

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

MODELAGEM E ISOLAMENTO ÓTIMO DE UM TROCADOR DE CALOR BITUBULAR

Ingrid Freitas Assad¹ – ingrid.assad@hotmail.com

Iago de Sousa Ferreira da Silva¹ – iagosfsilva@gmail.com

Izabela Guimarães Ribas¹ – izabela.ribas.eq@gmail.com

Saulo Fernando dos Santos Vidal¹ – saulo_vidal@hotmail.com

¹Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – Montes Claros, MG, Brasil

Resumo. *A Transferência de Calor é um fenômeno que acontece incessantemente em meios com temperaturas diferentes. Um exemplo, são nos trocadores de calor, dispositivos amplamente utilizados na indústria com o intuito de aquecer ou resfriar um fluido de operação. Neste trabalho foi feita a modelagem fenomenológica de um trocador de calor tipo tubo duplo, determinando parâmetros circunstanciais do processo. Também foi proposto a aplicação de um isolante a base de fibras de sisal tratadas com espessura ótima de 0,0001 m em sua superfície externa.*

Palavras-chave: *Modelagem, Isolamento ótimo, Trocador de calor bitubular*

1. INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias nos últimos anos trouxe, com a expansão da indústria, um aumento na qualidade de vida ao redor do mundo. Muitas descobertas importantes vêm sendo viabilizadas por avanços na engenharia e, muitos deles se devem ao transporte de energia na forma de calor.

A transferência de calor é uma questão predominante em todo o redor, não só se tratando de engenharia e indústrias. Na natureza, por exemplo, a temperatura regula e envia respostas biológicas nos seres vivos a todo momento, estabelecendo o limite entre saúde e doença, como em casos de febre e hipotermia. Suas aplicações incluem também aparelhos domésticos, edifícios, dispositivos eletrônicos, processamento de alimentos, entre outros.

Na engenharia, é importante entender os mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor e saber usar as equações das taxas que determinam a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo.

Problemas físicos podem ser representados por expressões matemáticas que mostram o grau de dependência de algumas variáveis em relação a outras, através de boas aproximações do evento real.

Muitas vezes os acontecimentos parecem se desencadear aleatoriamente, mas, na verdade, são regidos por essas leis físicas que permitem prever e entender comportamentos de um evento, além de estudá-los sem precisar realizar caros e demorados experimentos. Percebe-se então, o quão fundamental a modelagem matemática é.

O grande problema encontrado nos processos de troca térmica é a perda de energia para o ambiente. Devido a isso, parte dos projetos é reservada à minimização dessas perdas, diminuindo o gasto de energia para o procedimento e também, conseqüentemente, aumentando sua viabilidade. Uma maneira de diminuir o desvio da energia é acrescentando materiais isolantes na interface com o meio externo. Nesse contexto, este trabalho vem propor uma forma de aplicar isso em um módulo didático de trocador de calor bitubular.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem é vista como uma aproximação da realidade feita através de representações matemáticas, sendo utilizada para estudar comportamentos e tendências de diversos fenômenos. Sendo assim, na área da transferência de calor encontram-se estudos acerca da própria modelagem, como o de Gao, Geer e Sammakia (2015), que propuseram duas metodologias compactas para modelagem transiente de trocadores de calor, e o de Bicca (2006), que desenvolveu um procedimento hierárquico de cálculos para a predição térmica e hidráulica de trocadores de calor casco e tubos com acurácia e baixo custo computacional com o simulador EMSO.

Em vista disso, Imen e Ammar (2017) validaram um modelo analítico para a distribuição de temperatura através da simulação no software ANSYS CFX para um trocador de calor de tubos cilíndricos e coaxiais com extremidade esférica. Com o mesmo software, Costa (2016) desenvolveu um modelo para análises de um trocador de calor casco e tubo, comparando o coeficiente global de transferência de calor com os obtidos pelos métodos de Tinker e Kern e obtendo resultado satisfatório. Ela analisou também a influência da variação de vazão, espaçamento entre as chicanas e o corte delas na transferência de calor e perda de carga.

Modelos com aplicação industrial têm sido cada vez mais trabalhados, como a modelagem de um trocador de calor de placas para simulação do resfriamento do suco de laranja, feita por Berto (2000).

