

## PROJETO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TROCADOR DE CALOR DUPLO TUBO PARA PRÁTICAS DIDÁTICAS

**Marco Aurélio de Aquino Guimarães Júnior (marquinhojuniorAG@gmail.com)**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ

**Rodrigo de Jesus Miranda (romiranda701@gmail.com)**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ

**Marcos Roberto Teixeira Halasz (halasz@fsjb.edu.br)**

Professor da FAACZ

### RESUMO

A energia na forma de calor é extremamente relevante do ponto de vista industrial, principalmente quando consideramos seu reaproveitamento. Neste sentido, os principais equipamentos que podem ser relacionados são os trocadores de calor. O presente trabalho tem como objetivo de desenvolver um protótipo de um trocador de calor em escala laboratorial, partindo desde a concepção do projeto, montagem do equipamento até a obtenção de resultados experimentais para avaliação do desempenho de troca térmica. Para tal foi projetado um trocador de calor do tipo duplo tubo, para práticas experimentais em laboratórios de ensino, devidamente instrumentado, de forma a coletar dados para cálculos de parâmetros como o Coeficiente Global de Transferência de Calor ( $U$ ) e estimar a temperatura de algumas das correntes de aquecimento ou resfriamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Trocadores de Calor, Duplo tubo, Práticas didáticas, Bitubulares.

### 1 – INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos responsáveis pela troca térmica entre dois fluidos devido à diferença de temperatura, normalmente realizada através de uma fronteira rígida metálica envolvendo principalmente a os mecanismos de condução e a convecção. Essa troca é aplicada em processos de aquecimento e resfriamento de fluidos industriais, em diversos processos como é o caso do petroquímico, alimentício, celulose e papel, dentre outras diversas indústrias de transformação.

Muitos são os tipos de trocadores de calor e suas conformações. Os trocadores de calor podem ser classificados seguindo diversos critérios: fluxo (concorrente e contracorrente ou cruzado); mecanismo de troca de calor (única fase ou múltiplas fases); processo de transferência (contato direto ou indireto); recuperadores ou regeneradores; tipo de construção (tubulares placas ou superfícies estendidas), entre outros.

No presente trabalho será apresentado um protótipo de trocador de calor do tipo duplo tubo, para ser utilizado em laboratórios de ensino com o objetivo de obter resultados experimentais para avaliação do desempenho de troca térmica. Para tal será necessário projetá-lo, confeccioná-lo e operá-lo em diversas condições que permitam que o aluno que irá utilizá-lo, possa compreender os mecanismos de troca térmica e possa aplicar os conceitos observados na parte teórica da disciplina.

### 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com KREITH et al. (2015), um trocador de calor permite a transferência de calor da substância mais quente para a substância mais fria, podendo ser de três tipos: os recuperadores, os regeneradores e os trocadores de calor por contato direto. Nos recuperadores existe a recuperação de calor entre duas correntes de um processo separadas por uma parede através de uma combinação de mecanismos de convecção e condução.

Nos regeneradores os fluidos quente e frio ocupam o mesmo espaço no centro do trocador de forma alternada. O centro, ou “matriz” do trocador, serve como dispositivo de armazenagem de calor que é periodicamente aquecido pelo fluido mais quente e, depois, transfere o calor ao mais frio. Já nos Trocadores de calor por contato direto, os fluidos quente e frio entram diretamente em contato uns com os outros.

De acordo com BERGMAN (2019), é possível identificar os tipos de trocadores de calor mais comuns como sendo os trocadores duplo tubo ou bitubular, os trocadores de fluxo cruzado, os trocadores tipo casco e tubos e os compactos. Os bitubulares são os mais simples permitem que os fluidos quentes e frio escoam de forma paralela ou de forma contracorrente, os do tipo fluxo cruzado permitem que os fluidos escoem de forma perpendicular, podendo ou não possuir aletas e diferenciadas por uma idealização que trata o escoamento do fluido sobre os tubos como misturado e não misturado. Os trocadores do tipo casco e tubos se diferem em função dos números de passes no casco e nos tubos, além disso, são amplamente utilizados e fabricados em muitos tamanhos, com diferentes arranjos de escoamento e em diversos tipos. Por fim, os trocadores de calor compactos que possuem densas matrizes de tubos aletados ou placas.

