



ABORDAGEM TEÓRICO-PRÁTICA PARA ENSINO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5350

Autores: MARCELO COSTA FLORES, ENIL ALMEIDA BRESCIA, DIEGO HENRIQUE DE SOUZA CHAVES, VIVIANE SANTOS BIRCHAL

Resumo: O ensino e a aprendizagem em engenharia enfrentam desafios significativos, especialmente com as demandas da Indústria 4.0, exigindo atualizações metodológicas para preparar adequadamente os futuros profissionais. A defasagem entre o ensino teórico e a prática dificulta o aprendizado, pois os alunos não conseguem aplicar de maneira eficaz os conceitos teóricos em situações reais. Uma abordagem teórico-prática no ensino de transferência de calor foi proposta neste estudo utilizando um trocador de calor para avaliar eficiência em configurações de escoamento contracorrente e paralelo. O trabalho foi realizado em uma planta didática, previamente modernizada, situada no Laboratório de Operações Unitárias (LabOp) da Universidade Federal de Minas Gerais. A parte teórica foi desenvolvida a partir de orientações em sala de aula enquanto a parte prática foi realizada com o auxílio de ferramentas digitais, incluindo manuais e vídeos disponíveis online pelo site do LabOp. Os resultados destacam a maior eficiência do trocador de calor em contracorrente e a necessidade de ajustar o balanço de energia devido a imprecisões na medição de temperatura e à presença de incrustações. Destaca-se a participação ativa dos alunos no processo de aprendizagem e a capacidade deles em resolver os desafios encontrados, desenvolvendo habilidades de colaboração e autonomia.

Palavras-chave: aplicação prática, ensino em engenharia, transferência de calor, trocador de calor.

ABORDAGEM TEÓRICO-PRÁTICA PARA ENSINO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR

1 INTRODUÇÃO

O ensino e a aprendizagem contemporâneos enfrentam diversos desafios, especialmente em áreas técnicas como a engenharia. Apesar das rápidas mudanças tecnológicas e sociais, os currículos de engenharia mantêm uma estrutura que remonta ao final do século XVIII. Este modelo ainda guia a maioria dos programas de engenharia com uma separação explícita entre o ensino básico e o ensino de engenharia, com conteúdo frequentemente fragmentados e descontextualizados (Oliveira, 2005). A transformação promovida pela Indústria 4.0 exige que os profissionais de engenharia desenvolvam novas habilidades e se adaptem a um ambiente em constante evolução. Como resultado, é essencial atualizar as metodologias de ensino e aprendizado para preparar adequadamente os futuros engenheiros.

A metodologia de Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning* – PBL) tem sido aplicada em diversas áreas do ensino superior, incluindo a Engenharia Química (Ballesteros *et al.*, 2019). O ambiente colaborativo, ao utilizar metodologias ativas, promove melhor aprendizado ao estimular a participação ativa dos alunos (Golter *et al.*, 2007). Além disso, estudos e relatos de experiências têm mostrado que a aplicação do PBL, especialmente em tópicos como trocadores de calor, resulta em um melhor desempenho acadêmico com boa aceitação por parte dos alunos (Rodrigues, 2022).

Um trocador de calor é um dispositivo que transfere calor de um fluido quente para um fluido frio, sem que eles se misturem (Bergman *et al.*, 2014). Esses equipamentos são amplamente utilizados em usinas de combustíveis fósseis e nucleares, turbinas a gás, aquecimento e ar-condicionado, refrigeração e na indústria química, em geral. Em diversas aplicações de engenharia, é viável reaproveitar energia de fluidos quentes, trazendo vantagens energéticas, econômicas e ambientais.

Os trocadores de calor podem ser fabricados em diferentes projetos e arranjos de fluxo. Podem ser classificados como trocadores de tubos concêntricos (ou bitubular), casco e tubo e compacto (Bergman *et al.*, 2014). É importante conhecer os parâmetros de desempenho para avaliar a eficácia de um trocador de calor e desenvolver metodologias para projetá-lo ou prever o desempenho sob condições especificadas (Bergman *et al.*, 2014; Perussi, 2010).