Antonescu e Stanescu (2017) apresentaram um modelo numérico e computacional de um aquecedor de tubos aletados e lisos. Gao, Geer e Sammakia (2015) encontraram um modelo matemático para um trocador de calor de fluxo cruzado e mostraram a influência da variação do fluxo e dos parâmetros, e o efeito da combinação das funções rampa e degrau.

Wang et al. (2017) desenvolveram um modelo numérico em 3D para resolver problemas de otimização de trocadores de calor tipo placas, considerando além do coeficiente de troca térmica, a queda de pressão, chegando assim no melhor contexto.

Ainda sobre otimizações, Westphalen (1999) propôs um algoritmo para otimizar correntes de extração em simulações estáticas e dinâmicas do uso de evaporadores e Esfe et al. (2017) otimizaram o fluxo do nanofluido MgO-água através da função objetivo para aumentar o coeficiente de transferência de calor e reduzir custos, variando a fração de volume de sólidos, diâmetro das partículas e valores de número de Reynolds.

A transferência de calor de um equipamento deve ser minuciosamente analisada pois Dvorák e Vít (2017) provaram a influência das dimensões de um trocador de calor tipo placas

no processo: um trocador maior possui maior efetividade e menor queda de pressão que um trocador menor, para um mesmo fluxo.

Mashoofi, Pourahmad e Pesteei (2017) estudaram o efeito de fitas perfuradas dentro de um trocador de calor bitubular, e concluíram que furos 5 mm e número de Reynolds igual à 16000 apresentam máximo aprimoramento da performance térmica.

Em vista dos diversos estudos sobre a transferência de calor envolvendo modelagens e otimizações, percebe-se a importância dos trabalhos na área para a Engenharia em geral, contribuindo então com conhecimentos teóricos e práticos.

3. METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em um módulo didático de trocador de calor tipo tubo duplo nos laboratórios do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, *campus* Montes Claros.

A Fig. 1, a seguir, mostra uma imagem real do equipamento utilizado e a Fig. 2, logo depois, mostra um arranjo esquemático.



Figura 1 – Trocador de calor bitubular objeto deste estudo.

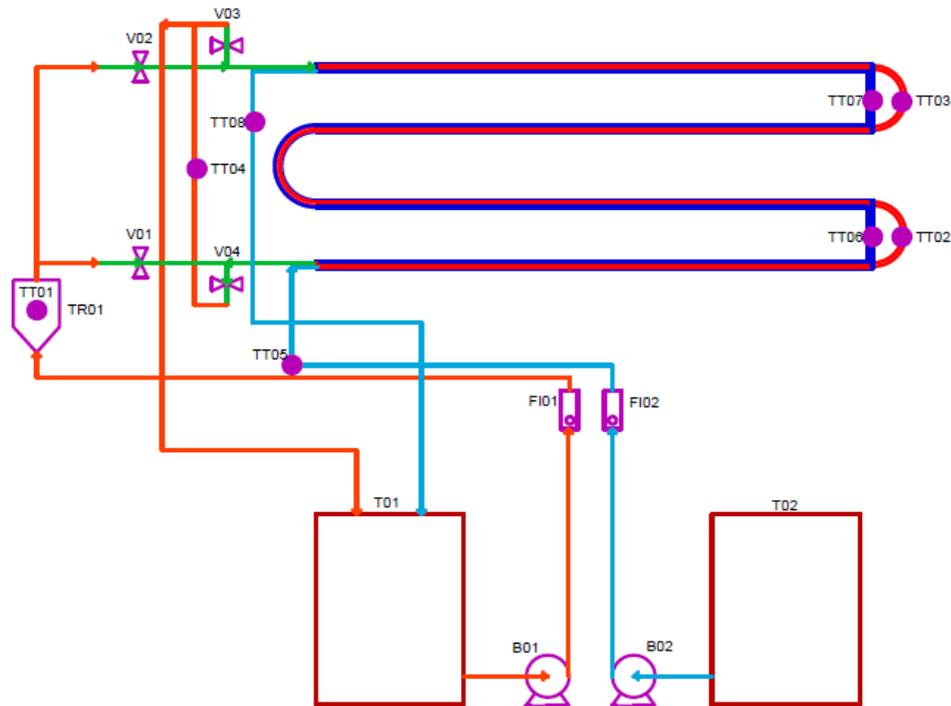


Figura 2 – Representação do módulo didático.