Na necessidade de realizar a análise do desempenho dos trocadores de calor faz-se necessário entender o conceito do coeficiente global de Transferência de Calor ( $U$ ), que é um parâmetro que leva em consideração as resistências condutivas e convectivas entre fluidos separados por paredes. Além disso, depende também da escolha do tipo e tamanho do trocador, isto posto, o método da diferença de temperatura média logarítmica (LMTD) é utilizado, sendo obtida a partir do perfil real de temperatura dos fluidos ao longo do trocador de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

Pensando no dimensionamento de tais equipamento é necessário a utilização de ferramentas computacionais e neste sentido, SILVA et al. (2019), utiliza para tal o Suplemento SOLVER do Excel bem como o DWSIM é um software Open-Source compatível com os padrões CAPE-OPEN que permite a simulação, mostrando-se sendo boas ferramentas de ensino dentro do processo de aprendizagem, uma vez que integram a simulação de processos via softwares computacionais em comparação com soluções analíticas. Outro ponto essencial é que tais simulações podem ser utilizadas em associação a práticas experimentais em protótipos para proporcionar um melhor aprendizado ao aprendente. Em um outro estudo, ALRWASHDEH et al. (2022), utilizaram programas de simulação computacional para analisar o efeito do comprimento e do tipo de escoamento (paralelo e contracorrente) em trocadores bitubulares, podendo contribuir para a identificação de melhores disposições em busca da melhor eficiência de troca térmica.

De acordo com MACIEL et al. (2021) o desenvolvimento de protótipos didáticos proporciona uma melhor familiarização e identificação da operação unitária envolvida nos processos tecnológicos. Tais atividades servem como uma ferramenta de ensino, proporcionando a aproximação dos conteúdos ministrados em sala de aula.

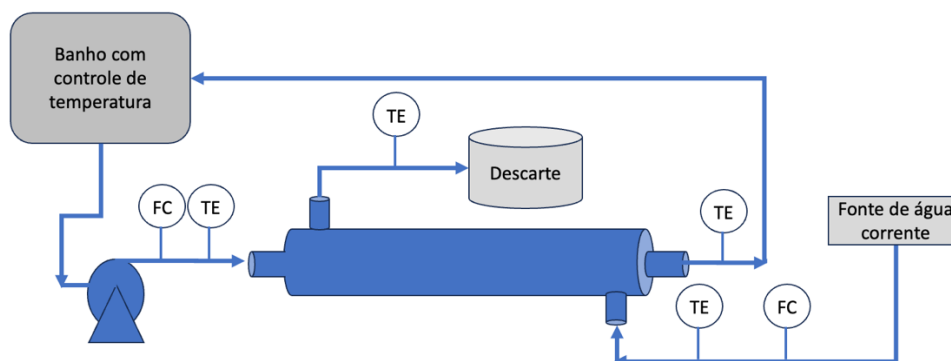
### 3 – METODOLOGIA

Com o objetivo de confeccionar um trocador de calor de duplo tubo para a realização de experimentos em laboratório didático inicialmente foram realizados cálculos utilizando os princípios básicos de transferência de calor. A proposta era confeccionar um equipamento utilizando os materiais disponíveis em nosso laboratório e instrumentá-lo com medidores de temperatura digital de forma que fosse possível realizar experimentos e que os discentes pudessem comprovar os cálculos realizados em sala de aula em um ambiente prático.

Para sua confecção, seguindo o esquema proposto na **Figura 1** e com base nos materiais já disponíveis (tubo de cobre comercial com diâmetro de  $\frac{3}{4}$  in e tubo de aço inox com diâmetro externo de 2 in), foram consideradas fixas as seguintes temperaturas dos fluidos (em ambos os casos água): entrada do fluido quente (consideradas a partir da faixa operacional do banho termostático –  $60^{\circ}$  C), saída do fluido quente (temperatura arbitrada –  $50^{\circ}$  C) e de entrada do fluido frio (temperatura do reservatório, água corrente local –  $30^{\circ}$  C). Além disso, foram estipuladas as vazões de operação como sendo  $w_{\text{quente}} = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $w_{\text{frio}} =$

0,050 m<sup>3</sup>/s (considerando que a faixa de vazão permitida pela bomba adaptada ao banho era de 0,017 < w<sub>quente</sub> < 0,028 m<sup>3</sup>/s para o sistema em questão e da fonte de água fria era de 0,010 < w<sub>frio</sub> < 0,060 m<sup>3</sup>/s).

