



CONGRESSO BRASILEIRO
DE ENGENHARIA QUÍMICA EM
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

21-24 Julho de 2019
Uberlândia/MG



MÓDULO DE SIMULAÇÃO DIDÁTICO PARA TROCADOR DE CALOR EM SOFTWARE LIVRE

A. P. C. RODRIGUES¹, P. H. S. LOPES¹, J. V. W. SILVEIRA¹ e A. O. CARDOSO¹

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: anapaulacrodriques@gmail.com

RESUMO – A simulação se encontra no centro da chamada 4ª revolução industrial. Desenvolver simulações a partir dos chamados *digital twins* permite a otimização de processos e equipamentos de forma mais precisa e eficaz. Para isto, a construção de modelos cada vez mais precisos e condizentes com equipamentos reais para equipamentos é explorada e aplicada na Engenharia Química. No presente trabalho, ainda em desenvolvimento, realizou-se a modelagem e simulação de um trocador de calor utilizado nos laboratórios de ensino do curso de Engenharia Química da UFVJM, objetivando a construção de um módulo de simulação didático para o mesmo através de um modelo matemático distribuído. Experimentos foram realizados para determinar o coeficiente global de troca térmica no equipamento e para fins de validação do modelo. As equações que compõem o modelo utilizado neste trabalho foram discretizadas em n estágios e simuladas no *software* livre Scilab. Os valores encontrados para a temperatura do fluido quente e frio na simulação são bem próximos dos valores medidos no trocador de calor, sendo o erro obtido para o modelo foi 1,89% quando analisada a temperatura do fluido frio e 0,18% para a temperatura do fluido quente, nas condições simuladas. Os resultados obtidos na simulação indicam que a maior troca térmica entre os fluidos ocorre na entrada dos fluxos no equipamento. Estes permitirão a revisão do modelo e verificação das hipóteses adotadas para a construção de um *digital twin*.

1. INTRODUÇÃO

Indústria 4.0 é um conceito originado na Alemanha no ano de 2012 como resultado de um projeto cujo intuito era desenvolver estratégias governamentais para tecnologia, sendo esse o alicerce para a evolução necessária na indústria de todo o mundo (Neto *et al.*, 2018; ESSS, 2017). A incorporação da internet das coisas e dos serviços nos processos de manufatura são os agentes de inovação que deram origem a quarta revolução industrial através da utilização e desenvolvimento de sistemas *cyber-físicos*. Tais sistemas consistem na integração entre a fábrica e a internet, onde são criadas redes de máquinas, objetos inteligentes que são capazes de interagir entre si (Cameira *et al.*, 2017).

Nesse sentido, uma importante ferramenta é o desenvolvimento e uso de *digital twins*, uma cópia virtualizada de processos reais. Grieves e Vickers (2017) conceituam um *digital*

twin como uma construção de informações virtuais que descrevem completamente um ativo físico real ou potencial.

Neste trabalho foi realizada a elaboração e etapa inicial de validação de um modelo matemático para a construção de um módulo de simulação didático para um trocador de calor utilizado nos laboratórios de ensino da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) a ser utilizado para a construção de um *digital twin*.

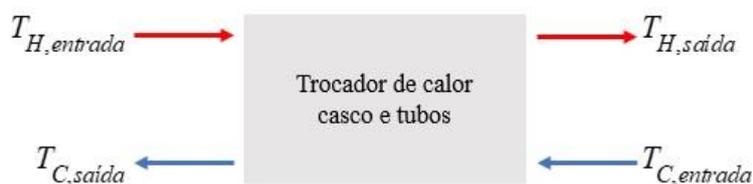
2. METODOLOGIA

O trocador de calor utilizado faz parte do módulo didático trocador de calor multitubular (UpControl), construído com casco em acrílico e 7 tubos em aço AISI 304, com dois passes no casco, dois passes no tubo e duas chicanas. A área de troca térmica do módulo é de 0,15 m². O fluido quente escorre pelo interior dos tubos e o fluido frio pelo casco. O módulo tem possibilidade de operação com diferentes configurações de escoamento, paralelo ou contracorrente, temperatura e vazão de entrada dos fluidos quente e frio. A temperatura é coletada na entrada e na saída do trocador e os dados são armazenados em planilha eletrônica em *software* próprio.

