aos estudantes como conectar o trocador de calor.

4.2 NOTAÇÃO, EQUAÇÕES ÚTEIS E TEORIA

Tabela 1 - Notações

Símbolo	Definição	Unidades
A	Área de Transferência de Calor	m ²
C	Capacidade Térmica	J/K
C _p	Calor específico da água em pressão constante	J/kg.K
LMTD	Diferença de temperatura Média Logarítmica	K ou °C quando mostrado
ρ	Densidade da água	kg/m ³
C _{EB}	Coeficiente de Equilíbrio de Energia	-
η _{média}	Eficiência Média de Temperatura	%
Q	Energia calorífica transferida para uma unidade de massa	J/kg
Q'	Energia calorífica transferida para uma unidade de tempo (taxa de transferida de calor - ou potência)	W
Q _a e Q _e	Energia calorífica (potência) absorvida e emitida em uma unidade de tempo	W
T	Temperatura	K ou °C quando mostrado
ΔT	Mudança de temperatura	K ou °C quando mostrado
T _{média}	Temperatura média	K ou °C quando mostrado
U	Coeficiente de transferência de calor	W/m ² .K
V _H e V _C	Vazão volumétrica (circuito quente e circuito frio)	m ³ /s ou L/min quando especificado
m _H e m _C	Vazão mássica (circuito quente e circuito frio)	kg/s

Conversão da vazão

O Módulo de Serviço mede a vazão em litros por minuto (L/min), nos cálculos é necessário utilizar a vazão em metros cúbicos por segundo (m³/s).

$$\text{Conversão } 10 \text{ L/min} = 0,0001667 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.1 Equações úteis

Temperatura Média

Para encontrar a temperatura média do circuito frio:

$$T_{C \text{ média}} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2} \quad (24)$$

Para encontrar a temperatura média do circuito quente:

$$T_{H \text{ média}} = \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2} \quad (25)$$

Para a maioria das equações de transferência de calor, e cálculos do calor específico e densidade da água, você deve encontrar a temperatura média para os circuitos de água quente e fria dentro do seu trocador de calor. Este é o valor calculado de temperatura no ponto intermediário entre a entrada e a saída do circuito.

Capacidade Térmica (C)

Esta é uma medida do calor necessário para aumentar a temperatura de uma massa dada de material em um grau (Kelvin ou Celsius). Ela consiste em um produto da massa de um material (m) e a seu calor específico (c).

$$C = m \times c \quad (26)$$

Calor específico com pressão constante (Cp)

O calor específico consiste na quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de exatamente 1 kg de material em 1 grau (Celsius). Ela é a razão entre a mudança de energia térmica e a mudança de temperatura.

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (27)$$

A pressão e a temperatura afetam o calor específico, então a equação 28 assume uma pressão constante sobre uma faixa conhecida de temperatura. Ela consiste no calor específico “Isobárico” (pressão igual).

$$Cp = \frac{Q}{\Delta T} \quad (28)$$

$$\frac{Cp(at T^{\circ}C)}{Cp(at 15^{\circ}C)} = 0,996185 + 0,0002874 \left(\frac{T+100}{100} \right)^{5,26} + 0,011160 \times 10^{-0,036T} \quad (29)$$

Deve ser usada a temperatura média do circuito nesta equação.

Densidade (ρ)

Quando a temperatura da água muda, sua densidade muda levemente. Sua densidade máxima está em aproximadamente 4 graus Celsius e diminui quando a temperatura aumenta ou diminui com base neste valor. Isto afeta todos os seus cálculos. Deve-se encontrar a densidade da água para a sua temperatura em unidade de massa e uma pressão constante. Alternativamente, a Equação 30 mostra como calcular a densidade com precisão (onde T é a temperatura da água em graus Celsius).

$$\rho = \frac{(999,839 + 16,952T - 7,990 \times 10^{-3}T^2 - 46,241 \times 10^{-6}T^3 + 105,846 \times 10^{-9}T^4 - 281,030 \times 10^{-12}T^5)}{(1 + 16,887 \times 10^{-3}T)} \quad (30)$$

Deve ser usada a temperatura média do circuito nesta equação.

4.2.2 Transferência de calor, Equilíbrio de energia e Eficiências.

Os trocadores de calor, o calor se transfere ou escoo do circuito de água quente para o circuito de água fria. A taxa de transferência de calor é uma função da taxa de vazão mássica do fluido, da mudança de temperatura e do calor específico do fluido (na temperatura média).

$$\dot{Q} = m \times c_p \times \Delta T \quad (31)$$

Em um trocador de calor ideal, que não perde nem absorve calor do ambiente externo, o fluido frio absorve todo o calor vindo do fluido quente. Então a taxa de transferência de calor é:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = m_H \times c_{p_H} \times \Delta T_H = m_C \times c_{p_C} \times \Delta T_C \quad (32)$$

Se a equação for rearranjada para vazão volumétrica, temos:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = V_H \times \rho_H \times c_{p_H} \times \Delta T_H = V_C \times \rho_C \times c_{p_C} \times \Delta T_C \quad (33)$$

Para entender melhor a transferência de calor dentro de um trocador de calor, você deve assumir que ele é um “sistema” com os escoamentos de água quente e fria como suas entradas e saídas.

Como mencionado anteriormente, não há transferência de calor através dos “limites do sistema” em um trocador de calor ideal. Mas, na realidade, o fluido quente e o fluido frio estão usualmente com temperaturas diferentes com relação ao meio externo, então alguma transferência de calor ocorre através dos limites do sistema. Por exemplo, o calor de uma sala aquecida se transferiria para o fluido frio.

O Coeficiente de Equilíbrio de Energia (C_{EB})

Mostra a relação entre a energia absorvida e a energia emitida, onde:

$$C_{EB} = \frac{Q_a}{Q_e} \quad (34)$$

Mas, por causa do escoamento possível de calor para dentro ou para fora do sistema, o coeficiente de equilíbrio de energia pode fornecer valores maiores do que 1 caso o trocador de calor absorva energia do ambiente externo. Assim, ele serve somente como um guia porque na realidade:

$$Q_e = Q_a \pm \text{Perdas ou ganhos do ambiente externo}$$

A eficiência média da temperatura e o coeficiente de transferência de calor fornecem resultados mais úteis para comparação entre os trocadores de calor.

A eficiência da temperatura do circuito quente do trocador de calor consiste na razão entre a mudança de temperatura no circuito quente, dividida pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima dos circuitos quente e frio:

$$\eta_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100 \quad (35)$$

A eficiência da temperatura do circuito frio do trocador de calor consiste na razão entre a mudança de temperatura no circuito frio, dividida pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima dos circuitos quente e frio:

$$\eta_C = \frac{T_{C2} - T_{C1}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100 \quad (36)$$

A eficiência média da temperatura dos dois circuitos consiste na eficiência média dos dois:

$$\eta_{m\u00e9dia} = \frac{\eta_H + \eta_C}{2} \quad (37)$$

Diferen\u00e7a de Temperatura M\u00e9dia Logar\u00edtmica (LMTD)

Esta \u00e9 uma medida da for\u00e7a de movimentaa\u00e7\u00e3o do calor que cria a transfer\u00eancia de calor. Ela consiste em uma m\u00e9dia logar\u00edtmica da diferen\u00e7a de temperatura entre os circuitos quente e frio em cada extremidade do trocador de calor.

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln\left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}}\right)} \quad (38)$$

Coefficiente de Transfer\u00eancia de Calor (U)

Este \u00e9 o coeficiente de transfer\u00eancia de calor total para a parede e para as camadas limite. \u00c9 uma medida de qu\u00e3o bem funciona o trocador de calor. Um bom trocador de calor apresentar\u00e1 um alto coeficiente, conseq\u00fcentemente este valor \u00e9 importante para os engenheiros.

$$U = \frac{Q_e}{A \times LMTD} \quad (39)$$

Os trocadores de calor utilizados possuem a mesma \u00e1rea de transfer\u00eancia de calor (A), para possibilitar que sejam feitas compara\u00e7\u00f5es diretas.

4.3 EXPERIMENTOS

Algumas observa\u00e7\u00f5es importantes devem ser feitas em rela\u00e7\u00e3o aos experimentos que s\u00e3o apresentados mais adiante.

Temperaturas locais

De acordo com o fabricante, a temperatura local do ambiente e a temperatura de entrada da \u00e1gua fria possuem um grande efeito nos resultados. Os experimentos preferencialmente devem ser executados em um local que possua algum sistema de controle de temperatura ambiente (laborat\u00f3rio com ar condicionado), para que se tenha uma temperatura constante e

de aproximadamente 20 °C. Na alimentação de água fria é indicado que seja utilizada água entre 10 °C e 15 °C.

Pelo menos duas pessoas

Recomenda-se que se tenha pelo menos uma pessoa para auxiliar a execução dos experimentos. Geralmente, uma pessoa anota os resultados e a outra controla o experimento e garante a segurança².

Equilíbrio térmico para resultados precisos

O estabelecimento do "equilíbrio térmico" pode levar alguns minutos, por isso recomenda-se esperar as temperaturas estabilizarem antes de anotar os resultados.

4.3.1 Procedimento para montar um Trocador de calor na bancada

1. Desligar o interruptor do aquecedor e da bomba.
2. Posicionar o trocador de calor sobre a parte frontal do Módulo de Serviço. Usar os parafusos fixadores para mantê-lo em posição.
3. Fechar completamente os reguladores de vazão de água (regulador vazão quente e fria). Conectar corretamente os circuitos de água quente e fria para cada caso estudado (fluxo paralelo e contra fluxo), como mostrado no diagrama sobre a placa de montagem de cada trocador de calor.
4. Conectar corretamente os termopares aos seus respectivos soquetes, como também é mostrado no diagrama sobre a placa de montagem de cada trocador de calor.
5. Ligar a chave da alimentação elétrica e de água fria no Módulo de Serviço. Abrir completamente os reguladores de vazão dos circuitos quente e frio.

² Uma recomendação de segurança do fabricante orienta para sempre limpar quaisquer respingos de água imediatamente. Nunca utilizar as chaves elétricas quando estiver com as mãos molhadas.

6. Ligar a bomba e o aquecedor, certificando-se primeiramente de que o tanque de aquecimento esteja cheio, usar os botões no controlador para ajustar a temperatura final desejada no aquecedor (led “SP” ligado), conforme procedimento do experimento.

4.3.2 Experimento 1

Considerações

Foram usadas as temperaturas de entrada e de saída (T_{H1} , T_{H2} , T_{C1} e T_{C2}) para criar gráficos simples de temperatura para cada vazão. Notou-se que os resultados para fluxo paralelo e para contra fluxo são diferentes.

Encontrou-se a alteração na temperatura (ΔT) para cada circuito, a temperatura média para cada circuito e também foram convertidas as vazões de L/min para m^3/s .

Foram usadas as equações na seção de teoria para calcular a densidade de água para os circuitos de água quente e de água fria (ρ_H e ρ_C) em cada vazão e o calor específico para cada circuito a cada vazão.

Foi calculado o calor emitido, o calor absorvido, as eficiências de temperatura média e o coeficiente de equilíbrio de energia para os sistemas com fluxo paralelo e com contra fluxo para todas as vazões. Foram criados gráficos para o coeficiente de equilíbrio de energia (eixo vertical) contra a vazão de água fria (eixo horizontal).

Foi encontrado o LMTD para se calcular o coeficiente de transferência de calor (U) para cada vazão e foram comparados os coeficientes de transferência de calor dos trocadores de calor para cada vazão dada.

O efeito da variação de vazão

Objetivo

Para os casos de fluxo contrário e fluxo paralelo, mostrar e comparar resultados de como a variação das taxas de vazão de água afetam o desempenho do trocador de calor.

Procedimento 1 - Vazão paralela - Trocador de calor de Casco e tubo

1. Para que seja verificada apenas a influência da variação da vazão no experimento, será apenas variada a vazão de água fria, as outras possíveis variáveis, como a vazão de água quente e a temperatura do aquecedor, serão fixas.

2. Conectou-se o trocador de calor de casco e tubo, segundo os procedimentos descritos anteriormente no capítulo, na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. A temperatura do tanque de aquecimento foi fixada em 50 °C.

3. Foi usado o termômetro e o barômetro do laboratório para verificar a temperatura do ar e a pressão ambiente local, respectivamente, para usar como referência nos cálculos.

4. Foram utilizadas as válvulas de controle de vazão operadas manualmente para fixar a vazão de água quente (fixada em 3 litros por minuto) e ajustar as diferentes vazões de água fria como mostrado na Tabela 2. Como indicado pelo fabricante, para cada vazão diferente de água fria foi aguardado 5 minutos para que as temperaturas e vazões se estabilizassem³ no trocador de calor.

5. Foram anotadas as temperaturas do circuito de água quente e do circuito de água fria. Os resultados são mostrados na Tabela 2.

³ As vazões de água oscilaram levemente enquanto o experimento era executado, então foi necessário ajustar levemente as válvulas de controle de vazão nos casos das oscilações um pouco maiores para manter a vazão constante.

