

Estudo do desempenho de um trocador de calor em escala de laboratório

Performance study of a laboratory scale heat exchanger

Ana Julia Cabreira Maciel¹, Maiara de Aguiar da Costa¹, Rodrigo Battisti¹, Marcelo Dal Bó¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Campus Criciúma, 88813-600 Criciúma, SC, Brasil.

Resumo

Este trabalho tem o 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. O protótipo foi concebido levando em consideração a operação do trocador de calor em regimes contracorrente e concorrente, possibilitando mensurar em qual dos métodos o trocador de calor apresenta maior eficiência de troca térmica. Após a montagem do protótipo foram realizados experimentos variando-se a vazão e a temperatura dos fluidos quente e frio. Os coeficientes globais de transferência de calor variaram entre 1286 a 2218 W/(m²·°C) para o fluxo contracorrente e entre 878 a 2181 W/(m²·°C) para o fluxo concorrente. Além disso, as curvas de níveis mostraram que a troca de calor para as duas tipologias de fluxo contracorrente e concorrente é maximizada usando temperaturas mais altas do fluido quente e vazão mais altas do fluido frio. Modelos matemáticos envolvendo as variáveis do processo, vazão e temperatura, foram obtidos para ambos os regimes de operação. Constatou-se ainda que os maiores coeficientes globais de transferência de calor foram obtidos operando o trocador de calor em regime contracorrente. Além disso, este trabalho demonstra que a eficiência de trocadores de calor em escala de laboratório pode ser avaliada combinando teoria e prática para estudar operações unitárias envolvendo transferência de calor.

Palavras-chave: Trocador de calor; escala de laboratório; operações unitárias.

Abstract

This work aims to study the development of a laboratory scale prototype of a heat exchanger, from the design of the project, the assembly of the equipment to obtaining experimental results for the evaluation of thermal performance. The prototype was conceived taking into consideration the operation of the heat exchanger in countercurrent and concurrent flow regime, allowing measuring in which of the flow regime the heat exchanger shows higher efficiency of thermal exchange. After assembling the prototype, experiments were performed varying the flow rate and temperature of fluids. The overall heat transfer coefficients ranged from 1286 to 2218 W/(m²·°C) for countercurrent flow; and from 878 to 2181 W/(m²·°C) for concurrent flow. In addition, the level curves showed that for both countercurrent and concurrent flow typologies heat exchange is maximized using higher hot fluid temperatures and higher cold fluid flow rates. Mathematical models involving the process variables, flow and temperature were obtained for both operating regimes. It was also found that the highest overall heat transfer coefficients were obtained by operating the countercurrent heat exchanger. Moreover, this work demonstrates that efficiency of heat exchangers on laboratory scales can be evaluated by combining theory with practice to study unit operations involving heat transfer.

Keywords: Heat exchanger; laboratory-scale; unit operations.

Introdução

A energia em forma de calor se tornou um fator de alta relevância após a revolução industrial, pois o reaproveitamento de calor que antes era descartado traz um diferencial econômico e ambiental muito grande. Sendo assim, estudos voltados para a conservação e economia de energia são de suma importância no mundo globalizado economicamente. Muitas vezes utiliza-se a operação unitária de transferência de calor no reaproveitamento da energia em diferentes setores dentro de um processo de produção. Os equipamentos mais utilizados com o objetivo de troca de calor ou reaproveitamento de energia na forma de calor são os trocadores de calor. Devido a sua relevância, é de fundamental importância conhecer sua construção e características, buscando o aprimoramento de processos produtivos [1; 2].

Trocadores de calor são equipamentos onde ocorre a troca térmica (diretamente ou indiretamente) entre dois fluidos devido à diferença de temperatura, normalmente realizada através de uma parede metálica. Essa troca é aplicada em processos de aquecimento e resfriamento de fluidos industriais, como ocorre durante o refino do petróleo e na produção de biocombustíveis [3], na indústria alimentícia durante a pasteurização do leite [4], dentre outras diversas indústrias de transformação. A premissa básica para que ocorra a transferência de calor é a presença de uma diferença de temperatura, sendo esta a força motriz para transferência de energia na forma de calor de um corpo mais aquecido para um menos aquecido. A taxa de transferência de calor depende da magnitude do gradiente de temperatura [5]. Devido à importância desta operação unitária, é constante a busca por aperfeiçoamento no processo e no desempenho dos trocadores de calor, visando a conservação da energia e consequentemente o aumento da eficiência dos processos produtivos [6].

Os trocadores de calor podem ser classificados seguindo diversos critérios: fluxo (concorrente, 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) [7]. A transferência de calor no trocador envolve principalmente a condução e a convecção. Quanto ao regime de fluxo do trocador, ele pode ser concorrente (0°), contracorrente (180°) ou cruzado (90°); no regime concorrente os dois fluxos entram juntos e fluem no mesmo sentido e direção; no contracorrente os fluxos entram em sentido contrários, sendo esses dois os mais usuais.

Quanto ao tipo de construção o trocador de calor tubular é composto por diversos tubos circulares, sendo possível variar o diâmetro, quantidade, comprimento, arranjo e a distância entre os tubos, podendo esse tipo de trocador ser de duplo tubo, casco e tubo e trocador de calor tipo serpentina. O trocador de calor tipo serpentina consiste em uma ou mais bobinas em forma de espiral (serpentina) ordenada em uma carcaça. Esse tipo de trocador tem por vantagem a acomodação de uma grande superfície de troca de calor em pouco espaço, porém a dificuldade de manutenção é a principal desvantagem deste tipo de equipamento [4].