2.1. Experimentos

Inicialmente, diversos experimentos foram conduzidos no trocador de calor para obtenção do coeficiente global de troca térmica (U) do módulo. A configuração de fluxo aplicada foi contracorrente e utilizou-se água como fluido tanto nos tubos quanto no casco. A temperatura de entrada da corrente quente utilizada variou de 45 °C a 65 °C. Manteve-se a vazão de água fria constante em 1,4 L.min⁻¹ para todas as temperaturas e a vazão de água quente variou de 0,6 a 1,4 L.min⁻¹. A temperatura de entrada do fluido frio foi mantida aproximadamente constante, em torno de 21,8 °C. A Figura 1 representa a configuração do trocador utilizado no presente trabalho.

Figura 1 – Configuração do trocador de calor em contracorrente.



2.2. Coeficiente Global de Troca Térmica

Uma vez realizados os experimentos, foi possível calcular o valor de U utilizando os valores das temperaturas de entrada e saída dos fluidos bem como a área de troca térmica do trocador de calor. Para fins de cálculo, considerou-se o calor trocado pela corrente quente como o calor trocado no sistema. A Equação 1 foi utilizada para calcular o calor trocado.

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (1)$$



A Equação 2 foi utilizada para calcular a o coeficiente global de troca térmica, uma vez que a A e o Q são conhecidos. O fator de correção (Y) empregado foi 1, devido ao tipo de trocador utilizado (Kern, 1987).

$$Q = UAY\Delta T_{ML} \quad (2)$$

2.3. Modelo Matemático

Utilizou-se um modelo matemático distribuído de trocador de calor (Novazzi, 2007) cujas equações apresentadas neste trabalho são provenientes de balanços de energia dos fluxos quente e frio e de relações da termodinâmica e da transferência de calor. A Equação 3 remete ao fluido quente e a Equação 4 ao fluido frio, sinalizado com o subscrito H e C, respectivamente (Luyben, 1990; Novazzi, 2007).

$$\frac{\partial T_H}{\partial t} = -\frac{m_H}{\rho_H V_H} \frac{\partial T_H}{\partial z} - \frac{UA}{\rho_H V_H C_{p,H}} (T_H - T_C) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_C}{\partial t} = \frac{m_C}{\rho_C V_C} \frac{\partial T_C}{\partial z} - \frac{UA}{\rho_C V_C C_{p,C}} (T_H - T_C) \quad (4)$$

na qual m é a vazão mássica, t é o tempo, z é a posição axial, V é o volume, A é a área de troca térmica, U é o coeficiente global de troca térmica, C_p é o calor específico, ρ é a massa específica e v é a relação V/n, sendo n é o número de estágios nos quais o comprimento do trocador será dividido.

As propriedades físicas utilizadas para água foram obtidas através das correlações apresentadas na literatura (Green; Perry, 2007), sendo calculadas na temperatura de entrada dos fluidos.

Para fins de simplificação considerou-se as hipóteses: efeito dinâmico das paredes do trocador é desprezível, podendo ser considerada a uniformidade de temperatura; seção de cada estágio é suficientemente pequena, de modo que as temperaturas de saída dos fluidos são iguais as temperaturas no interior do estágio; a perda de calor é desprezível com a vizinhança; a temperatura de entrada dos fluídos frio e quente são constantes; os efeitos de incrustações são desprezíveis; a média logarítmica de temperaturas pode ser simplificada pela média aritmética de temperaturas.

2.4. Método das Diferenças Finitas

O método numérico utilizado para resolução das equações parciais que constituem o modelo apresentado neste trabalho foi o método das diferenças finitas. O método consiste em transformar equações diferenciais em equações algébricas através de aproximações das derivadas (Pinto; Lage, 2001). Para isso, o domínio da variável independente é dividido em subdomínios, processo conhecido como discretização, e as aproximações das derivadas das variáveis dependentes aplicadas a um ponto são feitas através de uma expansão em série de Taylor, onde os termos de terceira ordem ou superiores podem ser desprezados.