Tabela 2 - Variação da vazão de água fria no trocador de calor de casco e tubo - Fluxo Paralelo

Trocador de calor:	TD360c casco e tubo					
Conexão:	Paralelo					
Temperatura do ambiente:	21,5 °C					
Temperatura do tanque de aquecimento:	50 °C					
Teste	1	2	3	4	5	6
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5
T _{H1} [°C]	51,0	51,2	50,9	51,1	51,2	51,6
T _{H2} [°C]	46,9	47,4	47,8	48,4	48,9	49,7
ΔT _H	4,1	3,8	3,1	2,7	2,3	1,9
T _H média	48,95	49,30	49,35	49,75	50,05	50,65
T _{C1} [°C]	22,2	21,9	21,7	21,6	21,4	21,8
T _{C2} [°C]	25,4	25,8	26,4	27,1	28,7	33,3
ΔT _C	3,2	3,9	4,7	5,5	7,3	11,5
T _C média	23,80	23,85	24,05	24,35	25,05	27,55
η _H [%]	14,2	13,0	10,6	9,2	7,7	6,4
η _C [%]	11,1	13,3	16,1	18,6	24,5	38,6
ρ _H [kg/m ³]	988,5	988,3	988,3	988,1	988,0	987,7
ρ _C [kg/m ³]	997,3	997,3	997,3	997,2	997,0	996,4
C _{pH} [J/kg.K]	4180,1	4180,2	4180,2	4180,3	4180,4	4180,6
C _{pC} [J/kg.K]	4179,7	4179,7	4179,6	4179,5	4179,3	4178,6
Q _e [W]	847,2	785,1	640,5	557,8	475,1	392,4
Q _a [W]	889,5	813,0	653,2	573,2	507,1	399,1
C _{EB}	1,05	1,04	1,02	1,03	1,07	1,02
η _{média} [%]	12,7	13,1	13,4	13,9	16,1	22,5
LMTD [°C]	24,97	25,25	25,10	25,18	24,69	22,44
U [W/m ² .K]	1696,3	1554,4	1276,0	1107,6	962,1	874,4

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente Ta = 21,5 °C; Pa = 714 mmHg.

As vazões de água fria e água quente no circuito precisam ser ajustada apenas se oscilarem 0,04 L/min ou mais durante o período de espera de 5 min para garantir o equilíbrio.

Valores abaixo dessa oscilação tendem a retornar ao valor inicialmente definido no regulador manual.

Para marcar o tempo de 5 min, indicado para atingir o equilíbrio, foi utilizado o cronometro do celular (qualquer marcador simples pode ser utilizado). Para fins didáticos, onde não se disponha de muito tempo para realização dos experimentos, foi verificado que o tempo de espera de 3 min é suficiente para se chegar a resultados praticamente iguais ao tempo de espera de 5 min.

A vazão máxima de água nos circuitos indicada pelo fabricante é de 5 L/min, mas na prática não foi possível alcançar essa vazão. Foi alcançado valores um pouco acima de 4 L/min.

Alguns fatores que influenciam nos resultados e que não puderam ser controlados são a temperatura de entrada de água fria que estava acima de 20 °C; e também o laboratório de sistemas térmicos da faculdade não possui um controle de temperatura ambiente (ar condicionado) o que dificulta a garantia de uma temperatura constante durante os experimentos.

Procedimento 2 - Contra fluxo - Trocador de calor de Casco e tubo

1. Foi reconectado o trocador de calor de casco e tubo segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repetiu-se o procedimento 1 para esse novo regime de operação. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação da vazão de água fria no trocador de calor de casco e tubo - Contra fluxo

Trocador de calor:		TD360c casco e tubo				
Conexão:		Contra fluxo				
Temperatura do ambiente:		21,5 °C				
Temperatura do tanque de aquecimento:		50 °C				
Teste	1	2	3	4	5	6
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5
T _{H1} [°C]	51,0	51,1	51,2	51,0	51,1	51,3
T _{H2} [°C]	47,0	47,4	48,1	48,3	48,7	49,4
ΔT _H	4,0	3,7	3,1	2,7	2,4	1,9
T _H média	49,00	49,25	49,65	49,65	49,90	50,35
T _{C1} [°C]	22,2	21,8	21,4	21,4	21,2	21,1
T _{C2} [°C]	25,3	25,5	26,1	26,9	28,4	32,3
ΔT _C	3,1	3,7	4,7	5,5	7,2	11,2
T _C média	23,75	23,65	23,75	24,15	24,80	26,70
η _H [%]	13,9	12,6	10,4	9,1	8,0	6,3
η _C [%]	10,8	12,6	15,8	18,6	24,1	37,1
ρ _H [kg/m ³]	988,5	988,4	988,2	988,2	988,1	987,9
ρ _C [kg/m ³]	997,4	997,4	997,4	997,3	997,1	996,6
C _{pH} [J/kg.K]	4180,1	4180,2	4180,3	4180,3	4180,4	4180,5
C _{pC} [J/kg.K]	4179,7	4179,8	4179,7	4179,6	4179,4	4178,8
Q _e [W]	826,6	764,5	640,4	557,8	495,8	392,4
Q _a [W]	861,7	771,4	653,2	573,2	500,2	388,8
C _{EB}	1,04	1,01	1,02	1,03	1,01	0,99
η média [%]	12,3	12,6	13,1	13,9	16,1	21,7
LMTD [°C]	25,08	25,42	25,70	25,28	24,79	23,03
U [W/m ² .K]	1647,7	1503,7	1245,8	1103,3	999,9	851,9

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 21,5 \text{ °C}$; $P_a = 715 \text{ mmHg}$.

São gastos cerca de 20 segundos para se ler e anotar todos os valores de temperaturas de entrada e saída dos circuitos de água quente e fria.

Procedimento 3 - Vazão Paralela - Trocador de calor de Placas

1. Para se comparar os resultados dos trocadores de calor de Casco e tubo e trocador de calor de Placas, repetiu-se os procedimentos do experimento 1 para o modelo de Trocador de Placas da faculdade.

2. Conectou-se o trocador de calor de placas, segundo os procedimentos descritos anteriormente no capítulo, na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. A temperatura do tanque de aquecimento foi também fixada em 50 °C.

3. Repetiu-se o procedimento 1 para esse novo trocador de calor. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Variação da vazão de água fria no trocador de placas - Vazão Paralela

Trocador de calor: TD360b placas						
Conexão: Paralelo						
Temperatura do ambiente: 22,5 °C						
Temperatura do tanque de aquecimento: 50,0 °C						
Teste	1	2	3	4	5	6
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5
T_{H1} [°C]	51,2	51,3	51,5	51,4	51,6	51,7
T_{H2} [°C]	48,8	49,0	49,2	49,5	49,7	50,3
ΔT_H	2,4	2,3	2,3	1,9	1,9	1,4
T_H média	50,00	50,15	50,35	50,45	50,65	51,00
T_{C1} [°C]	22,7	23,2	22,9	23,2	23,1	23,0
T_{C2} [°C]	25,0	25,6	26,3	27,2	29,0	31,6
ΔT_C	2,3	2,4	3,4	4,0	5,9	8,6
T_C média	23,85	24,40	24,60	25,20	26,05	27,30
η_H [%]	8,4	8,2	8,0	6,7	6,7	4,9
η_C [%]	8,1	8,5	11,9	14,2	20,7	30,0
ρ_H [kg/m ³]	988,0	988,0	987,9	987,8	987,7	987,6
ρ_C [kg/m ³]	997,3	997,2	997,1	997,0	996,8	996,4
C_{pH} [J/kg.K]	4180,4	4180,5	4180,5	4180,6	4180,6	4180,7
C_{pC} [J/kg.K]	4179,7	4179,5	4179,4	4179,2	4179,0	4178,7
Q_e [W]	495,7	475,1	475,0	392,4	392,4	289,1
Q_a [W]	639,3	500,2	472,4	416,7	409,7	298,5
C_{EB}	1,29	1,05	0,99	1,06	1,04	1,03
η média [%]	8,2	8,4	10,0	10,5	13,7	17,4
LMTD [°C]	26,08	25,68	25,64	25,13	24,39	23,34
U [W/m ² .K]	950,4	925,0	926,2	780,6	804,3	619,1

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 22,5$ °C; $P_a = 715$ mmHg.

Em certa ocasião, a vazão máxima foi de 3,11 L/min (provavelmente devido à uma outra demanda de água na FEG durante o mesmo horário do experimento), foi necessário esperar cerca de 20 min até que fosse possível realizar o experimento com a vazão de água fria em 4 L/min.

Procedimento 4 - Contra fluxo - Trocador de calor de Placas

1. Foi reconectado o trocador de calor de placas segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repetiu-se o procedimento 1 para esse novo regime de operação. Os resultados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Variação da vazão de água fria no trocador de placas - Contra fluxo

Trocador de calor: TD360b placas						
Conexão: Contra fluxo						
Temperatura do ambiente: 22,5 °C						
Temperatura do tanque de aquecimento: 50 °C						
Teste	1	2	3	4	5	6
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,5
T_{H1} [°C]	51,1	51,1	51,6	51,2	51,3	51,4
T_{H2} [°C]	49,0	49,1	49,5	49,3	49,5	50,1
ΔT_H	2,1	2,0	2,1	1,9	1,8	1,3
T_H média	50,05	50,10	50,55	50,25	50,40	50,75
T_{C1} [°C]	22,9	22,7	22,5	22,6	22,3	22,3
T_{C2} [°C]	24,5	24,9	25,7	26,4	27,7	30,1
ΔT_C	1,6	2,2	3,2	3,8	5,4	7,8
T_C média	23,70	23,80	24,10	24,50	25,00	26,20
η_H [%]	7,4	7,0	7,2	6,6	6,2	4,5
η_C [%]	5,7	7,7	11,0	13,3	18,6	26,8
ρ_H [kg/m ³]	988,0	988,0	987,8	987,9	987,8	987,7
ρ_C [kg/m ³]	997,4	997,3	997,3	997,2	997,0	996,7
C_{pH} [J/kg.K]	4180,4	4180,5	4180,6	4180,5	4180,5	4180,6
C_{pC} [J/kg.K]	4179,8	4179,7	4179,6	4179,5	4179,3	4178,9
Q_e [W]	433,8	413,1	433,7	392,4	371,7	268,4
Q_a [W]	444,8	458,6	444,7	396,0	375,1	270,8
C_{EB}	1,03	1,11	1,03	1,01	1,01	1,01
η média [%]	6,6	7,4	9,1	10,0	12,4	15,6
LMTD [°C]	26,31	26,24	26,36	25,64	25,23	24,27
U [W/m ² .K]	824,4	787,0	822,6	765,1	736,7	553,1

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_a = 715 \text{ mmHg}$.

4.3.3 Experimento 2

Considerações

Foram usadas as temperaturas de entrada e de saída (T_{H1} , T_{H2} , T_{C1} , T_{C2}) para criar gráficos simples de temperatura para cada temperatura do aquecedor. Notou se que os resultados para fluxo paralelo e para contra fluxo são diferentes.

Encontrou se a alteração na temperatura (ΔT) para cada circuito, a temperatura média para cada circuito e também foram convertidas as vazões de L/min para m^3/s .

Foram usadas as equações na seção de teoria para calcular a densidade de água para os circuitos de água quente e de água fria para cada temperatura do aquecedor e o calor específico para cada circuito da temperatura do aquecedor.

Calculou se o calor emitido, o calor absorvido, as eficiências de temperatura média e o coeficiente de equilíbrio de energia para os sistemas com fluxo paralelo e com contra fluxo para todas as temperaturas do aquecedor. Foram criados gráficos para o coeficiente de equilíbrio de energia (eixo vertical) contra a temperatura do aquecedor (eixo horizontal).

Foi encontrado o LMTD para se calcular o coeficiente de transferência de calor (U) para cada temperatura do aquecedor.

Compararam-se os coeficientes de transferência de calor dos seus trocadores de calor para cada temperatura do aquecedor dada.

Efeito da variação da temperatura

Objetivo

Para os casos de fluxo contrário e fluxo paralelo, mostrar e comparar resultados de como as diferentes temperaturas de alimentação de água quente afetam o desempenho do trocador de calor.

Procedimento 1 - Fluxo paralelo - Trocador de calor de Casco e tubo

1. Para que seja verificada apenas a influência da variação da temperatura no experimento, será apenas variada a temperatura de alimentação de água quente no circuito, as outras possíveis variáveis como a vazão de água quente e de água fria, serão fixas.

2. Conectou-se o trocador de calor de casco e tubo, segundo os procedimentos descritos anteriormente no capítulo, na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. As vazões de água quente e fria foram fixadas em 3 L/min e 2 L/min, respectivamente.

3. Foi usado o termômetro e o barômetro do laboratório para verificar a temperatura do ar e a pressão ambiente local, respectivamente, para usar como referência nos cálculos.

4. Foram utilizadas as válvulas de controle de vazão operadas manualmente para fixar a vazão de água quente (fixada em 3 litros por minuto) e a vazão de água fria (fixada em 2 litros por minuto), em seguida, para cada teste foi ajustada a temperatura do tanque de aquecimento que alimenta o circuito de água quente, como mostrado na Tabela 6. Como indicado pelo fabricante, para cada temperatura de alimentação de água quente diferente, foi aguardado 5 minutos para que as temperaturas e vazões se estabilizassem⁴ no trocador de calor.