Uma etapa crucial para a análise de um trocador de calor é a determinação do valor do coeficiente global de transferência de calor, o qual expressa o seu desempenho durante seu pleno funcionamento. Tal valor é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre os fluidos. Para a determinação do coeficiente, levam-se em consideração as resistências condutiva e convectiva entre fluidos separados pelas paredes. Quando a parede do tubo interno for fina e constituída de um material com boa condutibilidade térmica pode-se desprezar a resistência térmica a condução (FOUST et al., 2008).

Com relação ao processo de ensino-aprendizagem, este somente se dá em sua totalidade quando se observa uma real motivação do aluno pelo conhecimento [8]. Embora o método didático tradicional de aulas e apresentações puramente teóricas tenha sua efetividade, a participação do aluno no

desenvolvimento dessas teorias mostra-se uma ferramenta que influencia diretamente em sua capacidade de abstrair os conceitos apresentados, pois é somente através da vivência que se alicerçam tais conceitos [9]. Desta forma, o desenvolvimento de protótipos didáticos visa melhor familiarização e identificação da operação unitária envolvida dentro de processos tecnológicos de caráter fabril [10]. Estas atividades servem como uma ferramenta de ensino, proporcionando uma aproximação dos conteúdos ministrados em classe de modo mais dinâmico facilitando o processo de ensino-aprendizagem, permitindo a compreensão do desenvolvimento tecnológico como sendo uma totalidade, ou seja, na interdependência entre diversas áreas do conhecimento. Além disso, sabe-se que muitas vezes conteúdos relacionados com engenharia de processos industriais acabam muitas vezes sendo de difícil assimilação para a maioria dos discentes, devido ao fato de que as operações unitárias e os princípios básicos envolvidos, bem como as estratégias de controle e instrumentação utilizadas, abordarem assuntos um tanto distantes do cotidiano da vida acadêmica e, ao mesmo tempo, serem um desafio aos professores em explanar em classe estes processos [11].

Diante do exposto, este trabalho objetiva desenvolver e avaliar o desempenho de um trocador de calor de baixo custo em escala de laboratório. O protótipo de trocador de calor desenvolvido foi do tipo serpentina, com possibilidade de variação da temperatura do fluido quente e da vazão do fluido frio, a fim de estudar o processo de troca térmica entre os fluidos e calcular o coeficiente global de transferência de calor do trocador em questão. Além disso, a análise de desempenho foi baseada na verificação experimental e comparação dos valores de eficiência do trocador de calor nos regimes diferentes fluxos de operação, concorrente e contracorrente.

Metodologia

O projeto do trocador de calor do tipo serpentina foi concebido com o intuito de proporcionar aos usuários efetuarem alterações no regime de fluxo, concorrente e contracorrente, mensurar a vazão dos fluidos quente e frio e as suas temperaturas na entrada e na saída do trocador de calor. Ainda, para proporcionar aos usuários uma visão completa do trocador de calor, a concepção da sua carcaça foi feita com vidro transparente, expondo nitidamente a serpentina e o fluido que escoar pela carcaça do trocador. Para a montagem do trocador de calor foram utilizados vários materiais como tubulações de plástico transparentes, abraçadeiras, carcaça de vidro, tubo de cobre, tubulações em PVC, registros, sensores de temperatura com display, sensores de vazão, dentre outros. O fluido usado em todos os experimentos foi a água.

Determinou-se o comprimento da caixa de vidro em 50 cm, com 10 cm de base quadrada. Para a serpentina foi usado um tubo de cobre, o qual foi moldado, resultando em uma serpentina com diâmetro externo de 8 cm. O diâmetro interno do tubo de cobre onde um dos fluidos escoar é de 0,5 cm. Foram adaptadas tubulações na carcaça, caixa de vidro, para que a água circulasse a temperatura ambiente, e na serpentina de cobre circulasse água aquecida por um banho termostático (Nova Ética, modelo 521-5D). Ao fim do planejamento, foi produzido um fluxograma de processo (Figura 1), neste foi possível visualizar uma prévia do protótipo a ser montado no laboratório. Os sensores de temperatura escolhidos já possuem um visor acoplado, porém os sensores de fluxo não, sendo assim, foi necessário programar e aferir dois sensores e o display, utilizando um Arduino UNO. A Figura 1 mostra o fluxograma de processo do trocador de calor, onde a cor vermelha indica o fluxo do fluido quente e a azul indica o fluxo do fluido frio. Em um regime concorrente, as malhas 100 e 200 denotam os fluxos de entrada, frio e quente, respectivamente, bem como as malhas 101 e 201 denotam o fluxo de saída, seguindo a mesma sequência.