Por fim, a faixa considerada para o Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) no projeto foi a definida por BERGMAN (2019) para sistemas água-água de (850 a 1700 W/m<sup>2</sup>K) sendo possível estimar a área de troca térmica, consequentemente o comprimento total (L) necessário para sua confecção.



**Figura 1:** Esquema do trocador de calor duplo tubo (contracorrente) proposto para confecção e posterior operação.

De posse do sistema confeccionado deu-se a etapa de análise do desempenho do trocador confeccionado e para tal foram realizados experimentos considerando duas configurações de escoamento, uma contracorrente e uma em paralelo.

Para fins de cálculo foram utilizadas as seguintes equações clássicas de Transferência de Calor:

$$q = w \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$q = U \cdot A \cdot MLDT \quad (2)$$

$$MLDT = \frac{(\Delta t_1 - \Delta t_2)}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)} \quad (3)$$

$$A = \pi DL \quad (4)$$

O primeiro experimento a ser realizado deveria validar o valor do Coeficiente Global de Transferência de Calor considerado, com base nos dados de temperatura obtidos com fluxos contracorrente e paralelo calculados.

Na sequência, o objetivo seria comprovar os dados obtidos por MACIEL et al. (2021) que concluiu em seu trabalho que para um sistema em contracorrente a troca térmica é maior, bem como sua efetividade comprovada pelo valor mais elevado do Coeficiente Global de Transferência de calor em condições de vazões semelhantes. Para tal foram modificadas as vazões de água quente e água fria no equipamento de forma a ser possível identificar tais modificações neste parâmetro.

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas informações descritas anteriormente, serão analisadas quais das metragens dos materiais disponíveis iriam fornecer junto com os parâmetros operacionais, valores de U dentro da faixa considerada viável (entre 850 e 1700 W/m<sup>2</sup>K), sendo possível montar a **Tabela 1** e resultando em valores de U para diversos comprimentos (L) definindo as áreas de troca térmica. Ainda para o cálculo dos comprimentos faz-se necessário calcular a temperatura média das correntes para determinação das propriedades da água

nas condições. Além disso, utilizou-se, como os valores de vazão mássica das correntes os dados informados anteriormente ( $w_{\text{quente}} = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $w_{\text{frio}} = 0,050 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

**Tabela 1:** Cálculo do comprimento do tubo para projeto do trocador de calor nas condições indicadas.

L (m)	$T_e$ (°C)	$T_s$ (°C)	$t_e$ (°C)	q (W)	$t_s$ (°C) (estimada)	MLDT (°C)	A (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)
0,4	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,0264	1768,75
0,7	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,0462	1010,71
0,8	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,0528	884,37
1,0	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,0660	707,50
1,3	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,0858	544,23
1,7	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,1122	416,18
2,0	60	50	30	1045,75	35,006	22,404	0,1319	353,75

Tendo em vista que havia a disponibilidade de um tubo de 0,80 m e o valor previsto para o coeficiente global de transferência de calor calculado ( $U = 884,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) estava na faixa indicada pelo autor, este foi utilizado na confecção do equipamento. O protótipo experimental confeccionado pode ser observado na **Figura 2**.



**Figura 2:** Protótipo experimental confeccionado

Com o equipamento montado foram realizados experimentos em triplicata para garantir a medida das vazões e a estabilidade na leitura das temperaturas das correntes. O primeiro teste, realizando o experimento com fluxo contracorrente foi possível observar, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, que o Coeficiente Global de Transferência de Calor calculado experimentalmente ( $U_{\text{exp}} = 908,83 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) foi muito próximo do valor calculado no projeto (erro = 2,76%) considerando todas as perdas de calor e outros erros associados.

Ainda na **Tabela 2**, foram apresentados os resultados referentes a um experimento realizado com um rearranjo da corrente de frio, representando um fluxo paralelo. Neste experimento foram utilizadas vazões próximas àquelas utilizadas no sistema em contracorrente no mesmo equipamento.