5. Foram anotadas as temperaturas do circuito de água quente e do circuito de água fria. Os resultados são mostrados na Tabela 6.

⁴ Da mesma forma que ocorreu nos experimentos anteriores, as vazões de água oscilaram levemente enquanto o experimento era executado, então foi necessário ajustar levemente as válvulas de controle de vazão nos casos das oscilações um pouco maiores para manter a vazão constante.

Tabela 6 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de casco e tubo - Fluxo Paralelo

Trocador de Calor:	TD360c casco e tubos			
Conexão:	Paralela			
Temperatura do ambiente:	21,5 °C			
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]	31,7	41,6	51,0	61,3
T_{H2} [°C]	30,8	39,6	47,8	57,0
ΔT_H	0,9	2,0	3,2	4,3
$T_{H\text{ média}}$	31,25	40,60	49,40	59,15
T_{C1} [°C]	22,0	21,9	21,4	21,8
T_{C2} [°C]	23,6	25,0	26,2	28,3
ΔT_C	1,6	3,1	4,8	6,5
$T_{C\text{ média}}$	22,80	23,45	23,80	25,05
η_H [%]	9,3	10,2	10,8	10,9
η_C [%]	16,5	15,7	16,2	16,5
ρ_H [kg/m ³]	995,3	992,0	988,3	983,6
ρ_C [kg/m ³]	997,6	997,4	997,3	997,0
C_{pH} [J/kg.K]	4178,1	4178,4	4180,2	4183,7
C_{pC} [J/kg.K]	4180,1	4179,9	4179,7	4179,3
Q_e [W]	187,2	414,6	661,1	884,9
Q_a [W]	222,4	430,9	667,1	903,0
C_{EB}	1,19	1,04	1,01	1,02
$\eta_{\text{ média}}$ [%]	12,9	12,9	13,5	13,7
LMTD [°C]	8,39	17,02	25,39	33,81
U [W/m ² .K]	1115,6	1217,7	1302,0	1308,6

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 21,5$ °C; $P_a = 714$ mmHg.

Após se ajustar a temperatura do aquecedor, é necessário esperar até que a luz verde apareça (indicando que a temperatura atual da água de alimentação é igual à temperatura ajustada para o tanque do aquecedor) antes de se iniciar a contagem do tempo até o equilíbrio.

Para agilizar o ajuste da temperatura no aquecedor é possível apertar e segurar o botão de ajuste para se chegar ao valor desejado mais rapidamente.

Para fins didáticos, onde não se disponha de muito tempo para realização dos experimentos de variação de vazão e variação de temperatura no mesmo dia, é aconselhado iniciar com o experimento de variação de temperatura e quando atingida a temperatura fixada para os experimentos de variação de vazão, iniciar esse outro experimento antes de continuar a variar a temperatura no aquecedor.

Por exemplo, serão efetuados testes de variação de temperatura de 30 °C a 60 °C e também testes de variação de vazão com o tanque aquecedor em 50 °C. Deve-se iniciar com o experimento de variação de temperatura até se atingir os teste a 50 °C, então realizar os teste do experimento de variação de vazão nesse 50 °C antes de finalizar com o teste de variação da temperatura em 60 °C.

Esse procedimento é indicado pelo fato do tempo de aquecimento do sistema ser muito menor que o tempo de resfriamento. Foi verificado, por exemplo, que é muito mais rápido elevar a temperatura do aquecedor em 10 °C do que abaixa-la os mesmo 10 °C.

Procedimento 2 - Contra fluxo - Trocador de calor de Casco e tubo

1. Foi reconectado o trocador de calor de casco e tubo segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repetiu-se o procedimento 1 para esse novo regime de operação. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de casco e tubo - Contra fluxo

Trocador de Calor:	TD360c casco e tubos			
Conexão:	Contra fluxo			
Temperatura do ambiente:	21,5 °C			
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]	31,3	41,5	51,3	61,0
T_{H2} [°C]	30,4	39,6	48,2	56,6
ΔT_H	0,9	1,9	3,1	4,4
$T_{H\text{ média}}$	30,85	40,55	49,75	58,80
T_{C1} [°C]	20,9	21,3	21,4	21,2
T_{C2} [°C]	22,4	24,4	26,1	28,0
ΔT_C	-1,5	-3,1	-4,7	-6,8
$T_{C\text{ média}}$	21,65	22,85	23,75	24,60
η_H [%]	8,7	9,4	10,4	11,1
η_C [%]	14,4	15,3	15,7	17,1
ρ_H [kg/m ³]	995,4	992,0	988,1	983,8
ρ_C [kg/m ³]	997,8	997,6	997,4	997,1
C_{pH} [J/kg.K]	4178,1	4178,4	4180,3	4183,6
C_{pC} [J/kg.K]	4180,7	4180,1	4179,7	4179,4
Q_e [W]	187,2	393,8	640,4	905,7
Q_a [W]	208,6	431,0	653,2	944,8
C_{EB}	1,11	1,09	1,02	1,04
$\eta_{\text{ média}}$ [%]	11,5	12,4	13,0	14,1
LMTD [°C]	9,15	17,58	25,80	33,89
U [W/m ² .K]	1023,1	1120,0	1240,9	1336,1

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 21,5$ °C; $P_a = 715$ mmHg.

Uma leitura do termopar T_{C2} indicou 96,2 °C (valor absurdo já que o aquecedor que representa a maior temperatura no circuito chega ao máximo a 60 °C), provavelmente erro

causado por algum problema com o termopar. O sistema foi reiniciado e tudo ocorreu perfeitamente nos testes seguintes.

Procedimento 3 - Vazão Paralela - Trocador de calor de Placas

1. Para se comparar os resultados dos trocadores de calor de Casco e tubo e trocador de calor de Placas, repetiu-se os procedimentos do experimento 2 para o modelo de Trocador de Placas da faculdade.

2. Conectou-se o trocador de calor de placas, segundo os procedimentos descritos anteriormente no capítulo, na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. A temperatura do tanque de aquecimento foi também fixada em 50 °C.

3. Repetiu-se o procedimento 1 para esse novo trocador de calor. Os resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de placas - Vazão Paralela

Trocador de Calor:	TD360b placas			
Conexão:	Paralela			
Temperatura do ambiente:	22,5 °C			
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]	32,2	41,5	51,5	61,6
T_{H2} [°C]	31,6	40,0	49,2	58,6
ΔT_H	0,6	1,5	2,3	3,0
T_H média	31,90	40,75	50,35	60,10
T_{C1} [°C]	22,6	22,8	22,9	23,0
T_{C2} [°C]	23,7	25,1	26,3	27,5
ΔT_C	1,1	2,3	3,4	4,5
T_C média	23,15	23,95	24,60	25,25
η_H [%]	6,3	8,0	8,0	7,8
η_C [%]	11,5	12,3	11,9	11,7
ρ_H [kg/m ³]	995,0	991,9	987,9	983,1
ρ_C [kg/m ³]	997,5	997,3	997,1	997,0
C_{pH} [J/kg.K]	4178,0	4178,4	4180,5	4184,2
C_{pC} [J/kg.K]	4180,0	4179,7	4179,4	4179,2
Q_e [W]	124,7	310,9	475,0	617,2
Q_a [W]	152,9	319,6	472,4	625,1
C_{EB}	1,23	1,03	0,99	1,01
η média [%]	8,9	10,2	10,0	9,7
LMTD [°C]	8,72	16,73	25,64	34,72
U [W/m ² .K]	715,1	929,3	926,2	888,9

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 22,5$ °C; $P_a = 715$ mmHg.

Procedimento 4 - Contra fluxo - Trocador de calor de Placas

1. Foi reconectado o trocador de calor de placas segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repetiu-se o procedimento 1 para esse novo regime de operação. Os resultados são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Variação da temperatura na alimentação de água quente no trocador de calor de placas - Contra Fluxo

Trocador de Calor:	TD360b placas			
Conexão:	Contra fluxo			
Temperatura do ambiente:	22,5 °C			
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]	31,5	42,0	51,6	61,6
T_{H2} [°C]	30,6	40,7	49,5	58,6
ΔT_H	0,9	1,3	2,1	3,0
T_H média	31,05	41,35	50,55	60,10
T_{C1} [°C]	22,4	22,5	22,5	22,2
T_{C2} [°C]	23,6	24,5	25,7	26,9
ΔT_C	1,2	2,0	3,2	4,7
T_C média	23,00	23,50	24,10	24,55
η_H [%]	9,9	6,7	7,2	7,6
η_C [%]	13,2	10,3	11,0	11,9
ρ_H [kg/m ³]	995,3	991,7	987,8	983,1
ρ_C [kg/m ³]	997,5	997,4	997,3	997,2
C_{pH} [J/kg.K]	4178,1	4178,5	4180,6	4184,2
C_{pC} [J/kg.K]	4180,0	4179,8	4179,6	4179,5
Q_e [W]	187,2	269,4	433,7	617,2
Q_a [W]	166,8	278,0	444,7	653,0
C_{EB}	0,89	1,03	1,03	1,06
η média [%]	11,5	8,5	9,1	9,8
LMTD [°C]	8,00	17,80	26,36	35,41
U [W/m ² .K]	1169,2	756,8	822,6	871,4

Observações durante a execução do experimento

Durante o experimento a temperatura e a pressão ambiente local foram checadas e se mantiveram consistentes ao longo do tempo, respectivamente $T_a = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_a = 715 \text{ mmHg}$.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Experimento 1 - O efeito da variação da vazão

Trocador de calor de Placas TD360b

Figura 19 - Resultados de vazão máxima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas

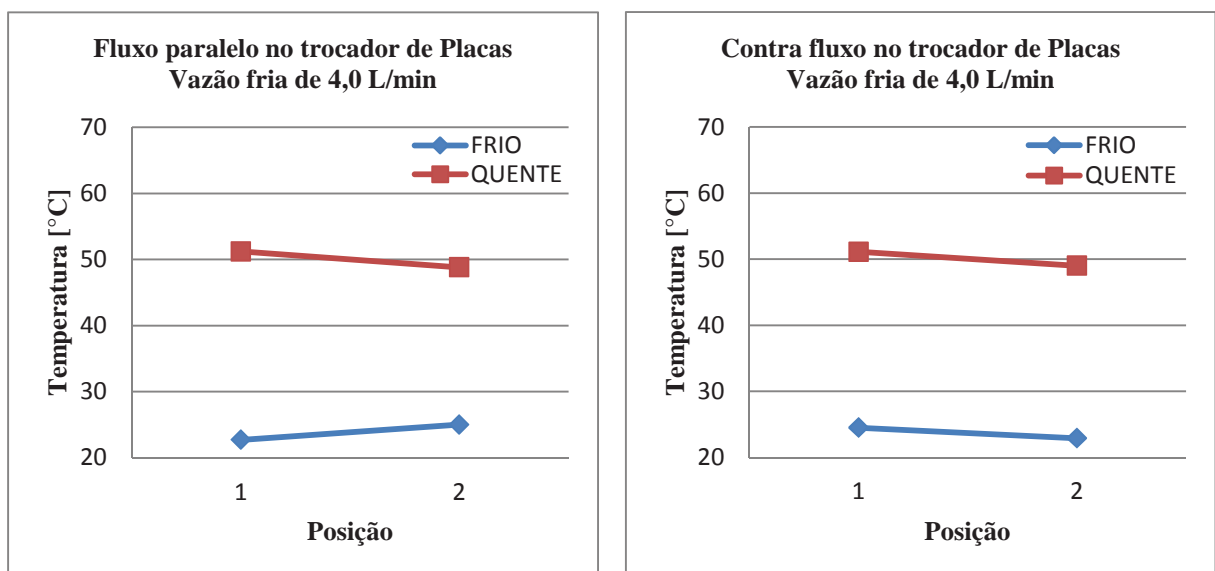


Figura 20 - Resultados de vazão mínima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas