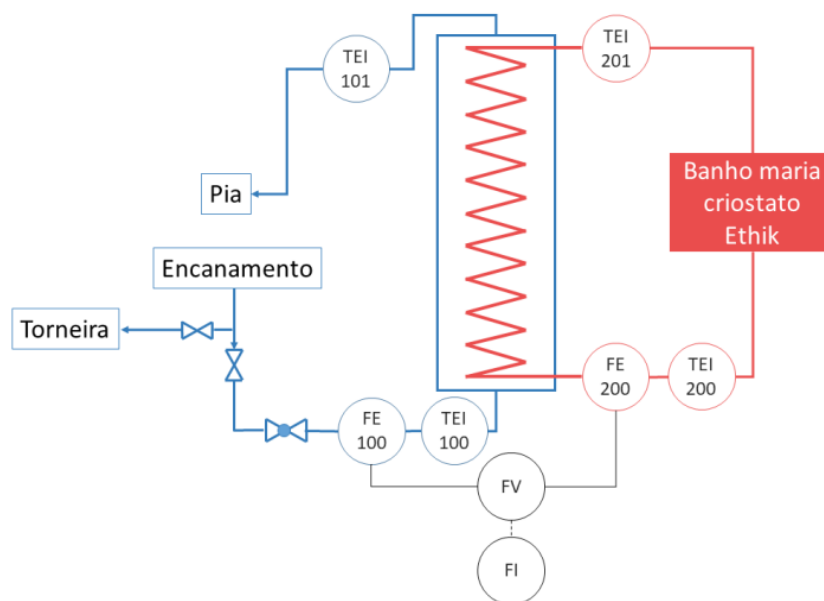


Figura 1. Fluxograma de processo do trocador de calor de acordo com a NBR 8190/83.

Na Figura 1 os símbolos seguem a NBR 8190, assim como a ISA-S5, em que FE indica um elemento primário sensor de vazão, FC indica um controlador de vazão e FI indica um indicador de vazão. Já TEI indica elemento primário sensor e indicador de temperatura. A estrutura física do trocador de calor montado encontra-se na Figura 2, onde se observa a vista superior à esquerda, no centro uma visão do tubo de vidro, e a direita uma vista inferior.

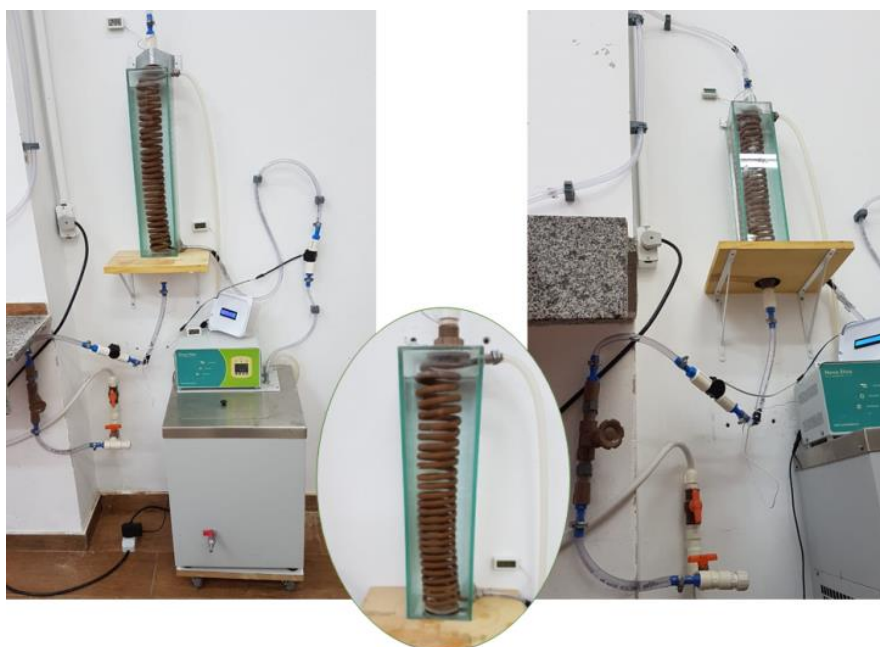


Figura 2. Protótipo do trocador de calor construído.

A área total de troca térmica da serpentina foi medida completando o interior da serpentina com água. Posteriormente a massa de água foi medida, resultando em 75 g. Com isso foi possível obter o volume interno da serpentina. O diâmetro interno da serpentina foi mensurado com um paquímetro digital, possibilitando calcular a altura total da serpentina, resultando em 3,82 m. Utilizando a equação do volume de um cilindro, calculou-se a área total de troca térmica da superfície da serpentina obtendo-se uma área de 0,06 m², esse valor foi usado nos cálculos do coeficiente global de transferência de calor (U). A temperatura do fluido quente foi variada em três níveis, 40°C, 50°C e 60°C. A vazão do fluido frio foi variada em dois níveis 0,45 L/min e 1,0 L/min. Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor foi utilizada a metodologia da média logarítmica das diferenças de temperatura (MLDT).

Resultados e discussão

3.1 Regime de fluxo em contracorrente

Na

Tabela 1 podem-se observar os resultados de temperatura e vazão para o regime contracorrente, variando-se duas vazões para cada temperatura de entrada da água quente. Onde T indica a temperatura, Q a vazão, E significa entrada, S a saída, F_q é o fluido quente e F_f é o fluido frio.

Tabela 1. Resultados dos ensaios no trocador de calor em regime contracorrente.