Assim, considerando a variável dependente $u(z,t)$, a equação do método das diferenças finitas atrasada, abordagem aplicada neste trabalho, proveniente da expansão em série de Taylor para uma derivada de ordem um é apresentada na Equação 5.

$$\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \approx \frac{u(z_i, t_i) - u(z_{i-1}, t_i)}{\Delta z} \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resolução das Equações 3 e 4 pelo método das diferenças finitas atrasadas (Equações 6 e 7). A simulação foi realizada no *software* Scilab.

$$\frac{dT_H}{dt} = -\frac{m_H}{\rho_H V_H \Delta z} (T_{H(i,j)} - T_{H(i-1,j)}) - \frac{UA}{\rho_H V_H C_{p,H}} \left[\frac{(T_{H(i,j)} - T_{C(i,j)}) + (T_{H(i-1,j)} - T_{C(i-1,j)})}{2} \right] \quad (6)$$

$$\frac{dT_C}{dt} = \frac{m_C}{\rho_C V_C \Delta z} (T_{C(i,j)} - T_{C(i-1,j)}) - \frac{UA}{\rho_C V_C C_{p,C}} \left[\frac{(T_{H(i,j)} - T_{C(i,j)}) + (T_{H(i-1,j)} - T_{C(i-1,j)})}{2} \right] \quad (7)$$

Em termos de validação do modelo, corridas preliminares foram realizadas no trocador de calor mantendo-se a vazão de fluido quente e fluido frio constante e igual a $1,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. Os parâmetros obtidos no trocador e de entrada do modelo, bem como o valor do coeficiente de calor calculado para cada corrida podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do trocador de calor

Fluido frio		Fluido quente		U [J/(s.dm ² .K)]
Temperatura de entrada (K)	Temperatura de saída (K)	Temperatura de entrada (K)	Temperatura de saída (K)	
295,05	301,18	324,15	316,38	2,26
295,95	304,68	327,88	319,48	2,31
293,55	303,58	332,68	320,52	2,79

A partir dos parâmetros dados na Tabela 1, simulou-se o modelo e os resultados obtidos para a temperatura de saída na simulação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferença entre as temperaturas na saída do trocador e na simulação

Temperatura do fluido frio (K)		Temperatura do fluido quente (K)	
Saída no trocador	Saída simulada	Saída no trocador	Saída simulada
301,18	297,68	316,38	316,11
304,68	298,91	319,48	318,89
303,58	297,87	320,52	319,98

Nota-se que os valores de temperatura simulados diferem pouco dos valores medidos no trocador de calor. De fato, o maior erro observado para a temperatura fria foi de 1,89% e para a temperatura quente de 0,18%.

Os gráficos gerados na simulação para a variação da temperatura fria e quente ao longo da extensão do trocador, apresentados na Figura 2 e 3, respectivamente, correspondem aos obtidos nas condições de entrada $T_{fria} = 295,05 K$ e $T_{quente} = 324,15 K$. Nas demais condições de entrada observou-se comportamento semelhante.

Figura 2 – Distribuição da temperatura ao longo do trocador de calor no casco.

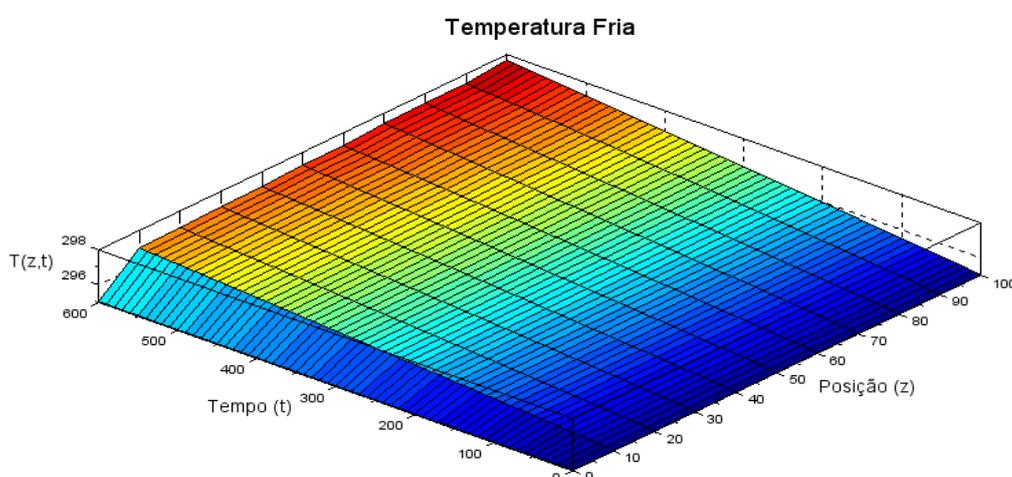
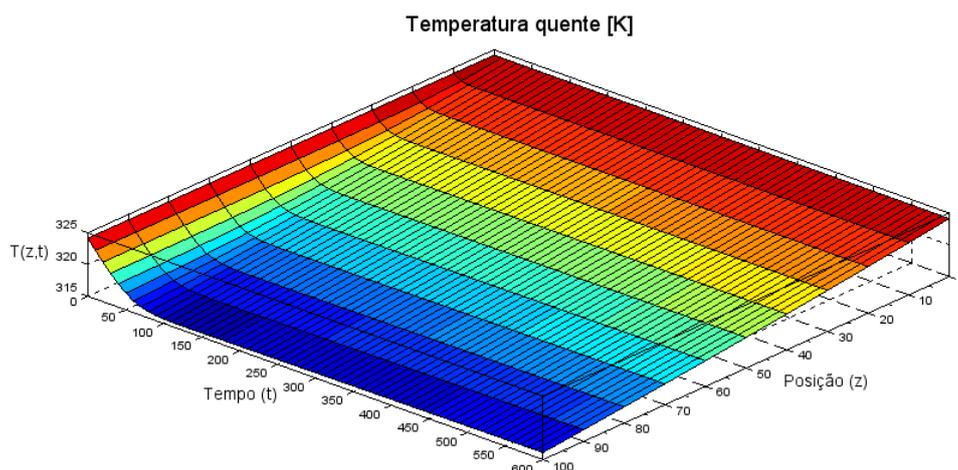