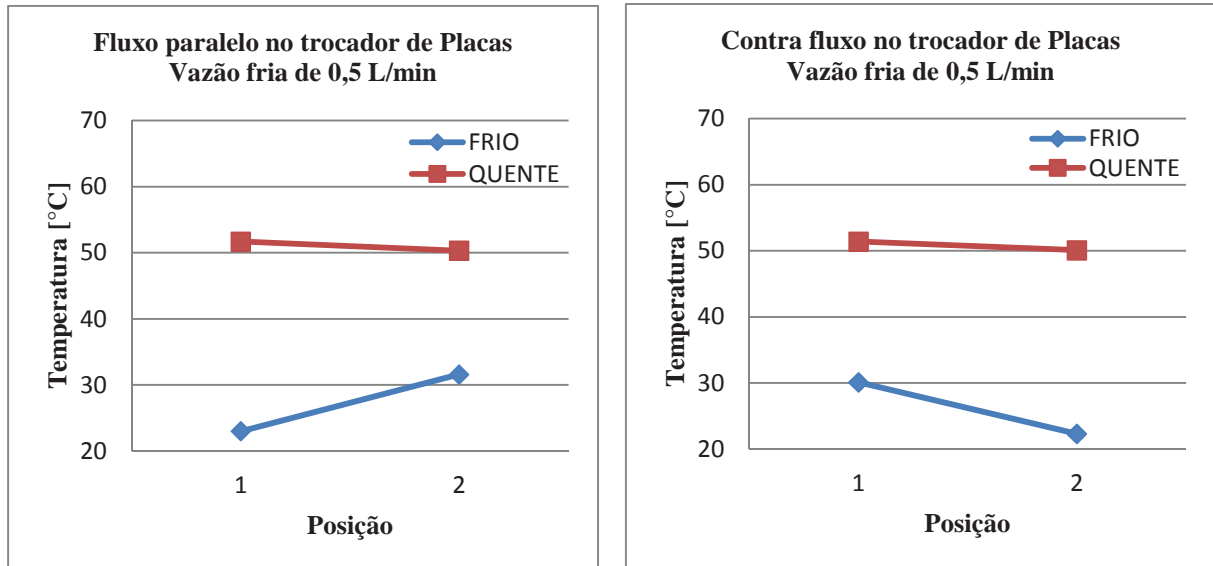


Tabela 10 - Resultados gerais para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas

TD360b Placas	Fluxo paralelo		Contra fluxo	
	Frio = 4,0 L/min	Frio = 0,5 L/min	Frio = 4,0 L/min	Frio = 0,5 L/min
Eficiência média da temperatura (%)	8,2	17,4	6,6	15,6
Coefficiente de transferência de calor ($W/m^2 \cdot K$)	950,4	619,1	824,4	553,1

Figura 21 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas

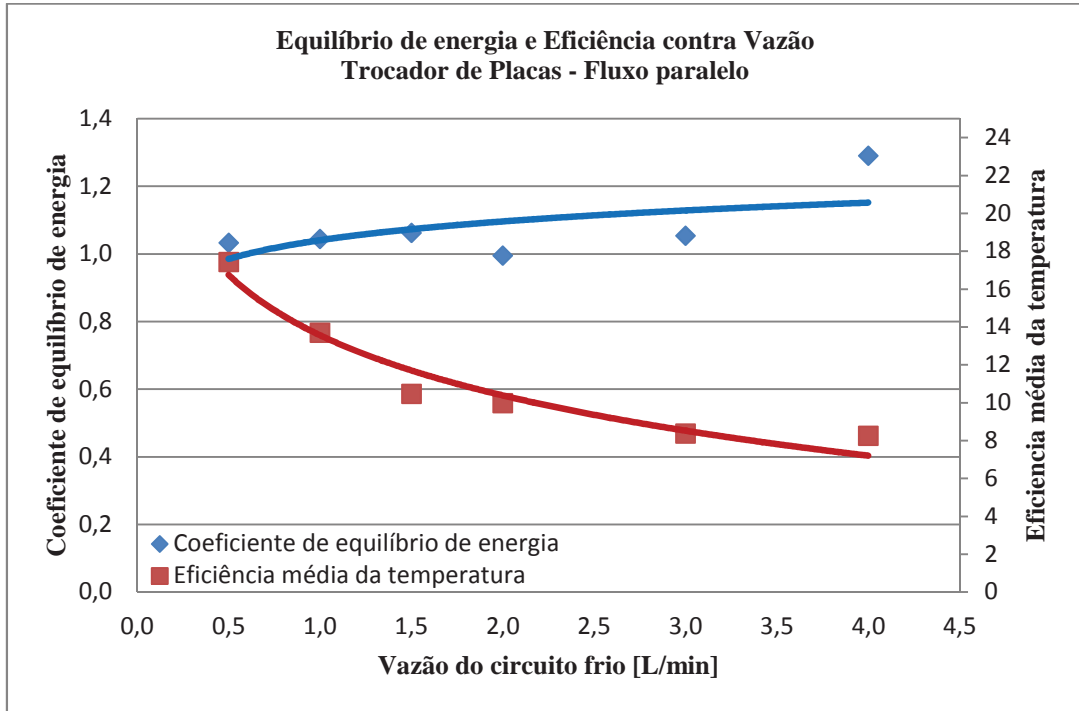
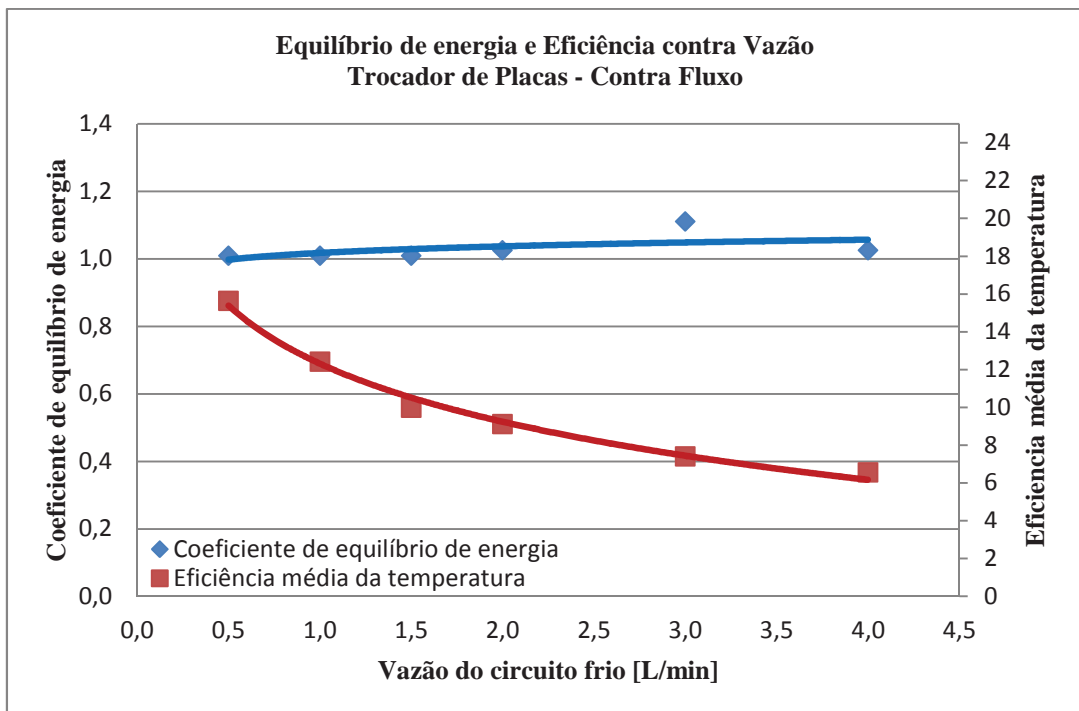


Figura 22 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Placas



Trocador de calor de Casco e Tubo TD360c

Figura 23 - Resultados de vazão máxima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo

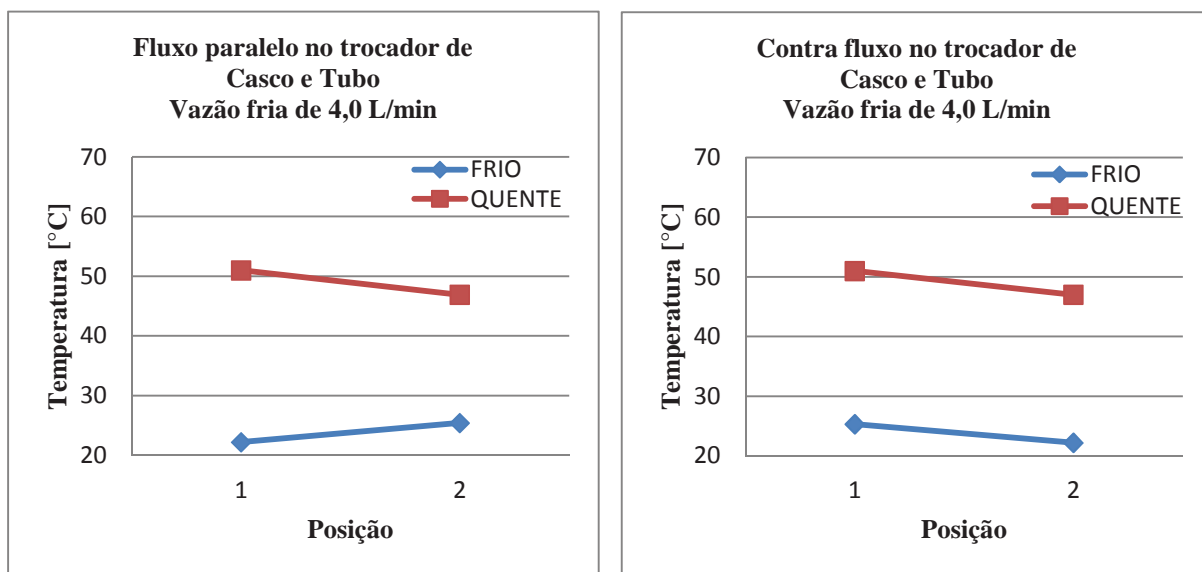


Figura 24 - Resultados de vazão mínima para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo

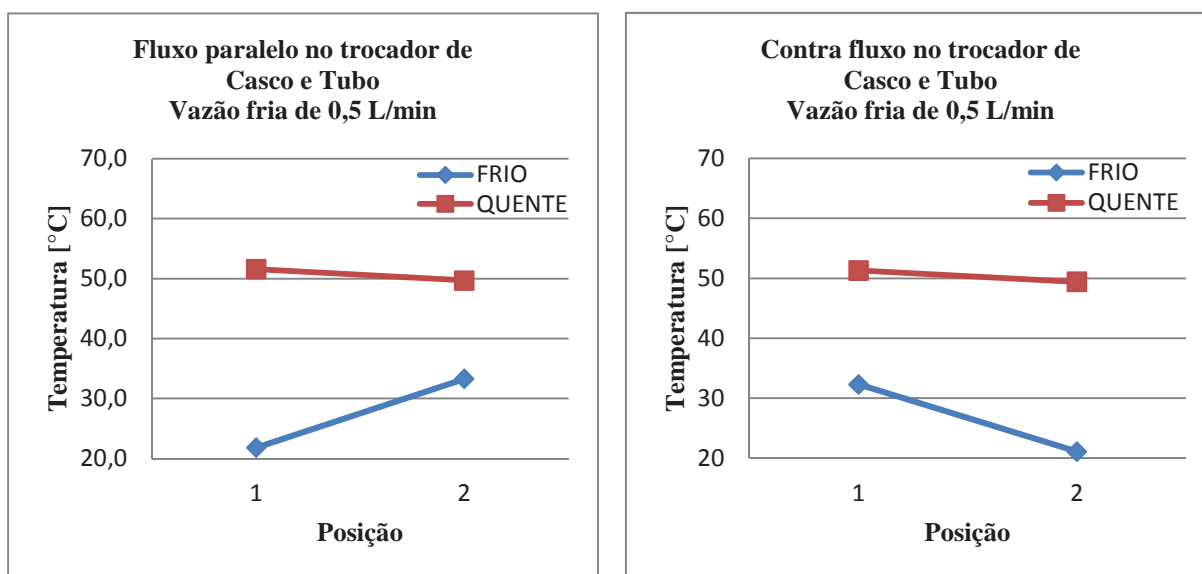


Tabela 11 - Resultados gerais para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo

TD360c Casco e Tubo	Fluxo paralelo		Contra fluxo	
	Frio = 4 L/min	Frio = 0,5 L/min	Frio = 4 L/min	Frio = 0,5 L/min
Eficiência média da temperatura (%)	12,7	22,5	12,3	21,7
Coefficiente de transferência de calor (W/m ² .K)	1696,3	874,4	1647,7	851,9