Ensaio	TEF_q (°C)	QF_q (L/min)	TSF_q (°C)	QF_f (L/min)	TEF_f (°C)	TSF_f (°C)
1	40,2	4,64	38,5	0,45	27,6	37,8
2	39,6	4,64	36,8	1,00	27,3	32,5
3	50,2	4,64	48,4	0,45	27,6	49,2
4	50,1	4,64	44,1	1,00	27,7	41,5
5	60,5	4,64	57,5	0,45	27,4	58,8
6	61,6	4,81	55,8	1,00	27,8	53,5

A partir dos dados das temperaturas das correntes quentes e frias calculou-se a Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (ΔT_{ml}) para uma corrente oposta (contracorrente) utilizando a Equação 1, onde ΔT_{max} é a máxima diferença de temperatura encontrada nos fluidos e ΔT_{min} é a mínima diferença de temperatura dos fluidos. Posteriormente calculou-se a quantidade de calor para a corrente fria e quente utilizando a Equação 2, onde q_{ced} e q_{rec} são os calores cedidos pelo fluido frio e recebido pelo fluido quente, respectivamente, $\dot{m}_q$ e $\dot{m}_f$ são as vazões mássicas de entrada das correntes quente e fria, respectivamente. O c_q e o c_f são o calor específico do fluido quente e frio, considerados iguais a 4,181 kJ/(kg·K) nesse trabalho [5]. Os resultados, mostrados na

Tabela 2, evidenciam uma distorção entre o calor cedido e o calor recebido, os quais deveriam ser valores próximos. Essa distorção pode estar relacionada com a falta de isolamento térmico do trocador de calor. Com isso, optou-se por usar a média entre o calor cedido e o calor recebido.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} q_{ced} &= m_q \cdot c_q \cdot \Delta T_q \\ q_{rec} &= m_f \cdot c_f \cdot \Delta T_f \end{aligned} \quad (2)$$

Para calcular o coeficiente global do trocador de calor (U) utilizou-se a Equação 3, onde a área A é da serpentina e q é a média da quantidade de calor cedido e recebido. A

Tabela 2 indica os coeficientes calculados.

$$U_{global} = \frac{q}{A(\Delta T_{ml})} \quad (3)$$

Tabela 2. Coeficientes globais de troca térmica em contracorrente do trocador de calor.

Ensaio	$\Delta T_{ml} (^{\circ}\text{C})$	$q_{ced} (\text{J/s})$	$q_{rec} (\text{J/s})$	Média q_{ced} e $q_{rec} (\text{J/s})$	Coeficiente Global (U) $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
1	5,6	548,9	323,8	436,4	1298,7
2	8,2	904,0	361,9	633,0	1286,5
3	6,5	565,3	684,1	624,7	1601,8
4	12,5	1938,1	1027,8	1482,9	1977,3
5	9,9	981,5	994,9	988,2	1663,6
6	14,3	1876,7	1929,0	1902,8	2217,8

A Figura 3 mostra, através de uma superfície de resposta, os coeficientes globais de troca de calor em relação à variação da vazão da água fria e à temperatura de entrada da água quente.

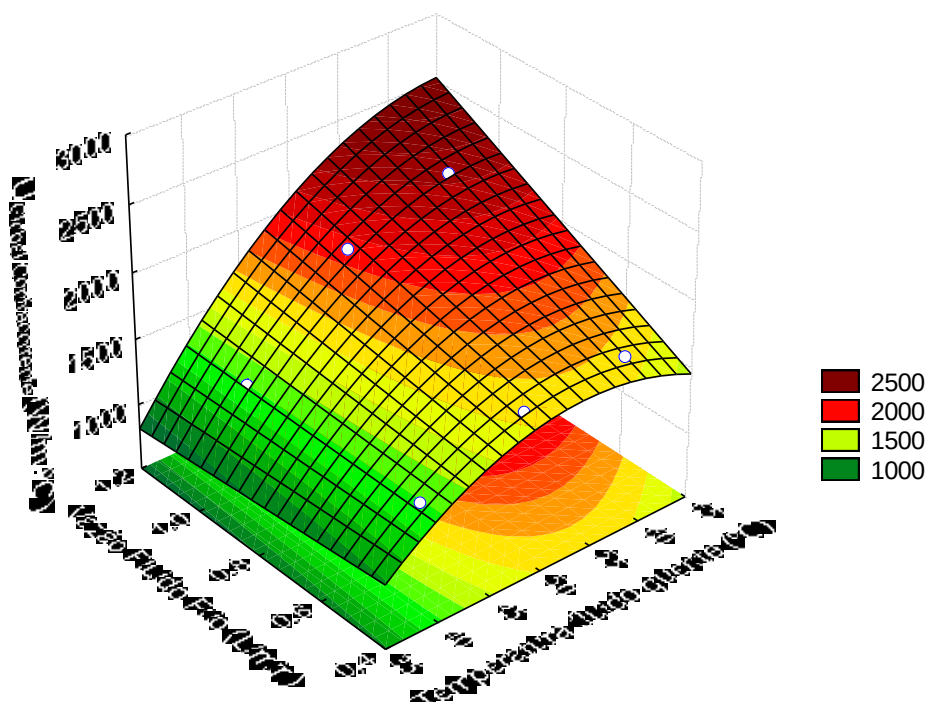


Figura 3. Curvas de níveis para os coeficientes globais de transferência de calor com a variação da vazão do fluido frio e da temperatura de entrada do fluido quente em regime contracorrente.

Observa-se que o coeficiente global de transferência de calor ($U_{Global-Contracorrente}$) foi influenciado pela variação da vazão do fluido frio e também pela variação da temperatura de entrada do fluido quente. Em temperaturas próximas a 40°C o $U_{Global-Contracorrente}$ não foi influenciado pela vazão do fluido frio. Porém, em temperaturas entre 50 a 65°C notou-se que ambas as variáveis, temperatura e vazão, influenciaram fortemente o coeficiente global de transferência de calor em regime contracorrente.