Figura 3 – Distribuição da temperatura ao longo do trocador de calor nos tubos.



Na Figura 2 e 3, nota-se que a temperatura do fluido no interior do casco aumenta à medida que o tempo avança e ao longo do trocador, chegando a maior temperatura ao fim do tempo de simulação na extremidade de saída do trocador, que opera em contracorrente. Observa-se também uma acentuada troca térmica nos instantes iniciais de simulação na extremidade de saída do fluido quente, quando o mesmo entra em contato com a entrada de fluido frio.



4. CONCLUSÃO

O modelo proposto para construção de um módulo de simulação didático foi simulado utilizando parâmetros obtidos no trocador de calor. Tais resultados são preliminares e fazem parte da primeira etapa da validação do modelo.

O comparativo entre a temperatura obtida no trocador de calor e a temperatura proveniente da simulação apresentou uma pequena diferença, onde o maior erro para a temperatura fria foi de 1,89% e para a temperatura quente foi de 0,18%, nas condições simuladas. É válido ressaltar que a simulação das demais condições operacionais faz parte das perspectivas futuras do presente trabalho para que se possa avaliar se o erro se mantém. Caso o erro se mantenha nas próximas simulações, é cabível uma reavaliação das hipóteses adotadas, tais como a consideração de que não há perda de calor para a vizinhança, a desconsideração do efeito de incrustações, entre outros. Outro ponto a ser observado é que a maior parte da troca térmica acontece na entrada dos fluidos quente e frio, variando pouco ao longo do trocador. No entanto, o erro aferido até o momento é baixo, o que torna os resultados encontrados aceitáveis.

5. REFERÊNCIAS

- CAMEIRA, R. F.; BERNARDI, J. S. B.; SANTOS, L. F. A. dos. *Indústria 4.0 e manutenção preditiva*, SIMPOI, 10 p., 2017.
- ESSS. *Os Pilares da Indústria 4.0*. Tecnologia de Simulação, 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/os-pilares-da-industria-4-0/>>. Acesso em: 9 abril 2019.
- GREEN, D. W.; PERRY, R. H. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Professional, 2007.
- GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: KAHLEN, F. J.; FLUMERFELT, S.; ALVES, A. (Eds). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham, 2017.
- KERN, D. Q. *Processos de transmissão de calor*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1987.
- LUYBEN, W. L. *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. 2. ed. Cingapura: McGraw-Hill, 1990.
- NETO, A. A.; PEREIRA, G. B.; DROZDA, F. O.; SANTOS, A. de P. L. A busca de uma identidade para a indústria 4.0. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 4, n. 4, p. 1937-1395, 2018.
- NOVAZZI, L. F. *Dinâmica e controle de redes de trocadores de calor*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 127 p., 2007.
- PINTO, J. C.; LAGE, P. L. C. *Métodos numéricos em problemas de engenharia química*. Rio de Janeiro: E-paper, 2001.