Trocadores de calor, em escala laboratorial, permitem ao estudante aplicar conhecimentos teóricos sobre transferência de calor em situações reais, desenvolver habilidades técnicas e de resolução de problemas. Muitos conceitos adquiridos são diretamente aplicáveis na indústria. No setor industrial, o trocador de tubos concêntricos é amplamente utilizado porque são altamente eficientes e capazes de suportar altas pressões e temperaturas. A principal desvantagem desse tipo de equipamento é que eles são volumosos e caros por unidade de área de superfície de transferência de calor (Kakaç *et al.*, 2012).

Este trabalho propôs a utilização de um trocador de calor bitubular em uma abordagem integrada teórica e prática como metodologia de ensino para análise de seu desempenho de operação. Dessa maneira, o objetivo é avaliar a transferência de calor desse equipamento em duas configurações de escoamento: contracorrente e paralelo. Os

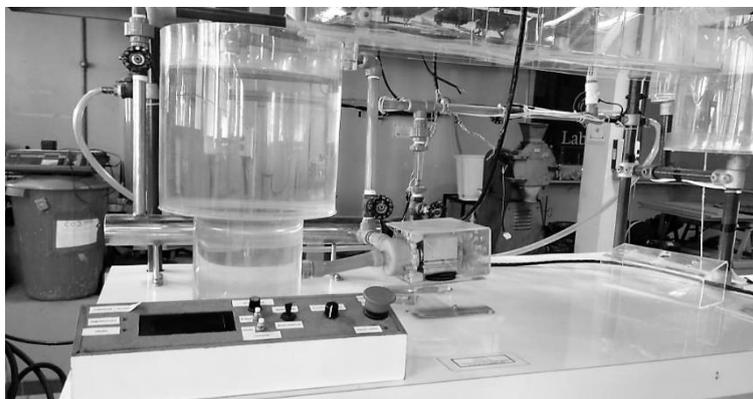
cálculos para o balanço de energia foram realizados por meio de modelagem matemática e ensaios experimentais.

2 MODERNIZAÇÃO DA PLANTA DIDÁTICA

O Laboratório de Operações e Processos (LOP) é uma disciplina que compõe a matriz curricular do curso de Engenharia Química na UFMG. Equivalente ao trabalho de conclusão de curso, o LOP desafia os alunos a resolver problemas reais de forma colaborativa, aplicando e integrando os conhecimentos teóricos e práticos adquiridos ao longo da graduação de forma multidisciplinar. Os alunos “passam” por todas as etapas de um trabalho científico: revisão bibliográfica, definição da metodologia a ser adotada, realização de experimentos, análise de resultados e elaboração de um relatório final” (DEQ, 2024). O objetivo dessa disciplina é desenvolver nos alunos habilidades de metodologia científica e solução de problemas comuns na indústria, além da capacidade de realizar um trabalho colaborativo em grupo.

Em um dos trabalhos da disciplina, foi proposto aos alunos um estudo de implementação de técnicas para transformar equipamentos tradicionais em sistemas automatizados e inteligentes (Belisário *et al.*, 2020). A modernização de um equipamento existente permite melhorar seu desempenho, eficiência ou vida útil. Isto traz inovação sem a necessidade de substituição total, evitando desperdícios. Em escala laboratorial, isso pode incluir a atualização de componentes e a adoção de tecnologias mais eficientes para aumentar a precisão e reduzir custos operacionais. O estudo foi realizado em uma planta didática (Figura 1), previamente modernizada (Belisário *et al.*, 2020).

Figura 1 – Trocador de calor com destaque para o painel de controle do equipamento.



Fonte: Belisário *et al.* (2020).