De acordo com os resultados analisados de forma estatística pode-se propor um modelo matemático que representa a variação do coeficiente global de transferência de calor com a variação da temperatura de entrada do fluido quente e da vazão do fluido frio. Este modelo matemático é mostrado na Equação 4.

$$U_{Global-Contracorrente} = -2671,4 + 167,5 \cdot T_{EFq} - 1,73 \cdot T_{EFq}^2 - 2036,7 \cdot Q_{Ff} + 52 \cdot T_{EFq} \cdot Q_{Ff} \quad (4)$$

Para verificar a veracidade do modelo matemático proposto, elaborou-se a Figura 4, gráfico dos valores preditos vs observados, que seria uma comparação entre os valores observados do U_{global} (Tabela 2) em comparação com os valores preditos pelo modelo matemático (Eq. 4).

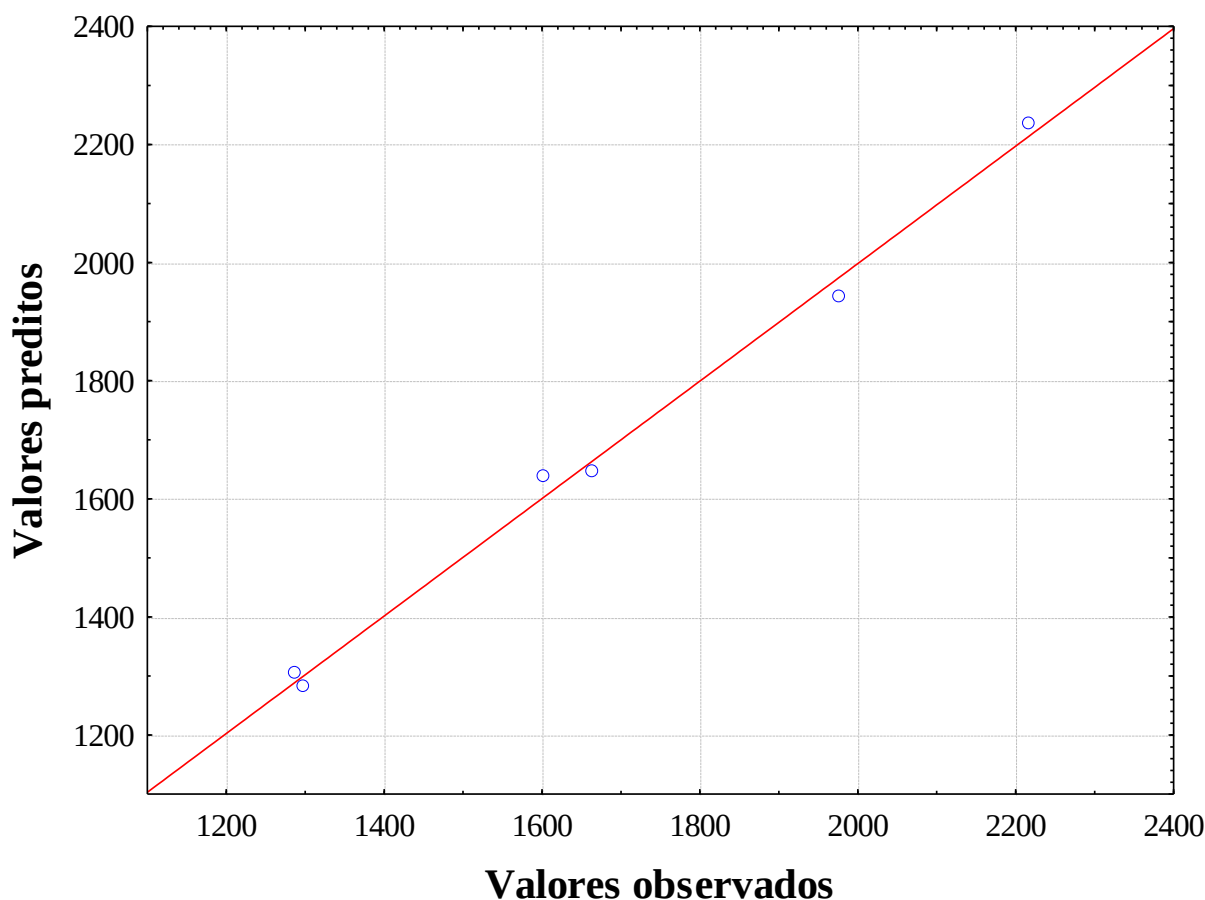


Figura 4. Preditos vs observados para os testes realizados no regime contracorrente.

Podemos perceber que a regressão linear se ajustou muito bem aos valores experimentais do $U_{Global-Contracorrente}$, resultando em um $R^2 \sim 0,99$. Portanto, o modelo matemático pode ser usado para simular teoricamente qual seria o coeficiente global de transferência de calor em diferentes valores de temperatura de entrada do fluido quente e de vazão do fluido frio, respeitando os limites estudados na metodologia deste trabalho. Dessa forma, pode-se prever o coeficiente global de transferência de calor de forma simples e rápida, mesmo com valores intermediários de vazão e temperatura, sendo uma forma mais simples de estudo quando comparado com a simulação matemática aplicada em outros trabalhos mais completos [12].