Figura 25 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo

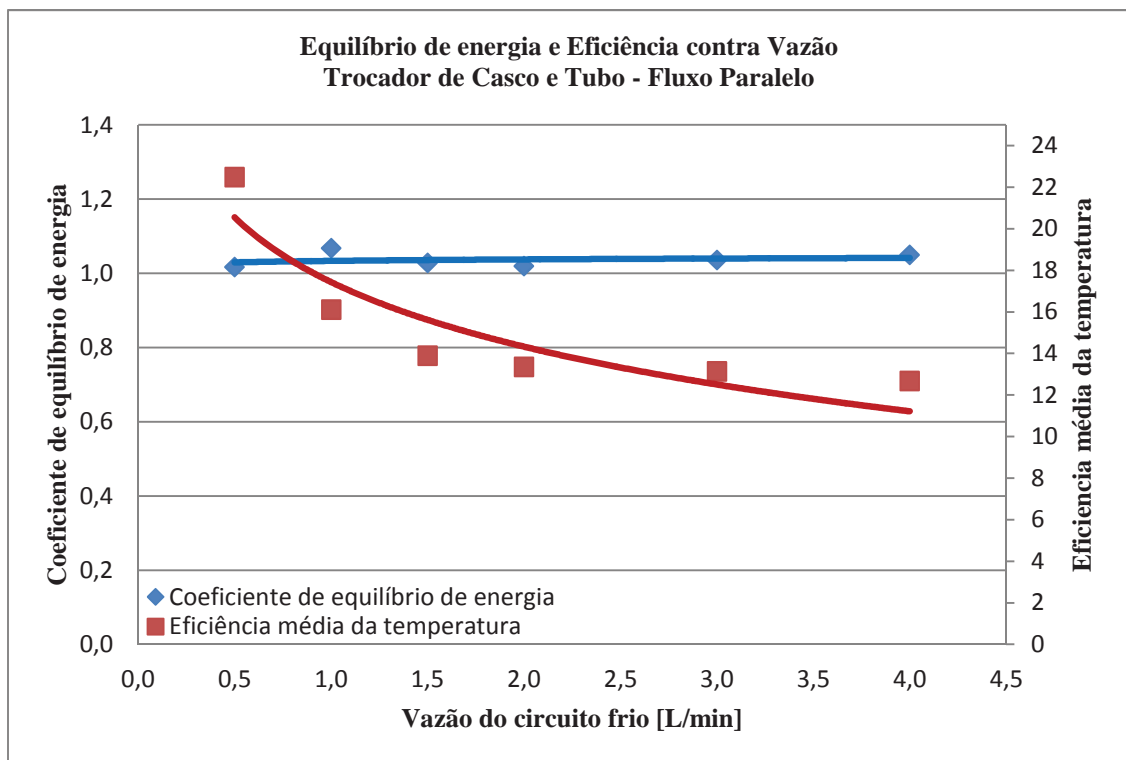
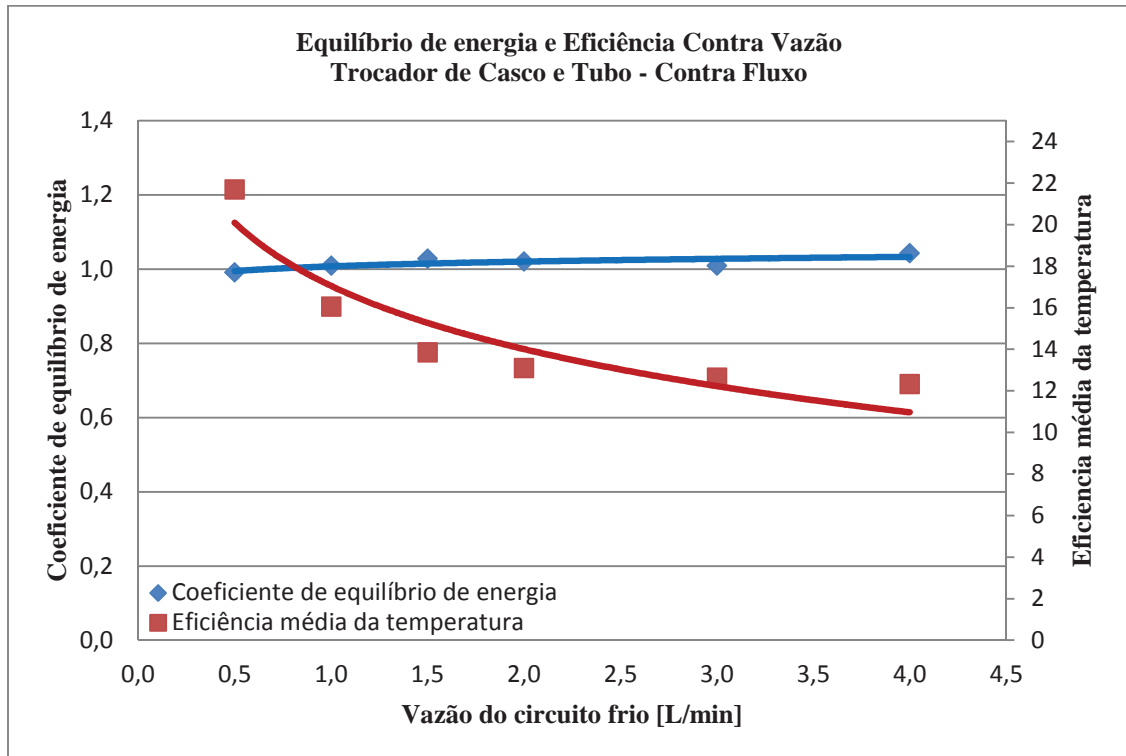


Figura 26 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 1 - Trocador de calor de Casco e Tubo



4.4.2 Experimento 2 - O efeito da variação da temperatura

Trocador de calor de Placas TD360b

Figura 27 - Resultados de temperatura mais baixa no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas

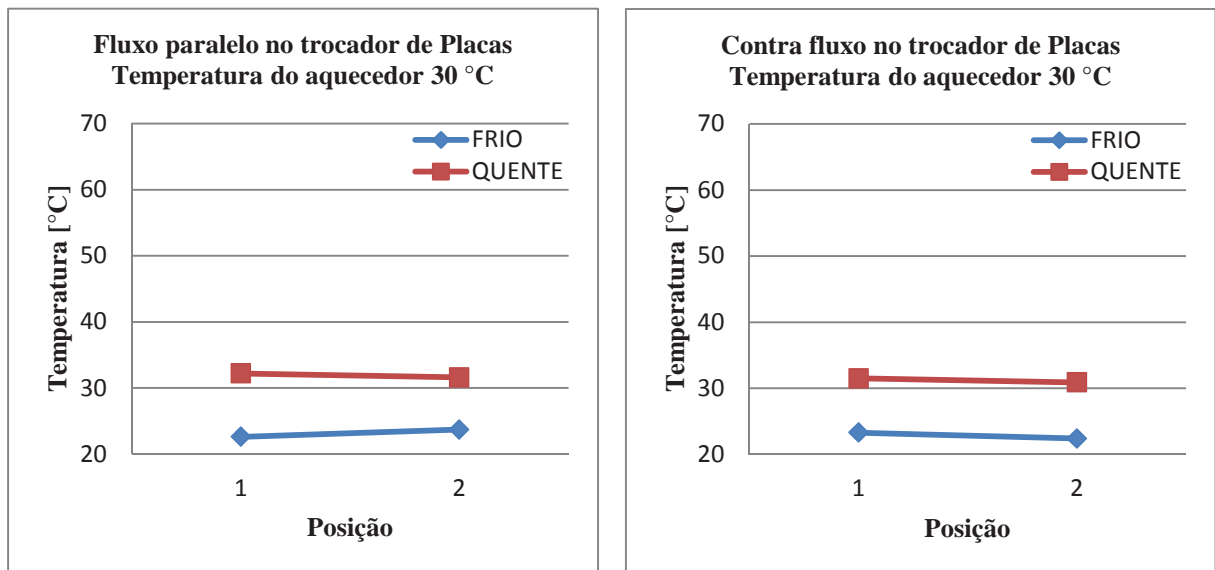


Figura 28 - Resultados de temperatura mais alta no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas

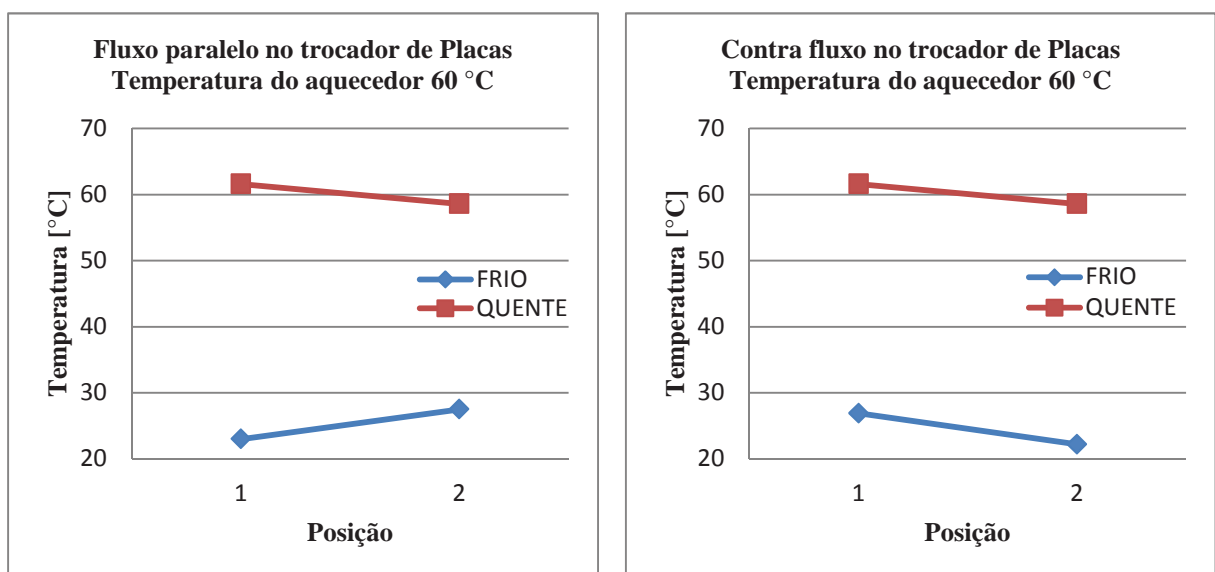


Tabela 12 - Resultados gerais para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas

TD360b Placas	Fluxo paralelo		Contra fluxo	
	Aquecedor = 30 °C	Aquecedor = 60 °C	Aquecedor = 30 °C	Aquecedor = 60 °C
Eficiência média da temperatura (%)	8,9	9,7	8,2	9,8
Coefficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$)	715,1	888,9	749,2	871,4

Figura 29 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas

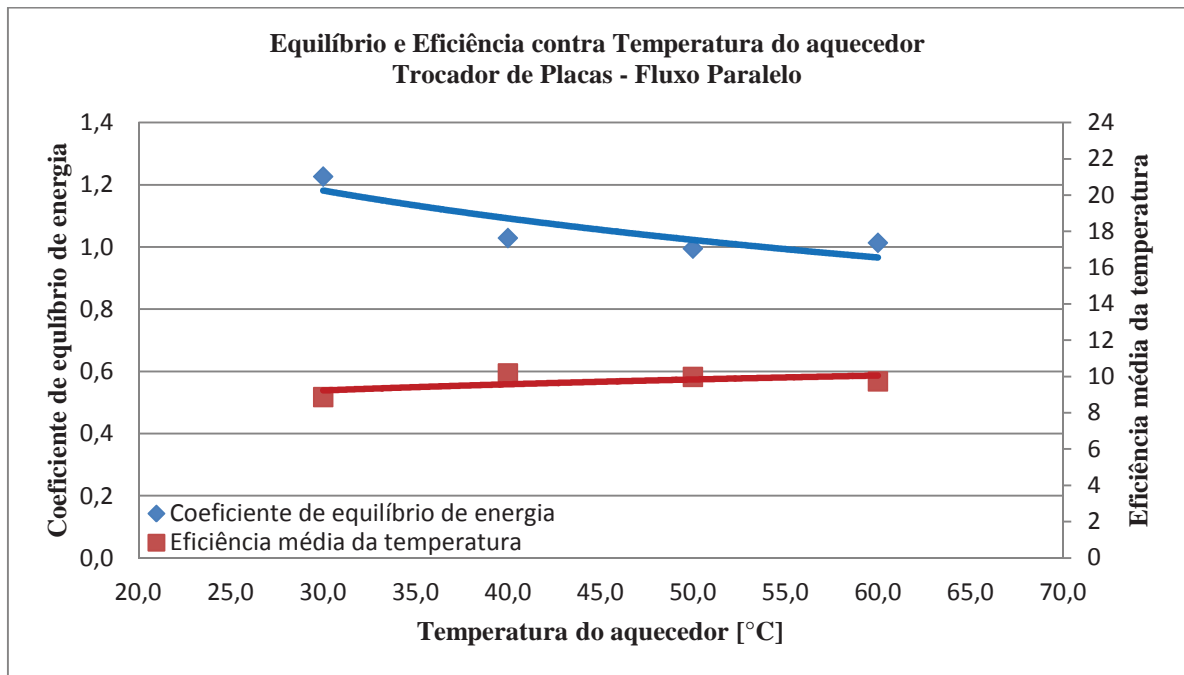
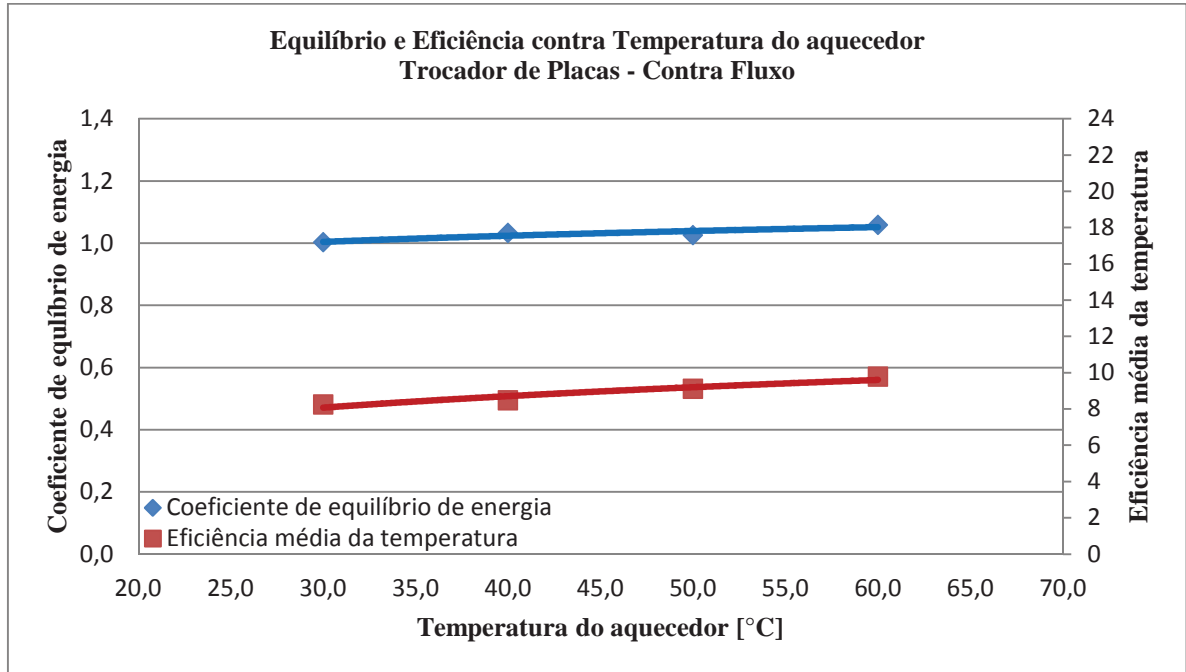