A proposta de modernização foi dividida em três projetos, onde os estudantes aprimoraram as plantas didáticas do Laboratório de Operações Unitárias (LabOp) de forma a permitir operação remota, integrando elementos de tecnologia de automação (TA) e tecnologia da informação (TI) (Belisário *et al.*, 2020):

- i. O projeto inicial envolveu a automação do trocador de calor com a implementação de sensores conectados à internet para coletar e armazenar dados de várias variáveis em um banco de dados local, permitindo a análise da dinâmica operacional do equipamento;
- ii. O segundo projeto expandiu a comunicação de dados, desenvolvendo um sistema de acesso remoto e possibilitando o controle remoto do equipamento com um dispositivo móvel conectado;

- iii. O terceiro se concentrou na programação de algoritmos para identificação automática de falhas, aprimorando a interação entre humanos e máquinas.

Um outro exemplo de projeto realizado no LabOp foi a implementação de QR Codes (códigos de resposta rápida) em cada equipamento principal. Esses códigos de barras 2D podem ser lidos por smartphones, oferecendo acesso a vídeos explicativos sobre o funcionamento dos equipamentos. A iniciativa do projeto foi conduzida pelos alunos e supervisionada pelo professor. Os vídeos estão disponíveis no canal do YouTube do laboratório (LabOp, 2024). A Figura 2 ilustra o QR Code específico associado ao equipamento trocador de calor em estudo neste trabalho.

Figura 2 – Foto da identificação do equipamento com o código QR.



Fonte: elaborada pelos autores.

A integração de recursos tecnológicos nas atividades de ensino visa despertar a motivação e independência dos alunos, incentivando o interesse do aluno e impulsionando o aprendizado. Rosa *et al.* (2021) desenvolveram uma abordagem de modelagem de um trocador de calor genérico, aplicável na indústria. Empregaram o método LMTD para calcular a eficiência e o coeficiente de troca térmica utilizando dados coletados em tempo real por meio de sensores. Uma ferramenta computacional foi criada para comparação visual entre valores teóricos e medidas em tempo real da área de troca térmica e do coeficiente global de transferência de calor (UA), sendo o UA um parâmetro de desempenho fundamental para a eficiência da transferência de calor e é diretamente ligado à limpeza do trocador de calor. Portanto, um algoritmo de tomada de decisão para a limpeza do equipamento foi desenvolvido e fundamentado na modelagem do trocador de calor.

3 METODOLOGIA

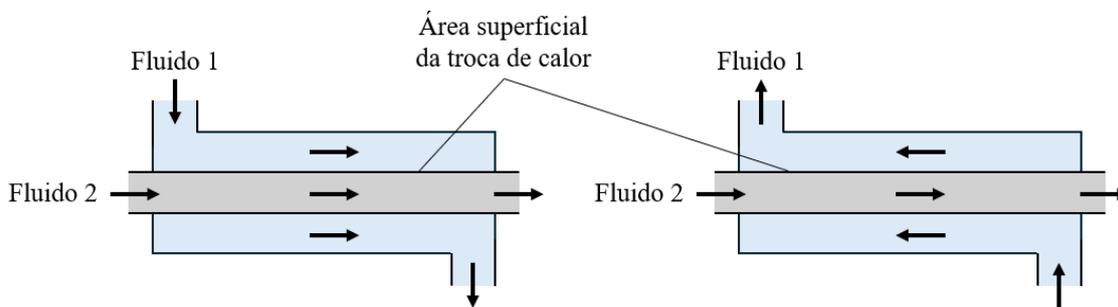
A combinação de modelagem matemática e ensaios práticos é uma abordagem que pode proporcionar aplicação integrada de conceitos, reforçando o conhecimento e promovendo habilidades de resolução de problemas.

3.1 Modelagem matemática do trocador de calor

Modelar e simular um equipamento é fundamental para compreender seu funcionamento, prever seu desempenho em diferentes cenários, além de facilitar a identificação e solução de problemas durante sua utilização.