3.2 Regime de fluxo em concorrente

Após os testes em fluxo contracorrente, realizaram-se os ensaios com o regime em concorrente, para verificar o coeficiente global de transferência de calor. Na

Tabela 3 podem-se observar os valores variando as duas vazões para cada temperatura de entrada da água quente (serpentina).

Tabela 3. Resultados dos testes no trocador de calor concorrente.

Ensaio	TEF_q (°C)	QF_q (L/min)	TSF_q (°C)	QF_f (L/min)	TEF_f (°C)	TSF_f (°C)
1	40,3	4,64	39,8	0,45	26,9	38,5
2	40,0	4,64	38,5	1,00	26,7	36,6
3	50,2	4,64	48,4	0,45	27,2	49,2
4	50,1	4,64	46,6	1,00	27,0	43,9
5	59,2	4,64	57,5	0,45	27,4	58,8
6	60,5	4,64	58,4	1,00	27,1	56,8

A partir dos dados das temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio calculou-se a média logarítmica das diferenças de temperatura (ΔT_{ml}) para o regime concorrente utilizando a Equação 1. Na

Tabela 4 podem-se observar os resultados obtidos. Posteriormente, calculou-se também o calor cedido pelo fluido frio e o calor recebido pelo fluido quente. Por fim, foi possível calcular o coeficiente global de transferência de calor em regime concorrente, também apresentado na

Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes globais de troca térmica em concorrente do trocador de calor.

Ensaio	ΔT_{ml} (°C)	q_{ced} (J/s)	q_{rec} (J/s)	Média q_{ced} e q_{rec} (J/s)	Coeficiente Global (U_{global}) W/(m ² ·°C)
1	5,2	178,6	269,2	273,9	877,9
2	5,9	479,1	693,0	586,0	1655,4
3	6,5	568,4	699,9	634,2	1626,2
4	9,5	1136,8	1183,0	1159,9	2034,9
5	9,6	546,7	1000,1	773,4	1342,7
6	10,5	671,2	2076,7	1374,0	2181,0

A Figura 5 mostra, através de uma superfície de resposta, os coeficientes globais de troca de calor em relação à variação da vazão da água fria e a temperatura de entrada da água quente para o trocador de calor em regime concorrente. Assim como no regime contracorrente, o coeficiente global de transferência de calor foi fortemente influenciado pela variação da vazão da água fria e à temperatura de entrada da água quente. Os maiores valores do $U_{global-Concorrente}$ foram encontrados em temperaturas mais altas de entrada do fluido quente e com elevadas vazões do fluido frio.

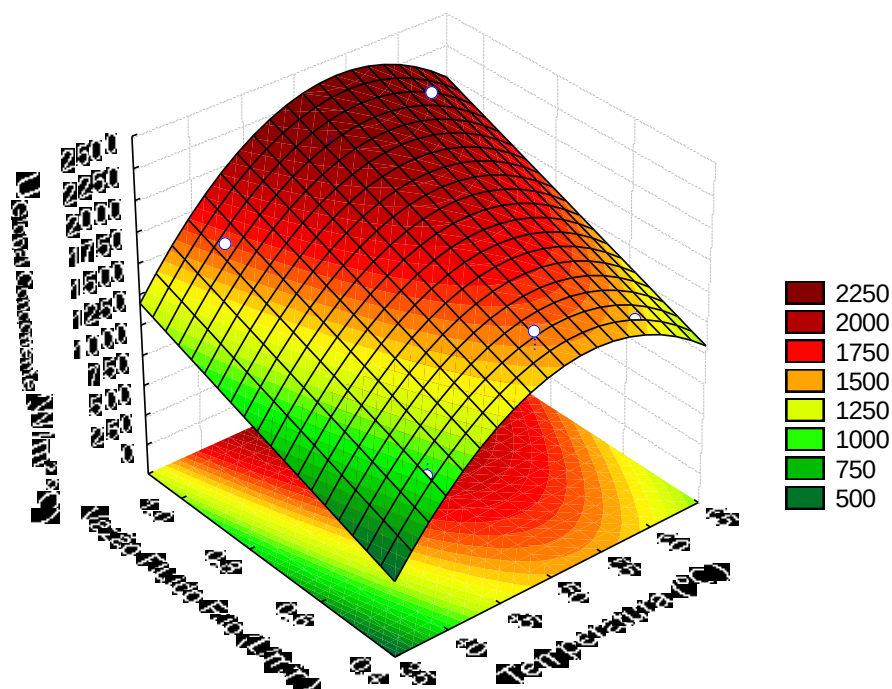


Figura 5. Variação do coeficiente global de transferência de calor com a variação da vazão da água fria e da temperatura de entrada da água quente em regime concorrente.

Assim como no regime contracorrente, foi proposto um modelo matemático para descrever o comportamento do U_{global} com a variação da vazão da água fria (Q_{ff}) e à temperatura de entrada da água quente (T_{EFq}), resultando na Equação 5, mostrada abaixo.

$$U_{\text{Global-Concorrente}} = -8013,13 + 337 \cdot T_{\text{EFq}} - 3,2 \cdot T_{\text{EFq}}^2 + 959,5 \cdot Q_{\text{ff}} + 5,6 \cdot T_{\text{EFq}} \cdot Q_{\text{ff}} \quad (5)$$

Objetivando analisar a veracidade do modelo matemático para o regime concorrente, elaborou-se a Figura 6, onde um gráfico dos valores preditos vs observados é plotado, fazendo um comparativo entre os valores observados do U_{global} (

Tabela 4) em comparação com os valores preditos pelo modelo matemático (Eq. 5).