Figura 30 - Resultados gerais do Contra Fluxo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Placas



Trocador de calor de Casco e Tubo TD360c

Figura 31 - Resultados de temperatura mais baixa no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo

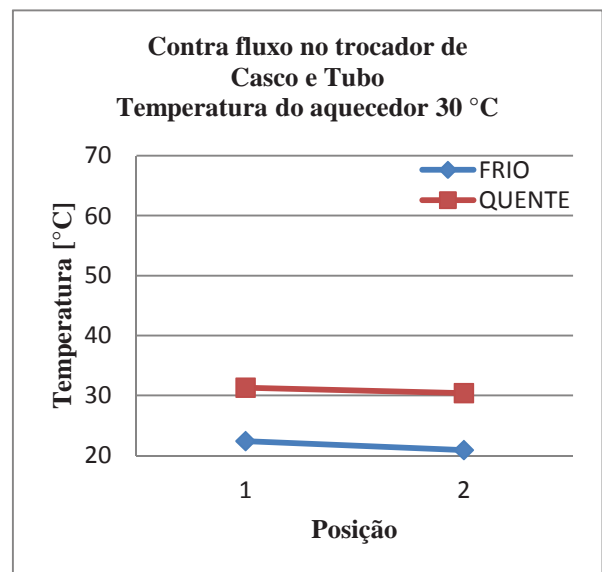
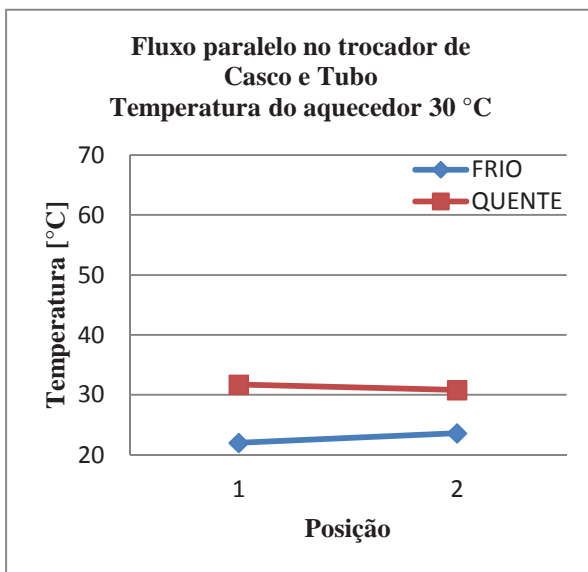


Figura 32 - Resultados de temperatura mais alta no aquecedor para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo

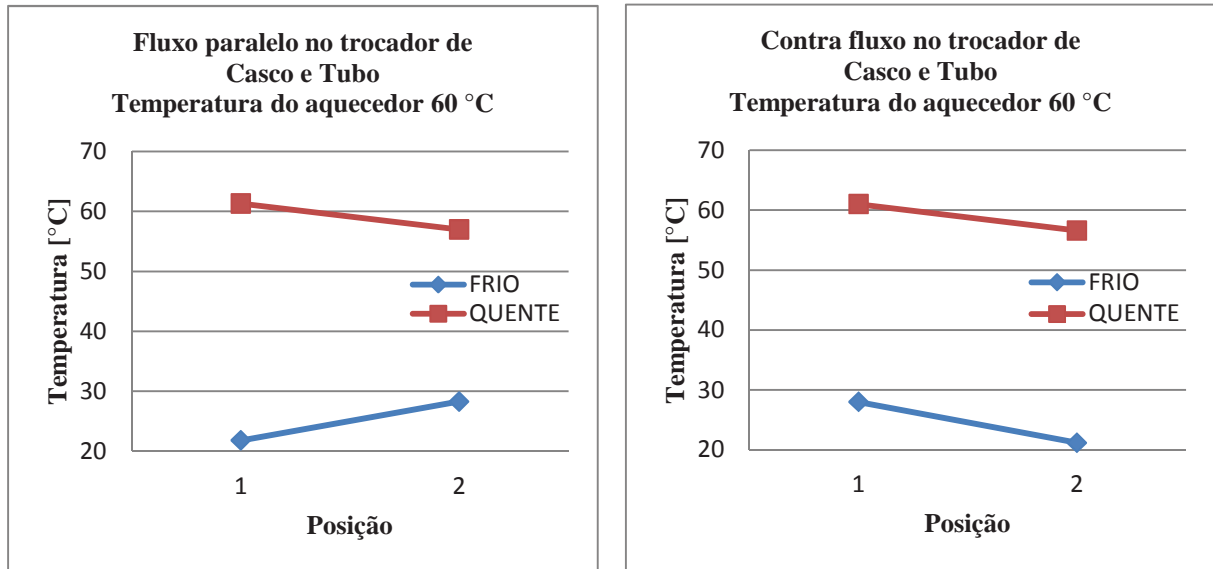


Tabela 13 - Resultados gerais para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo

TD360c Casco e Tubo	Fluxo paralelo		Contra fluxo	
	Aquecedor = 30 °C	Aquecedor = 60 °C	Aquecedor = 30 °C	Aquecedor = 60 °C
Eficiência média da temperatura (%)	12,9	13,7	11,5	14,1
Coeficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$)	1115,6	1308,6	1023,1	1336,1

Figura 33 - Resultados gerais do Fluxo paralelo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo

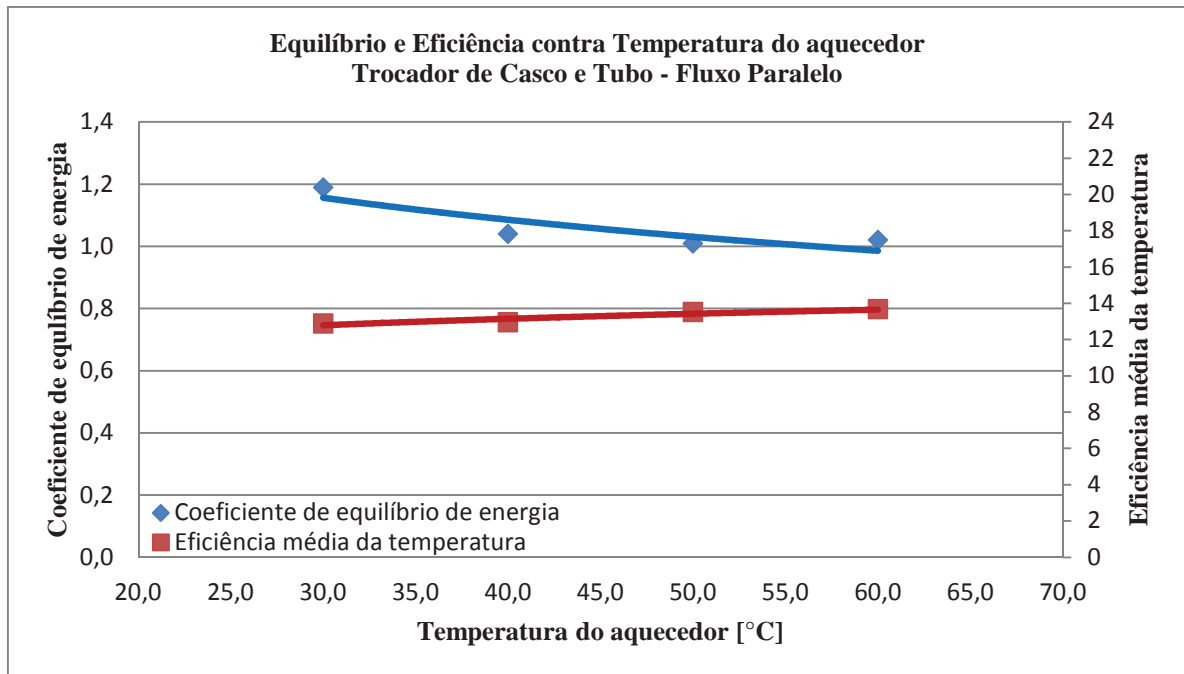
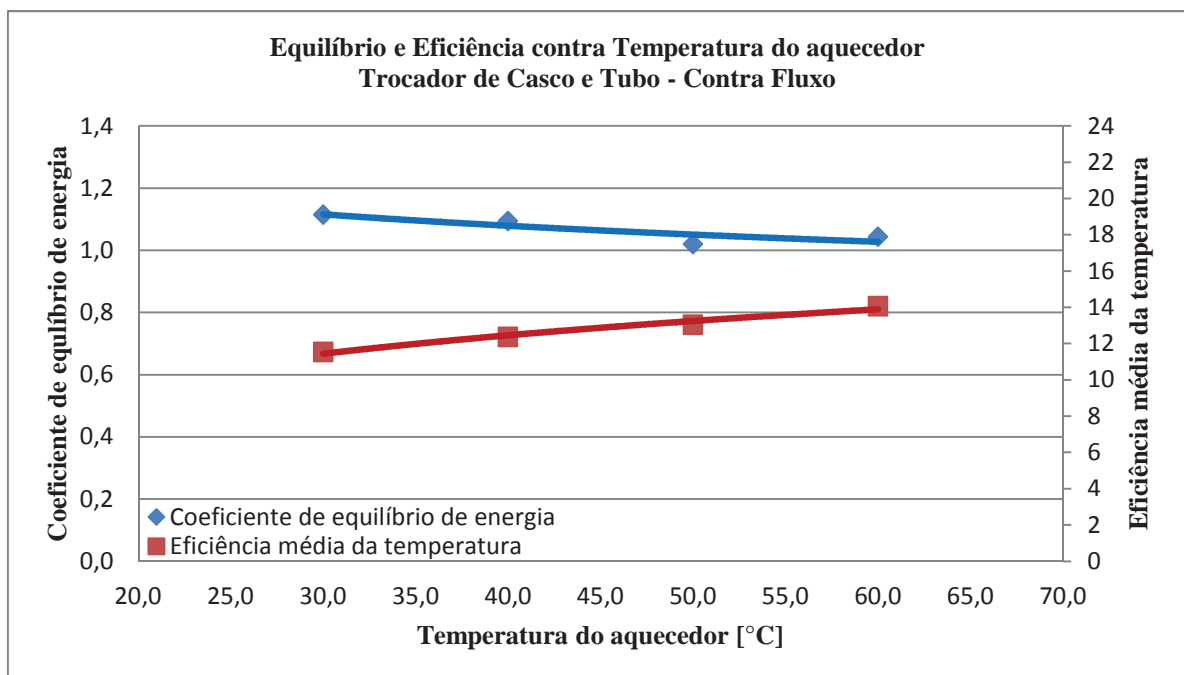


Figura 34 - Resultados gerais do Contra fluxo para o Experimento 2 - Trocador de calor de Casco e Tubo



5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma comparação entre todos os resultados do Experimento 1

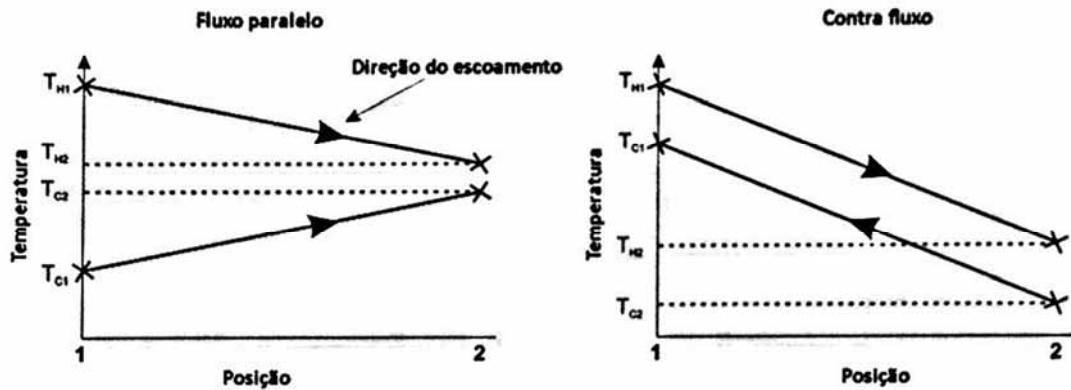
Analisando, a eficiência média da temperatura se mostrou maior para vazões menores, pois o fluido permaneceu mais tempo dentro do trocador de calor, conseqüentemente, absorveu mais calor.