O trocador de calor opera conforme os princípios da Termodinâmica, envolvendo a transferência de energia térmica entre dois fluidos por meio de uma barreira sólida, seguindo um gradiente de temperatura estabelecido (Bergman *et al.*, 2014). Um trocador de calor típico de dois tubos consiste em um tubo colocado concentricamente dentro de outro de maior diâmetro, com válvulas apropriadas para guiar o fluxo de uma seção para a outra. Um fluido passa pelo tubo interno enquanto o outro circula pelo espaço anular ao redor dele. O funcionamento do trocador varia conforme a direção do fluxo dos fluidos: se eles fluem na mesma direção (escoamento paralelo – Figura 3a) ou em direções opostas (escoamento contracorrente – Figura 3b).

Figura 3 – Representação esquemática de trocadores de calor bitubulares em: escoamento paralelo (a); escoamento contracorrente (b).



Fonte: elaborada pelos autores.

Uma etapa essencial, muitas vezes imprecisa, de qualquer análise de trocadores de calor é determinar o coeficiente global de transferência de calor (UA). Este coeficiente é definido em termos da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos, considerando as resistências de condução e convecção entre fluidos separados por paredes. O coeficiente global de transferência de calor pode ser expresso de acordo com a Equação 1 (Bergman *et al.*, 2014).

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{R_i''}{A_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi \cdot k \cdot L} + \frac{R_e''}{A_e} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad (1)$$

em que os subscritos i e e se referem às superfícies interna e externa do tubo ($A_i = \pi D_i L$ e $A_e = \pi D_e L$), h é o coeficiente convectivo de transferência de calor, k é a condutividade térmica do material do tubo, R'' é o fator de incrustação devido ao acúmulo de depósitos sobre a superfície de troca térmica. Portanto, o coeficiente global de transferência de calor pode ser estimado a partir do conhecimento dos coeficientes de convecção dos fluidos quente e frio, dos fatores de incrustação e de parâmetros geométricos apropriados.

Considerando desprezíveis as resistências por incrustação (fluido limpo) e por condução (material com alta condutividade térmica), o coeficiente global de transferência de calor pode ser calculado apenas pelos coeficientes convectivos (Equação 2).

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad (2)$$

Os coeficientes de convecção podem ser estimados por meio de correlações para cálculo do número de Nusselt. A Equação 3 é uma correlação válida para tubos lisos em uma ampla faixa do número de Reynolds, incluindo a região de transição (Bergman *et al.*, 2014) em que as condições de $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ e $0,6 \leq Pr \leq 2000$ devem ser atendidas. O fator de atrito f é calculado pela Equação 4.

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (3)$$

$$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad (4)$$

Os coeficientes de transferência de calor estão associados às superfícies interna e externa da região anular, os números de Nusselt correspondentes são calculados pelas Equações 5 e 6, com $D_h = D_e - D_i$.

$$Nu_{D,i} = \frac{h_i D_i}{k} \quad (5)$$

$$Nu_{D,e} = \frac{h_e D_h}{k} \quad (6)$$

Para o escoamento interno e anular, o número de Reynolds pode ser determinado pelas Equações 7 e 8, respectivamente, conhecendo-se a vazão mássica (\dot{m}) e a viscosidade (μ) do fluido.

$$Re_{D,i} = \frac{4\dot{m}_i}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} \quad (7)$$

$$Re_{D,e} = \frac{4\dot{m}_e}{\pi \cdot D_h \cdot \mu} \quad (8)$$

Além disso, um dos parâmetros de particular interesse nos trocadores de calor é a sua eficiência, que pode ser calculada pela diferença de temperatura média logarítmica (*Logarithmic Mean Temperature Difference – LMTD*) (Perussi, 2010). A taxa total de transferência de calor (q) (Equação 9) é relacionada com as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor (U) e a área superficial total disponível para troca de calor (A). ΔT_{ml} é a diferença média logarítmica de temperatura entre as duas correntes de fluido (Equação 10).