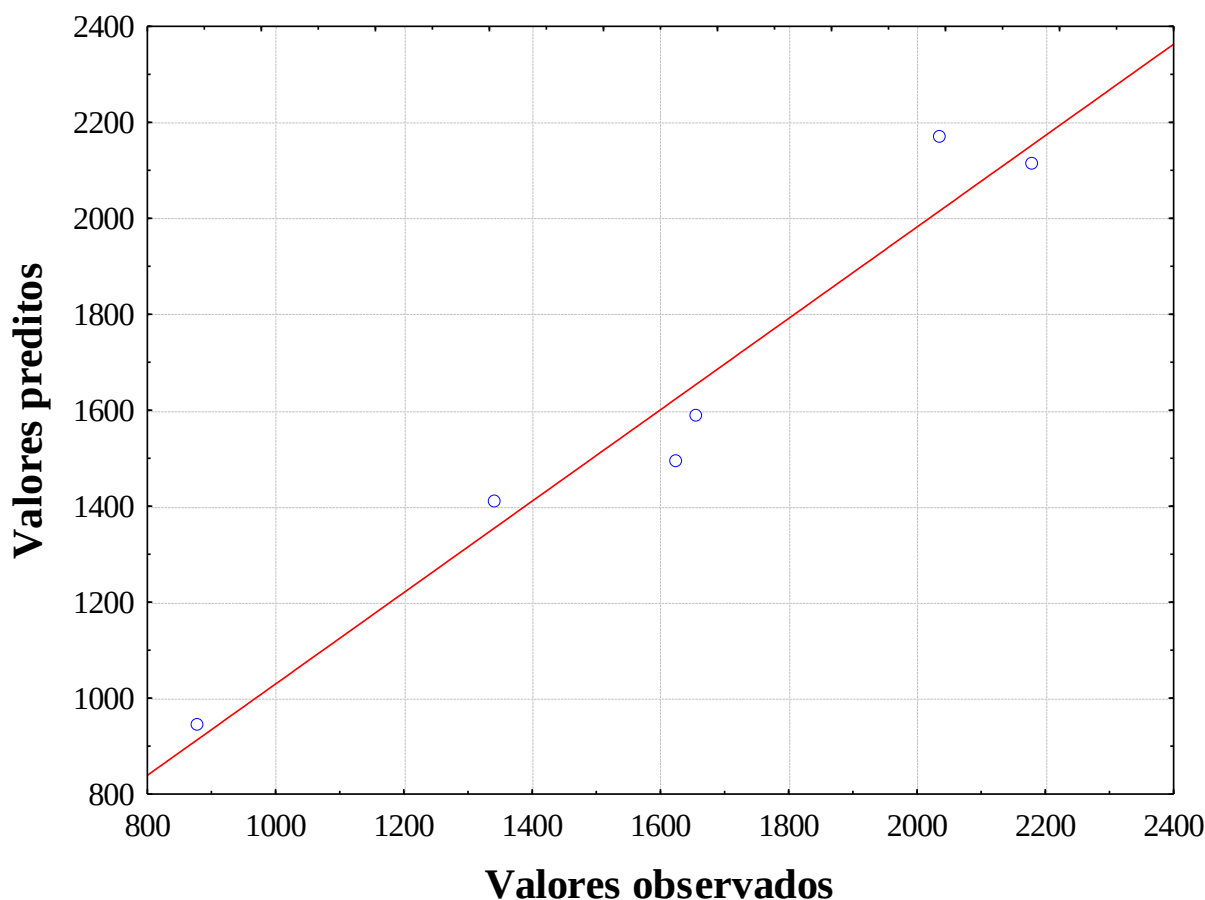


Figura 6. Gráfico dos Preditos vs Observados para os testes realizados no regime concorrente.

Observa-se que no regime concorrente os valores preditos pelo modelo matemático apresentam pouca distorção quando comparados com os valores observados experimentalmente. De qualquer forma, a regressão linear obteve um $R^2 \sim 0,96$.

3.3 Comparação dos diferentes regimes de escoamento

Ao fazer uma média dos valores de calor quente e frio dos fluxos contracorrente (Tabela 2) e concorrente (

Tabela 4), podemos comparar a quantidade de calor trocado em cada regime de escoamento. No regime contracorrente a média de calor trocado foi de 1011,33 J/s enquanto no fluxo concorrente esse valor foi de 800,23 J/s. Portanto, pode-se dizer que para o trocador de calor estudado, dentro do range de temperaturas e vazões estudadas, o fluxo contracorrente foi o que obteve maior troca de calor entre os fluidos.

Quanto ao Coeficiente Global de Transferência de Calor (U_{global}) a média para o regime contracorrente foi de 1674,3 W/m²·°C enquanto que para o regime concorrente a média foi de 1619,7 W/m²·°C. Resultado este influenciado pela maior troca de calor obtido no regime contracorrente. Este resultado vai ao encontro de diversos trabalhos e estudos já realizados em trocadores de calor, onde mostra que o regime de escoamento em contracorrente é, geralmente, o mais eficiente para a troca de calor [13; 14]. Além disso, os valores encontrados para o U_{global} estão de acordo com valores

representativos encontrados quando o fluido quente e frio é a água, mostrando variações entre 1000 a 2500 W/m²·°C [15].