Apesar da vazão ter interferência na transferência de calor, a direção do escoamento não foi significativa nesse coeficiente. Isto ocorre porque o coeficiente de transferência de calor depende parcialmente das propriedades do material (que permaneceu constante) e da camada limite térmica, que muda com a velocidade do fluido (depende da vazão). Outro fator que não permitiu diferenças significativas entre o fluxo paralelo e o contra fluxo foi o valor similar da temperatura média para o circuito de água quente e água fria.

A vantagem do contra fluxo é que ele permite que a temperatura de saída da água quente (T_{H2} , nesse caso) possa ser menor do que a temperatura de entrada da água fria (T_{C1} , nesse caso). Para o fluxo paralelo isso não acontece, já que a saída de água quente sempre tem uma temperatura mais alta do que a saída de água fria. A Figura 35, a seguir, ilustra bem os casos onde a eficiência média da temperatura para o fluxo paralelo é efetivamente limitada a 50% (excluindo a transferência de calor externa), e o contra fluxo pode teoricamente exceder 100%.

Nos trocadores de calor simples, como os trocadores didáticos do laboratório, não há transferência de calor suficiente para observar isto acontecendo.

Figura 35 - A Diferença entre o Fluxo Paralelo e o Contra Fluxo



Fonte: (INCROPERA, 2008).

O benefício do trocador de calor de Casco e Tubos é que ele é mais eficiente para uma mesma área de troca de calor. O trocador de calor de Placas é comparativamente menos efetivo do que o de tipo Casco e Tubo, mas a vantagem do trocador de Placas é ser mais compacto e robusto.

Uma comparação entre todos os resultados do Experimento 2

A eficiência média da temperatura melhorou para temperaturas mais quentes da água no aquecedor, pois forneceu uma maior diferença de temperatura e transferiu mais calor.

A temperatura da água quente também afetou o coeficiente de transferência de calor. Já a direção do escoamento não pareceu afetar o coeficiente porque a transferência de calor depende das propriedades do material (que permaneceu constante) e da camada limite térmica, que muda com a temperatura do fluido.

Um fator que não permitiu diferenças significativas entre o fluxo paralelo e o contra fluxo foi o valor similar da temperatura média para o circuito de água quente e água fria. A explicação que foi feita no experimento 1 da vantagem de um tipo de escoamento sobre o outro também se aplica ao experimento 2.

Novamente, o trocador de calor de Placas é comparativamente menos efetivo do que o de tipo Casco e Tubo. A vantagem do trocador de Placas é ser mais compacto e robusto.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram comparados os trocadores de calor utilizados no laboratório de sistemas térmicos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Para o estudo, inicialmente foram apresentados os trocadores de calor didáticos utilizados no laboratório juntamente com seus procedimentos e particularidades de operação, nessa etapa pode ser visto que os equipamentos são de fácil entendimento e de fácil manuseio, não apresentando problema nessa etapa.

Foi realizada uma análise comparativa dos dois tipos de trocadores de calor: tipo placas, operando em fluxo paralelo e em contra fluxo, e o tipo casco e tubo também operando em fluxo paralelo e em contra fluxo; e definiu se o comportamento desses trocadores de calor para as diferentes variáveis. Foi concluído que os resultados do trocador de calor do tipo casco e tubo, utilizado no laboratório de sistemas térmicos, são superiores para todas as condições analisadas, no entanto, foi mostrado que o trocador de Placas possui algumas vantagens dependendo da aplicação.

A efetividade de troca de calor no regime de fluxo paralelo é praticamente idêntica ao regime de contra fluxo. Esperava-se demonstrar resultados melhores no regime de contra fluxo, mas as condições de operação desses trocadores de calor simples não alcançam troca de calor suficiente para apresentar diferenças significativas.

Foi possível demonstrar o efeito resultante da variação da vazão e da variação da temperatura de forma consistente nos dois trocadores. Dessa forma é possível observar que se forem combinados os melhores resultados de cada experimento, obtém-se a melhor eficiência térmica para esses tipos de trocador.

É possível imaginar também que se invés de possuírem a mesma área média de transferência de calor, possuísem aproximadamente as mesmas dimensões externas, o trocador de placas deveria se sair melhor nos resultados dos dois experimentos.

Com isto, conclui-se que os experimentos com esses trocadores têm um grande potencial no desenvolvimento dos alunos dentro do assunto de eficiência e sistemas térmicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDERETES, C.; Maiocchi, M. **Intercambiadores de Calor de Placas, Cálculo y Selección de Equipos**, 25f. Facultad Regional Resistencia, 2002.

ALFA LAVAL, **Série M de Trocadores de Calor a Placas Pintados**, Catálogo comercial.

ALFA LAVAL, **The Teory behind heat transfer**, Informativo técnico.

APV, **APV Heat Transfer Handbook A History Of Excellence**, Informativo técnico, SPX Corporation, Getzville, Nova York, 2008.

ARAÚJO, E. C. C. **Trocadores de Calor**. São Carlos: EdUFSCar, 2002.

ESTEVES, A. C. **Desenvolvimento de modelo matemático de trocador de calor tipo casco-tubos**, 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Engenharia de Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, São Paulo, 2009.

FELICIO, R. S. **Dimensionamento de trocadores de calor aplicados à refrigeração da água do molde de um processo de lingotamento contínuo**. 2012. 92f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

FERNANDES, C. S. V. **Optimização de Projecto e Desempenho de Permutadores de Calor de Placas Para Fluidos Alimentares**, 184f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Polímeros – Processamento e Projecto de Materiais Poliméricos – Universidade do Minho, 2009.

GUT, J. A. W. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas**, 268f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HEWITT, G. F. **Heat Exchanger. Design handbook 2008**. executive editor. p cm.

HEWITT, G. F.; Shires, G. L.; Bott, T. R. **Process Heat Transfer**, Florida, Estados Unidos: CRC Press, 1993.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KAKAÇ, S. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. Florida: CRC PRESS, 2002. Ed.2 p.501.

Kern, D. Q. **Processos de Transmissão de Calor**, Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1980.

NOVA DIDACTA, **TD360 Bancada de Trocadores de Calor**, Manual de Operação.

SHAH, R. K.; Sekulic, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**, New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2003.

SPINOLA, F. G. **Estudo de Parâmetros de Projeto de Trocadores de Calor**, 81f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo, 2010.

TRANter, **Heat Exchanger in The Basic Metals Industry**, Informativo técnico, Texas, EUA, 1999.

8 ANEXOS

**Roteiros propostos para realização de experimentos com trocadores de calor tipo Casco e
Tubo e tipo Placa.**

**ANEXO 1 – Roteiro 1 para utilização em ensaios na faculdade de engenharia de
Guaratinguetá**

LABORATÓRIO N°. __ - TROCADORES DE CALOR – Variação da Vazão

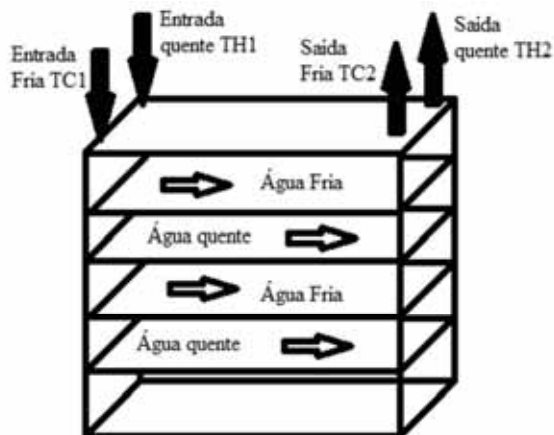
NOME	NÚMERO	TURMA	ASSINATURA

1 - INTRODUÇÃO:

Trocador de calor por Placas (TD360b)

O trocador de calor por placas consiste em camadas de placas de metal separadas por juntas (ou espaçadores). As placas e juntas possuem furos, permitindo aos circuitos de água quente e de água fria passagem alternada através das placas. Os circuitos são completamente separados, mas o calor é transferido através deles por intermédio das placas de metal. A principal vantagem deste trocador é seu tamanho compacto aliado com sua eficiência, tornando-o bom para aplicações com espaço limitado.

Figura 1 – Funcionamento do Trocador de Calor de Placas (fluxo paralelo)



Como Funciona o Trocador de Calor por Placas

O desempenho desse trocador de calor depende do tamanho e da quantidade de placas que o compõe. Mais placas significa mais área de transferência de calor, no entanto também é aumentada a resistência ao escoamento. Os trocadores de calor comerciais por placas possuem

placas com formas de espinha de peixe conformadas na sua superfície para aumentar a área superficial de troca de calor e causar um maior distúrbio durante o escoamento, possibilitando assim, uma melhor troca de calor. No caso do trocador de calor por placas utilizado nos experimentos, as placas possuem pequenos rebaixos para causar distúrbios ao escoamento, executando a mesma tarefa que as formas de espinha de peixe no trocador comercial.

Um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostra aos estudantes como conectar o trocador de calor corretamente.

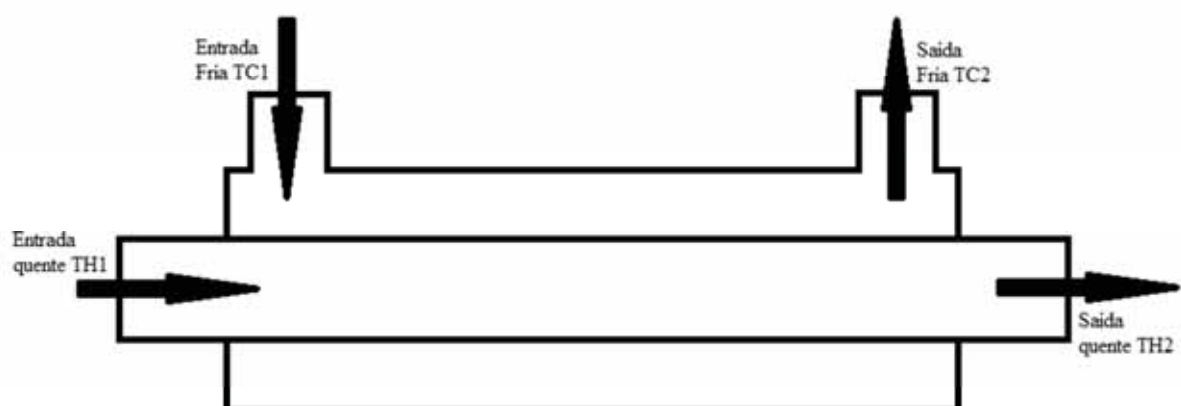
Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c)

O trocador de calor de casco e tubo é o mais comumente utilizado nas indústrias, especialmente em refinarias de petróleo e em indústrias químicas.

Ele consiste em um grande tubo (a casco) que circunda vários tubos menores no seu interior. Um circuito de água passa através dos tubos menores, enquanto o outro passa através da casco, por fora destes tubos, transferindo o calor entre eles. Os tubos menores possuem defletores que ajudam a criar um escoamento turbulento dentro da casco.

Esse modelo também possui um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostrando aos estudantes como conectar o trocador de calor.

Figura 2 – Funcionamento do Trocador de Calor de Casco e Tubos (fluxo paralelo)



2 - OBJETIVO:

Para os casos de fluxo contrário e fluxo paralelo, mostrar e comparar resultados de como a variação das taxas de vazão de água afetam o desempenho do trocador de calor.

3 - EXPERIÊNCIA:

Procedimento 1 - Vazão paralela

1. Para que seja verificada apenas a influência da variação da vazão no experimento, será apenas variada a vazão de água fria, as outras possíveis variáveis, como a vazão de água quente e a temperatura do aquecedor, serão fixas.
2. Conecte o trocador de calor na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. A temperatura do tanque de aquecimento será fixada em 50 °C.
3. Utilize o termômetro e o barômetro do laboratório para verificar a temperatura do ar e a pressão ambiente local, respectivamente, para usar como referência nos cálculos.
4. Utilize as válvulas de controle de vazão operadas manualmente para fixar a vazão de água quente (fixada em 3 litros por minuto) e ajustar as diferentes vazões de água fria como mostrado na Tabela 1. Para cada vazão diferente de água fria aguarde cerca de 5 minutos para que as temperaturas e vazões se estabilizem no trocador de calor.
5. Anote as temperaturas do circuito de água quente e do circuito de água fria.