$$q = UA \cdot \Delta T_{ml} \quad (9)$$

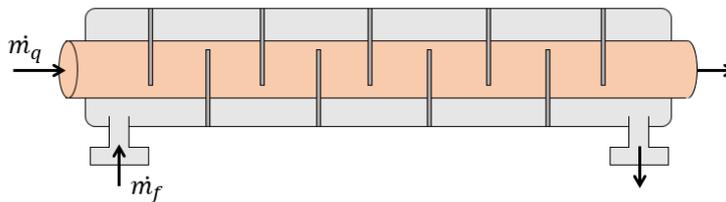
$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (10)$$

Sendo q a taxa total de transferência de calor entre os fluidos quente e frio, desprezando a transferência de calor entre o equipamento e a vizinhança, a aplicação da equação de energia para processos contínuos em regime estacionário fornece o balanço de energia trocado entre os fluidos dentro do trocador (Equação 11).

$$q = \dot{m}_q \cdot c_{p,q}(T_{q,ent} - T_{q,sai}) = \dot{m}_f \cdot c_{p,f}(T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (11)$$

em os índices q e f , são relativos aos fluidos quente e frio, e c_p representa o calor específico dos fluidos. A Figura 4 ilustra os fluxos mássicos \dot{m}_q e \dot{m}_f em um trocador tubular equipado com chicanas, estruturas internas que aumentam a turbulência do fluxo para melhorar a eficiência da transferência de calor.

Figura 4 – Representação dos fluxos mássicos em um trocador tubular com chicanas.



Fonte: elaborada pelos autores.

3.2 Aparato e procedimentos experimentais

A bancada experimental do LabOp (Figura 5) possui um trocador de calor formado por um tubo externo de polimetilmetacrilato (acrílico). O fluido da tubulação interna é aquecido por um aquecedor elétrico e passar pelo interior de um tubo de aço inox. É na superfície desse tubo que será realizada a troca térmica entre os fluidos quente e frio.

Figura 5 – Bancada experimental do trocador de calor do Laboratório de Operações Unitárias.

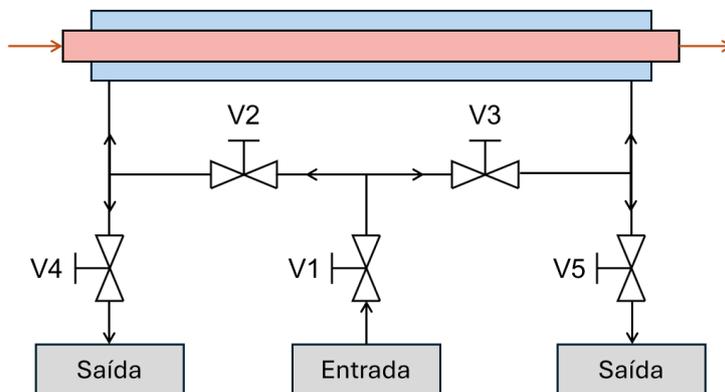


Fonte: elaborada pelos autores.

Nas extremidades das tubulações estão instalados termopares. A vazão do fluido quente foi medida com a calha Parshall enquanto a vazão do fluido frio foi medida utilizando um rotâmetro. A água foi utilizada tanto no escoamento interno do tubo quanto na região anular, entre os tubos de inox e de acrílico. Um sistema de válvulas manuais permite alterar o fluxo do fluido frio, assim, o trocador pode operar em escoamento paralelo ou em contracorrente (Figura 6). Quando as válvulas V1, V2 e V5 estão abertas, e as válvulas V3

e V4 estão fechadas, o fluido frio flui de forma paralela ao fluido quente. Para o escoamento contracorrente, as válvulas V1, V3 e V4 são abertas, enquanto as válvulas V2 e V5 devem estar fechadas.