Considerações finais

Este trabalho estudou o desenvolvimento e eficiência de trocadores de calor a nível de laboratório, desde o projeto inicial até a execução de ensaios experimentais em um trocador de calor do tipo serpentina, onde regimes de escoamento em contracorrente e concorrente foram utilizados.

A temperatura de entrada do fluido quente e a vazão do fluido frio foram variadas a fim de se determinar o coeficiente global de transferência de calor em dois regimes de escoamento distintos. No regime contracorrente a média de calor trocado foi de 1011,33 J/s enquanto no regime concorrente esse valor foi de 800,23 J/s. Quanto ao coeficiente global de transferência de calor (U_{global}) encontrou-se um valor médio de 1674,3 W/m²·°C para o regime contracorrente, enquanto que para o regime concorrente o valor médio foi de 1619,7 W/m²·°C. Portanto, pôde-se concluir que, para os níveis de temperatura e vazão estudados, o regime de fluxo em contracorrente foi o mais efetivo na troca de calor, resultado este que está condizente com trabalhos anteriores.

A análise estatística realizada nos dois regimes de escoamento possibilitou propor um modelo matemático para o cálculo do U_{global} para cada regime de escoamento. Obtendo ajustes lineares entre 0,96 a 0,99 (R^2), evidenciando que os modelos propostos se ajustaram bem aos resultados experimentais.

Além disso, o desenvolvimento deste protótipo experimental possibilitou aliar conceitos da teoria com a prática na construção e planejamento de uma operação unitária (o trocador de calor). Permitido também o contato com a parte de controle e instrumentação, já que foram instalados sensores, válvulas, medidores e estratégias de controle para o protótipo desenvolvido. Isso visa contribuir continuamente com a formação de futuros profissionais cada vez mais preparados para situações reais em indústrias que utilizam operações unitárias em seu processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao IFSC pelo auxílio prestado durante a execução deste trabalho.

Referências

- [1] S.J.M. Cartaxo, F.A.N. Fernandes, Educational software for heat exchanger equipment. Computer Applications in Engineering Education, 18 1 (2010) 193-199.
- [2] T. Gundersen, L. Naess, The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: An industrial review of the state of the art. Heat Recovery Systems and CHP, 10 4 (1990) 301-328.
- [3] A.D.G. Zuniga; A.A. Andrade; G.R.d.S.R. Gouvêa; L.C.G.S. Amaral; L.F. Sodré; T.S. Novais; A.A. Pinedo, C.F.d.S. Vieira, Situação atual e perspectivas do biodiesel no Estado do Tocantins. DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, 1 1 (2015)
- [4] A. Cruz; C. Oliveira; P. Sá, C.H. Corassin "Processamento de Leites de Consumo: Coleção Lácteos". Elsevier Editora Ltda., 2017.
- [5] Y.A. Cengel "Transferência de Calor e Massa - Uma Abordagem Prática", 4ª ed. ed. Mcgraw-hill Interamericana, 2012.

- [6] F.P. Incropera; D.P. Dewitt; T.L. Bergman, A.S. Lavine "Fundamentos de transferência de calor e de massa". LTC - Livros técnicos e científicos editora Ltda.: Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [7] R.S. Felício, Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Mecânica), Dimensionamento de trocadores de calor aplicados à refrigeração da água do molde de um processo de lingotamento contínuo, Engenharia Mecânica. UNESP, Guaratinguetá, 2012.
- [8] L.S. Vygotsky, J.L. Camargo "Pensamento E Linguagem". Martins Fontes, 2008.
- [9] J. Piaget, M. Merlone "A equilibração das estruturas cognitivas: problema central do desenvolvimento". Zahar, 1976.
- [10] J.O.G.d. Lima, L.K.A. Barbosa, O ensino de química na concepção dos alunos do ensino fundamental: algumas reflexões Exatas Online, 6 1 (2015) 33-48.
- [11] R. Battisti; G.V.B. Possenti; A.P. Figueiredo, M.D. Bó, STUDENTS BUILDING DIDACTIC EXPERIMENTS AS A TOOL FOR TEACHING UNIT OPERATIONS AND PROCESS CONTROL FOR CHEMISTRY TECHNICIANS. Química Nova, 42 (2019) 983-989.
- [12] C.F. Wehmann; P.A.C. Rocha; M.E.V.d. Silva; F.A.A. Araújo, D.L. Correia, Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor - Parte II: Problemas clássicos de transmissão de calor. Revista Brasileira de Ensino de Física, 40 (2018) e2313-2319.
- [13] P.A. Martin, F.K. Junior, Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle. Revista de Ensino de Engenharia, 25 2 (2006) 3-9.
- [14] M.S. Souza, Tese de doutorado, Análise térmica de um trocador de calor do tipo casco e tubos para resfriamento do resíduo de uma unidade de destilação atmosférica, Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [15] N.S. Barbosa; L. Martinelli; T. Vedove; A. Campos; J. Rosa; R. Oliveira; R. Felix, D.L.d. Souza, Projeto de um protótipo de trocador de calor. Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação (RBCTI), 2 2 (2018) 109-124.