Tabela 1 – Variação da vazão de água fria – Fluxo paralelo

Trocador de calor:				
Pressão ambiente:				
Temperatura do ambiente:				
Temperatura do tanque de aquecimento:				
Teste	1	2	3	4
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	3,0	2,0	1,0	0,5
T_{H1} [°C]				
T_{H2} [°C]				
ΔT_H				
T_H média				
T_{C1} [°C]				
T_{C2} [°C]				
ΔT_C				
T_C média				
η_H				
η_C				
Q_e [W]				
Q_a [W]				
C_{EB}				
η média				
LMTD [°C]				
U [W/m ² .K]				

Nota: Na variação de um ponto para o outro, esperar por volta de 5 min. para estabilizar.

Procedimento 2 – Contra fluxo

1. Reconecte o trocador de calor segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repita o procedimento 1 para esse novo regime de operação.

Tabela 2 – Variação da vazão de água fria – Contra fluxo

Trocador de calor:				
Pressão ambiente:				
Temperatura do ambiente:				
Temperatura do tanque de aquecimento:				
Teste	1	2	3	4
Vazão quente [L/min]	3,0	3,0	3,0	3,0
Vazão fria [L/min]	3,0	2,0	1,0	0,5
T_{H1} [°C]				
T_{H2} [°C]				
ΔT_H				
T_H média				
T_{C1} [°C]				
T_{C2} [°C]				
ΔT_C				
T_C média				
η_H				
η_C				
Q_e [W]				
Q_a [W]				
C_{EB}				
η média				
LMTD [°C]				
U [W/m ² .K]				

Nos cálculos é necessário utilizar a vazão em metros cúbicos por segundo (m³/s).

Conversão 10 L/min = 0,0001667 m³/s

**ANEXO 2 – Roteiro 2 para utilização em ensaios na faculdade de engenharia de
Guaratinguetá**

**LABORATÓRIO Nº. __ - TROCADORES DE CALOR – Variação da
Temperatura**

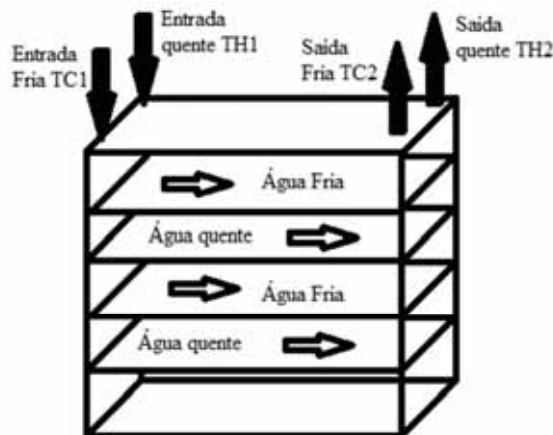
NOME	NÚMERO	TURMA	ASSINATURA

1 - INTRODUÇÃO:

Trocador de calor por Placas (TD360b)

O trocador de calor por placas consiste em camadas de placas de metal separadas por juntas (ou espaçadores). As placas e juntas possuem furos, permitindo aos circuitos de água quente e de água fria passagem alternada através das placas. Os circuitos são completamente separados, mas o calor é transferido através deles por intermédio das placas de metal. A principal vantagem deste trocador é seu tamanho compacto aliado com sua eficiência, tornando-o bom para aplicações com espaço limitado.

Figura 1 – Funcionamento do Trocador de Calor de Placas (fluxo paralelo)



Como Funciona o Trocador de Calor por Placas

O desempenho desse trocador de calor depende do tamanho e da quantidade de placas que o compõe. Mais placas significa mais área de transferência de calor, no entanto também é aumentada a resistência ao escoamento. Os trocadores de calor comerciais por placas possuem

placas com formas de espinha de peixe conformadas na sua superfície para aumentar a área superficial de troca de calor e causar um maior distúrbio durante o escoamento, possibilitando assim, uma melhor troca de calor. No caso do trocador de calor por placas utilizado nos experimentos, as placas possuem pequenos rebaixos para causar distúrbios ao escoamento, executando a mesma tarefa que as formas de espinha de peixe no trocador comercial.

Um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostra aos estudantes como conectar o trocador de calor corretamente.

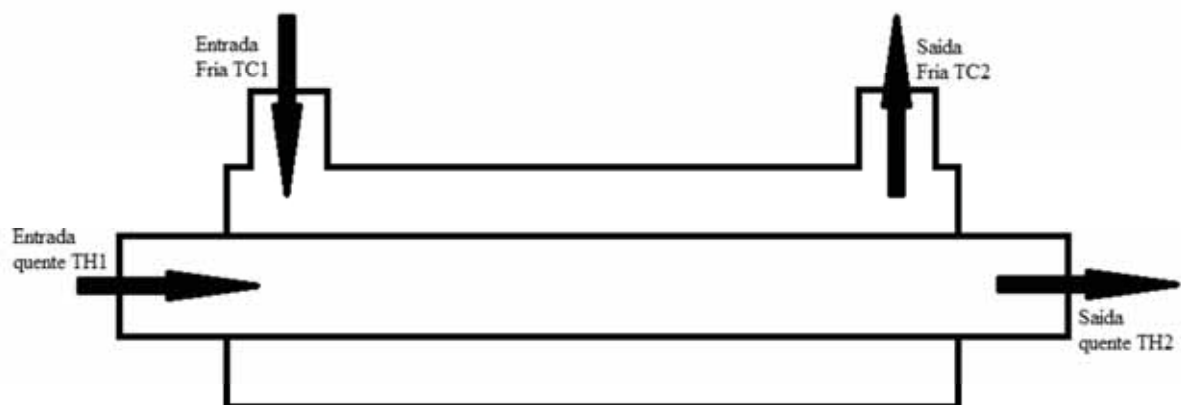
Trocador de Calor de Casco e Tubos (TD360c)

O trocador de calor de casco e tubo é o mais comumente utilizado nas indústrias, especialmente em refinarias de petróleo e em indústrias químicas.

Ele consiste em um grande tubo (a casco) que circunda vários tubos menores no seu interior. Um circuito de água passa através dos tubos menores, enquanto o outro passa através da casco, por fora destes tubos, transferindo o calor entre eles. Os tubos menores possuem defletores que ajudam a criar um escoamento turbulento dentro da casco.

Esse modelo também possui um diagrama na placa de suporte do trocador de calor mostrando aos estudantes como conectar o trocador de calor.

Figura 2 – Funcionamento do Trocador de Calor de Casco e Tubos (fluxo paralelo)



2 - OBJETIVO:

Para os casos de fluxo contrário e fluxo paralelo, mostrar e comparar resultados de como as diferentes temperaturas de alimentação de água quente afetam o desempenho do trocador de calor.

3 - EXPERIÊNCIA:

Procedimento 1 - Fluxo paralelo

1. Para que seja verificada apenas a influência da variação da temperatura no experimento, será apenas variada a temperatura de alimentação de água quente no circuito, as outras possíveis variáveis como a vazão de água quente e de água fria, serão fixas.

2. Conecte o trocador de calor, segundo os procedimentos descritos na configuração apropriada para experimentos com fluxo paralelo. As vazões de água quente e fria são fixadas em 3 L/min e 2 L/min, respectivamente.

3. Use o termômetro e o barômetro do laboratório para verificar a temperatura do ar e a pressão ambiente local, respectivamente, para usar como referência nos cálculos.

4. Utilize as válvulas de controle de vazão operadas manualmente para fixar a vazão de água quente (fixada em 3 litros por minuto) e a vazão de água fria (fixada em 2 litros por minuto), em seguida, para cada teste ajuste a temperatura do tanque de aquecimento que alimenta o circuito de água quente, como mostrado na Tabela 1.

5. Anote as temperaturas do circuito de água quente e do circuito de água fria.

Tabela 1 – Variação da temperatura do aquecedor – Fluxo paralelo

Trocador de Calor:				
Pressão ambiente:				
Temperatura do ambiente:				
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]				
T_{H2} [°C]				
ΔT_H				
T_H média				
T_{C1} [°C]				
T_{C2} [°C]				
ΔT_C				
T_C média				
η_H				
η_C				
Q_e [W]				
Q_a [W]				
C_{EB}				
η média				
LMTD [°C]				
U [W/m ² .K]				

Nota: Na variação de um ponto para o outro, esperar por volta de 5 min. para estabilizar.

Procedimento 2 – Contra fluxo

1. Reconecte o trocador de calor segundo o diagrama indicado de contra fluxo e repita o procedimento 1 para esse novo regime de operação.

Tabela 2 – Variação da temperatura do aquecedor – Contra fluxo

Trocador de Calor:				
Pressão ambiente:				
Temperatura do ambiente:				
Vazão quente:	3	L/min		
Vazão fria:	2	L/min		
Teste	1	2	3	4
Temperatura do aquecedor [°C]	30,0	40,0	50,0	60,0
T_{H1} [°C]				
T_{H2} [°C]				
ΔT_H				
T_H média				
T_{C1} [°C]				
T_{C2} [°C]				
ΔT_C				
T_C média				
η_H				
η_C				
Q_e [W]				
Q_a [W]				
C_{EB}				
η média				
LMTD [°C]				
U [W/m ² .K]				

Nos cálculos é necessário utilizar a vazão em metros cúbicos por segundo (m³/s).

$$\text{Conversão } 10 \text{ L/min} = 0,0001667 \text{ m}^3/\text{s}$$

ANEXO 3 – Base de cálculos para utilização nos roteiros em ensaios na faculdade de engenharia de Guaratinguetá

ENSAIO TROCADORES DE CALOR - BASE DE CALCULOS

Para encontrar a temperatura média do circuito frio:

$$T_{C \text{ média}} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2}$$

Para encontrar a temperatura média do circuito quente:

$$T_{H \text{ média}} = \frac{T_{H1} + T_{H2}}{2}$$

Calor específico com pressão constante (Cp)

O calor específico consiste na quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de exatamente 1 kg de material em 1 grau (Celsius). Ela é a razão entre a mudança de energia térmica e a mudança de temperatura.

Utilize $C_{pH} = C_{pC} = 4179,91 \text{ [J/kg.K]}$ (valores médios encontrados no experimento)

Densidade (ρ)

Quando a temperatura da água muda, sua densidade muda levemente. Sua densidade máxima está em aproximadamente 4 graus Celsius e diminui quando a temperatura aumenta ou diminui com base neste valor.

Utilize $\rho_H = 987,82 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ e $\rho_C = 996,97 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ (valores médios encontrados no experimento)

Transferência de calor, Equilíbrio de energia e Eficiências.

Os trocadores de calor, o calor se transfere ou escoar do circuito de água quente para o circuito de água fria. A taxa de transferência de calor é uma função da taxa de vazão mássica do fluido, da mudança de temperatura e do calor específico do fluido (na temperatura média).

$$\dot{Q} = m \times c_p \times \Delta T$$

Se a equação for rearranjada para vazão volumétrica, temos:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e = \dot{Q}_a = V_H \times \rho_H \times c_{p_H} \times \Delta T_H = V_C \times \rho_C \times c_{p_C} \times \Delta T_C$$

Nos cálculos é necessário utilizar a vazão em metros cúbicos por segundo (m^3/s).

O Coeficiente de Equilíbrio de Energia (C_{EB})

Mostra a relação entre a energia absorvida e a energia emitida, onde:

$$C_{EB} = \frac{Q_a}{Q_e}$$

Mas, por causa do escoamento possível de calor para dentro ou para fora do sistema, o coeficiente de equilíbrio de energia pode fornecer valores maiores do que 1 caso o trocador de calor absorva energia do ambiente externo. Assim, ele serve somente como um guia porque na realidade:

$$Q_e = Q_a \pm \text{Perdas ou ganhos do ambiente externo}$$

A eficiência da temperatura do circuito quente do trocador de calor consiste na razão entre a mudança de temperatura no circuito quente, dividida pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima dos circuitos quente e frio:

$$\eta_H = \frac{T_{H1} - T_{H2}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100$$

A eficiência da temperatura do circuito frio do trocador de calor consiste na razão entre a mudança de temperatura no circuito frio, dividida pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima dos circuitos quente e frio:

$$\eta_C = \frac{T_{C2} - T_{C1}}{T_{H1} - T_{C1}} \times 100$$

A eficiência média da temperatura dos dois circuitos consiste na eficiência média dos dois:

$$\eta_{m\u00e9dia} = \frac{\eta_H + \eta_C}{2}$$

Diferença de Temperatura Média Logarítmica (LMTD)

Esta é uma medida da força de movimentação do calor que cria a transferência de calor. Ela consiste em uma média logarítmica da diferença de temperatura entre os circuitos quente e frio em cada extremidade do trocador de calor.

$$LMTD = \frac{(T_{H2} - T_{C2}) - (T_{H1} - T_{C1})}{\ln\left(\frac{T_{H2} - T_{C2}}{T_{H1} - T_{C1}}\right)}$$

Coefficiente de Transferência de Calor (U)

Este é o coeficiente de transferência de calor total para a parede e para as camadas limite. É uma medida de quão bem funciona o trocador de calor. Um bom trocador de calor apresentará um alto coeficiente, conseqüentemente este valor é importante para os engenheiros.

$$U = \frac{Q_e}{A \times LMTD}$$

Os trocadores de calor utilizados possuem a mesma área de transferência de calor (A), para possibilitar que sejam feitas comparações diretas.