Figura 6 – Configurações de escoamento o sistema com válvulas manuais.



Fonte: elaborada pelos autores.

As dimensões do trocador de calor estão apresentadas na Tabela 1. Os experimentos foram conduzidos da seguinte maneira para as duas configurações de escoamento: (i) primeiramente, foram determinadas as vazões de água; (ii) em seguida, o aquecedor foi ligado e esperou-se até que o sistema atingisse regime permanente antes de realizar as leituras de temperatura; (iii) foram realizadas as medidas das temperaturas em pontos específicos do experimento.

Tabela 1 – Dados das dimensões do trocador de calor.

Variáveis	Valor
D_i [m]	0,022
D_e [m]	0,050
L [m]	1,0

Fonte: elaborada pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram obtidos segundo procedimentos detalhados anteriormente para as diferentes condições de escoamento (Tabela 2).

Tabela 2 – Medições para as diferentes configurações de fluxo do trocador de calor.

Variável	Configuração	
	Contracorrente	Paralelo
$T_{q,ent}$ [°C]	54	53
$T_{q,sai}$ [°C]	47	48
$T_{f,ent}$ [°C]	24	24
$T_{f,sai}$ [°C]	32	30
ΔT_{ml} [°C]	22,5	23,1
\dot{m}_q [kg/s]	0,13	
\dot{m}_f [kg/s]	0,15	

Fonte: elaborada pelos autores.

Nos experimentos, optou-se por utilizar água como fluido tanto no fluxo quente quanto no frio devido às suas propriedades bem conhecidas e à sua disponibilidade. As propriedades da água (Tabela 3) foram obtidas a partir da temperatura média de entrada e saída dos fluidos quente e frio.

Tabela 3 – Propriedades da água.

Variável	Fluxo	
	Interno	Anular
ρ [kg/m ³]	991,1	996,3
c_p [J/(kg.K)]	4179	4179
μ [N.s/m ²]	528×10^{-6}	855×10^{-6}
k [W/(m.K)]	0,640	0,613
Pr [-]	3,42	5,83

Fonte: elaborada pelos autores.

Um ajuste foi necessário especificamente para garantir que o balanço de energia do sistema fosse coerente, ou seja, que a quantidade de energia que entra no sistema fosse igual à quantidade de energia que sai, considerando regime permanente.

Nas duas configurações (contracorrente e paralelo), a taxa de calor do fluido frio é maior que a do fluido quente. Como a taxa é dada em função da vazão mássica, do calor específico e das temperaturas, $q = f(\dot{m}, c_p, \Delta T_{ml})$, o erro pode estar em uma dessas variáveis. Os resultados sugerem que os resultados de vazão mássica (\dot{m}) obtidos estão adequados. Além disso, o calor específico da água (c_p) não muda significativamente numa ampla faixa de temperatura. Assim, dentre todas as variáveis, a variável temperatura parece ser a maior fonte de incerteza, porque está sujeita a sofrer maior influência das considerações adotadas: (i) perda de calor para vizinhança desprezível; (ii) propriedades constantes em todo o escoamento; (iii) resistência térmica na parede do tubo e fatores de deposição desprezíveis.

Portanto, foram realizadas as seguintes considerações: (i) as temperaturas de entrada e saída do fluido quente estão corretas; (ii) a temperatura de entrada do fluido frio está correta, (iii) a temperatura de saída do fluido frio ($T_{f,sai}$) não está correta e foi estimada utilizando a Equação 11, considerando que a taxa de calor do fluido quente é a mesma do fluido frio. Os resultados dos valores de $T_{f,sai}$ obtido experimentalmente e estimado são apresentados na Tabela 4.