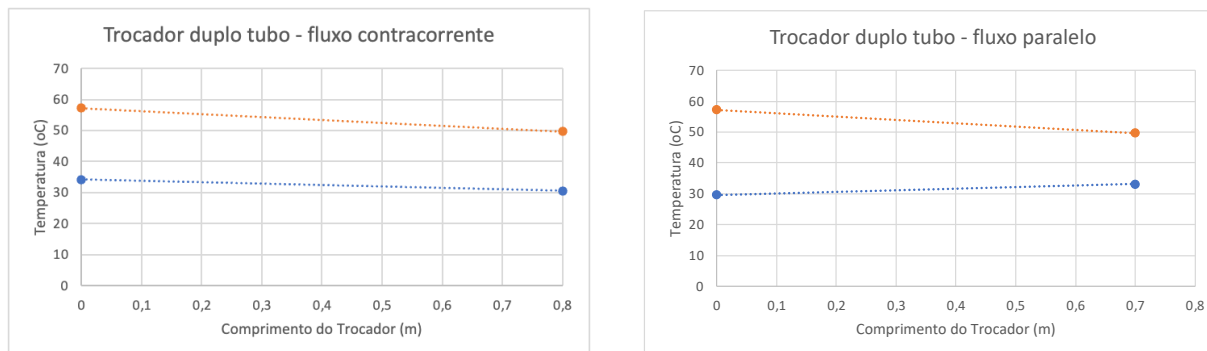
Na **Figura 3**, é possível observar o comportamento da temperatura dentro do trocador de calor com base nos dois fluxos.

Os resultados mostram que para o fluxo contracorrente o valor do calor trocado é superior ao valor do calor trocado para o fluxo paralelo (10,13%) e no caso do Coeficiente Global de Transferência de Calor a tendência é a mesma (9,43%), confirmando o observado por MACIEL et al. (2021) no que diz respeito a média de calor transferido e ao Coeficiente Global de Transferência de Calor.

Mais experimentos deverão ser realizados no futuro de forma a obter informações mais precisas com relação à comparação realizada.

**Tabela 2:** Cálculo do comprimento do tubo para projeto do trocador de calor nas condições indicadas.

Arranjo	$T_e$ (°C)	$T_s$ (°C)	$t_e$ (°C)	$t_s$ (°C)	$w_r$	$w_q$	$q$ (W)	MLDT (°C)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$U$ (W/m <sup>2</sup> K)
Contracorrente	57,2	49,7	30,5	34,2	0,0581	0,0265	865,16	21,043	0,0452	908,83
Paralelo	55,8	49	29,7	33,2	0,0558	0,0265	785,52	20,907	0,0452	830,54



**Figura 3:** Comportamento da Temperatura no trocador de calor com diferentes fluxos

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi possível projetar um trocador do tipo duplo tubo, flexível para operar com fluxo contracorrente e paralelo. Depois de confeccionado foram conduzidos experimentos utilizando as duas variações de fluxo propostas e, para condições operacionais similares os resultados mostram que para o sistema operando contracorrente a troca térmica será maior que no caso do paralelo.

É válido ressaltar que foram realizados poucos testes e devem ser realizadas variações nas vazões de ambas as correntes de forma a obtermos mais resultados para compará-los aos propostos por MACIEL et al. (2021).

O equipamento serve perfeitamente para complementação da teoria em sala de aula, sendo utilizado na disciplina de Transferência de Calor para cursos de Engenharia e, outro ponto relevante é que na sequência além destes testes complementares serão utilizados softwares de simulação para maior dinâmica ao processo de aprendizado dos alunos em laboratório.

## 6 – REFERÊNCIAS

1. KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor** - Tradução da 7ª edição norte-americana. Cengage Learning Brasil, 2015. E-book. ISBN 9788522122028. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522122028/>.
2. BERGMAN, T. L. I. - **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636656. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636656/>.
3. ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Grupo A, 2009. E-book. ISBN 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551280/>.

4. SILVA, A.A., CUNHA, R.S., OLIVEIRA, J.L.B., HENRIQUES, I.P.S.A. e MACHADO, R.A.F. **Utilização do MS EXCEL e do DWSIM como ferramentas computacionais no dimensionamento de trocador de calor casca e tubo.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, XLVII; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA DA ABENGE, II, 17 a 20 set. 2019, Fortaleza – CE. 2019.
5. ALRWASHDEH, S.S., AMMARI, H., MADANAT, M.A. E AL-FALAHAT, A.M. **The Effect of Heat Exchanger Design on Heat transfer Rate and Temperature Distribution.** Emerging Science Journal, ISSN: 2610-9182, Vol. 6, No. 1, p. 128 – 137, Fevereiro, 2022
6. MACIEL, A.J.C., COSTA, M.A., BATTISTI, R. e DAL BÓ, M. **Estudo do desempenho de um trocador de calor em escala de laboratório.** EX@TAS on-line, ISSN 2178-0471, vol. 12 n.2, p. 140-152 Nov. 2021.