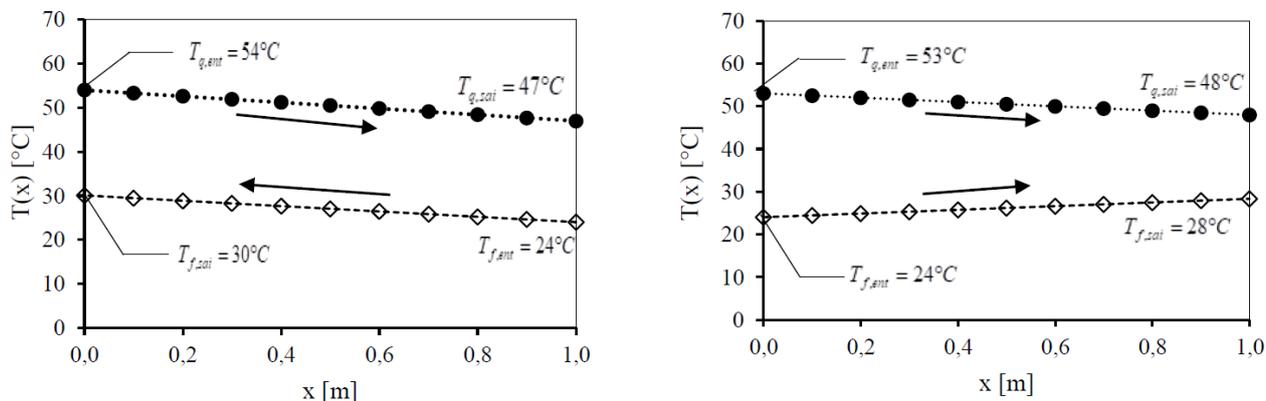
Tabela 4 – Resultados do balanço de energia sem e com o ajuste de $T_{f,sai}$.

Variável	Sem ajuste		Com ajuste	
	Contracorrente	Paralelo	Contracorrente	Paralelo
$T_{f,sai}$ [°C]	32	30	30	28
q_q [W]	3779	2694	3779	2694
q_f [W]	4996	3748	3779	2694
U [W/(°C.m ²)]	2430	1690	2329	1621

Fonte: elaborada pelos autores.

Com o ajuste, foi garantido que os fluxos de calor do fluido quente (q_q) e do fluido frio (q_f) fossem iguais. No fluxo contracorrente, a troca térmica é maior ($q = 3779$ W) em comparação com o fluxo paralelo ($q = 2694$ W) devido a um maior valor de coeficiente global de transferência de calor (U), o qual é promovido por um maior ΔT entre os fluidos. A variação da temperatura ao longo do trocador de calor pode ser comparada nas duas configurações analisadas: contracorrente (Figura 7a) e paralelo (Figura 7b).

Figura 7 – Variação da temperatura dos fluidos quente e frio: em contracorrente (a); em paralelo (b).



Fonte: Elaborada pelos autores.

É importante destacar que a ocorrência de erros em experimentos práticos pode representar também uma oportunidade de promover habilidades de resolução de problemas nos alunos. O ajuste do balanço de energia foi uma solução para resolver um problema relacionado à precisão dos resultados, especialmente devido à resolução limitada do medidor de temperatura. Esse fato representou uma restrição na obtenção de valores de temperatura mais precisos, o que conseqüentemente impactou a qualidade dos resultados obtidos.

5 CONCLUSÃO

O LabOp tem implementado uma série de mudanças com o objetivo de impulsionar transformações no processo de ensino e aprendizagem. Essas alterações são baseadas em iniciativas de inclusão de ferramentas digitais, incluindo o desenvolvimento e aprimoramento de protótipos com acesso remoto, videoaulas e outras tecnologias.

Os resultados práticos mostraram que o trocador de calor na configuração em contracorrente é mais eficiente que o trocador em paralelo, porque permite maior transferência de calor entre os fluidos quente e frio devido à diferença de temperatura ao longo do trocador, o que corrobora com análises teóricas de trocadores de calor.

O balanço de energia precisou ser reajustado devido a discrepâncias encontradas nos cálculos realizados. Isto pode estar associado, principalmente à dois fatores: (i) valores da temperatura imprecisos; (ii) a resistência à incrustação pode ser significativa, pois a água tinha um aspecto escuro indicando a presença de impurezas ou sedimentos.

Destaca-se a importância do aspecto prático na aprendizagem, visando analisar e corrigir dados para que seja possível tirar conclusões sobre as informações obtidas e buscar soluções para as dificuldades encontradas. Deste modo, para trabalhos futuros, recomenda-se atualizar o sistema de medição de temperatura e garantir a limpeza periódica da bancada.

REFERÊNCIAS

BALLESTEROS, M.A.; DAZA, M.A.; VALDÉS, J.P.; RATKOVICH, N.; REYES, L.H. Applying PBL methodologies to the chemical engineering courses: Unit operations and modeling and simulation, using a joint course project. **Education for Chemical Engineers**, v. 27, p. 35–42, 2019.

BELISÁRIO, A. B.; FARIA, D. G.; CHAVES, D. H. S.; ALMEIDA, G. M.; CARDOSO, M. Relatos de experiência de inserção de tecnologias digitais no ensino de Engenharia. **Revista Docência do Ensino Superior**, v. 10, p. 1–18, 2020.

BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S.; INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

Departamento de Engenharia da Química (DEQ). **Grade curricular**. Disponível em: <http://www.deq.ufmg.br/graduacao/grade-curricular>. Acesso em: 05 jun. 2024.

GOLTER, P.; VAN WIE, B.; BROWN, G. comparing student experiences and growth in a cooperative, hands-on, active, problem based learning, environment to an active, problem based environment. In: 2007 Annual Conference & Exposition, **American Society for Engineering Education**, 2007.

KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 3. ed., CRC Press, 2012.

Laboratório de Operações Unitárias (LabOp). **Laboratório de Operações Unitárias da UFMG**. Disponível em: <https://www.youtube.com/channel/UCeyt7jGGD5SWjIN7Ik9gplg>. Acesso em: 05 jun. 2024.

OLIVEIRA, V. F. Crescimento, evolução e o futuro dos cursos de engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 24, n. 2, p. 3–12, 2005.

PERUSSI, R. **Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RODRIGUES, R. Uso do simulador EMSO em aulas de operações unitárias para projeto de trocadores de calor e evaporadores. In: II Process Systems Engineering Brazil, 2022, Curitiba. **Anais**. Curitiba.

ROSA, A.H.R.; FERREIRA, R.V.; PEREIRA, C.A. Integrated PBL and HIL practices for real-time simulations applied in technical and engineering teaching using embedded systems. **Przeglad Elektrotechniczny**, v. 97, n. 1, p. 46–52, 2021.

THEORETICAL-PRACTICAL APPROACH FOR TEACHING AND EVALUATING THE PERFORMANCE OF A HEAT EXCHANGER

Abstract: *Teaching and learning in engineering face significant challenges, especially with the demands of Industry 4.0, requiring methodological updates to adequately prepare future professionals. The gap between theoretical teaching and practical application hinders learning, as students struggle to effectively apply theoretical concepts in real-world situations. A theoretical-practical approach in heat transfer education was proposed in this study using a heat exchanger to evaluate efficiency in counter-current and parallel flow configurations. The work was conducted in a didactic plant, previously modernized, located*

in the Unit Operations Laboratory (LabOp) at the Federal University of Minas Gerais. The theoretical part was developed through classroom instructions while the practical part was carried out with the assistance of digital tools, including manuals and videos available online through the LabOp website. The results highlight the higher efficiency of the counter-current heat exchanger and the need to adjust the energy balance due to temperature measurement inaccuracies and the presence of fouling. The active participation of students in the learning process is emphasized, along with their ability to solve encountered challenges, developing collaboration and autonomy skills.

Keywords: practical application, engineering education, heat transfer, heat exchanger.