O módulo é composto de um trocador de calor bitubular, tendo seus tubos, com extensão de 3,86 m, alimentados por dois tanques de 50 L (T-01 e T-02) através de mangueiras e com a ajuda de bombas centrífugas (B-01 e B-02). O fluido quente é aquecido por uma resistência ajustável e as temperaturas (fluido quente e frio) são medidas antes de entrarem no trocador, em dois locais ao longo dele e na saída dos tubos.

Antes de ligar o equipamento, as válvulas foram configuradas para o arranjo em contracorrente (válvulas V-02 e V-04 abertas e válvulas V-01 e V-03 fechadas) e os tanques foram cheios, de acordo com o recomendado, de água destilada.

Depois de ligar a chave do módulo, ligou-se a bomba B-01 e abriu-se o rotâmetro FI-01, em seguida foi feito o mesmo com a bomba B-02 e o rotâmetro FI-02. Após atingir o estado estacionário de ambas as vazões (para que não houvesse circulação de bolhas) os rotômetros foram ajustados para $8,889\text{E-}08$ (quente) e $5,983\text{E-}06$ (frio) m^3/s e a resistência (TIC) foi ajustada para aquecer o fluido do tubo interno até 35°C .

Quando todos os indicadores de temperaturas (TI) se estabilizaram, foram anotados os oito valores e o TIC foi ajustado para 50°C . Foi feito o mesmo procedimento para essa temperatura e para 65°C .

Em seguida a vazão do fluido que entra como quente foi ajustada para $2,667\text{E-}07$ e depois para $4,444\text{E-}07$ m^3/s , mantendo-se o fluido frio fixo em $3,972\text{E-}07$ m^3/s . As mesmas temperaturas foram ajustadas para cada vazão e foram anotados os valores dos sensores da mesma forma.

Para a validação foi feito o mesmo procedimento descrito anteriormente, com a vazão de fluido frio fixada em $9,722\text{E-}08$ m^3/s , analisando o fluido quente nas vazões de $4,458\text{E-}07$ e $1,231\text{E-}05$ m^3/s , e alterando a temperatura de aquecimento para 30°C na vazão maior e 40°C em ambas.

4. RESULTADOS

Inicialmente foram observados os valores de temperatura que os sensores indicavam após a estabilização, de acordo com cada vazão de fluido quente escolhida, como se segue na Tabela 1:

Tabela 1 – Temperaturas medidas experimentalmente.

Vazão de fluido quente: 8,889E-08 m ³ /s							
TIC-01	TI-03	TI-02	TI-04	TI-05	TI-06	TI-07	TI-08
35,000	37,767	32,900	31,533	26,400	28,167	31,767	32,900
50,000	47,567	37,900	33,933	26,300	29,467	36,067	37,900
65,000	57,067	45,700	40,633	26,400	31,667	43,167	50,500
Vazão de fluido quente: 2,667E-07 m ³ /s							
TIC-01	TI-03	TI-02	TI-04	TI-05	TI-06	TI-07	TI-08
35,000	34,667	32,000	31,633	26,400	28,667	31,567	32,700
50,000	47,867	43,200	41,333	26,500	33,367	41,867	45,300
65,000	60,467	54,300	50,733	26,500	37,667	52,167	56,300
Vazão de fluido quente: 4,444E-07 m ³ /s							
TIC-01	TI-03	TI-02	TI-04	TI-05	TI-06	TI-07	TI-08
35,000	34,767	32,800	32,733	26,400	29,367	32,167	33,300
50,000	48,167	45,000	44,033	26,600	35,067	43,267	46,500
65,000	60,967	57,100	55,133	26,600	40,867	54,467	58,200

De acordo com o perfil de temperatura mostrado na Tabela 1, foram calculadas, para cada fluido, a densidade, viscosidade, capacidade calorífica e condutividade térmica. Além dessas propriedades, foram calculados também os números adimensionais de Reynolds (Re) e Prandtl (Pr), para a construção do modelo para o número de Nusselt (Nu) mostrado na Eq. 1:

$$Nu = 0,0188 Re^{1,9617} Pr^{1,2243} \quad (1)$$

O modelo foi encontrado minimizando o somatório do quadrado dos erros relativos entre o calor do balanço de energia do fluido quente com as condições experimentais (Eq. 2) e o calor calculado teoricamente (Eq. 3), q_q e q , respectivamente. Os erros encontrados com o modelo estão listados na Tabela 2.

$$q_q = m_q C_p \Delta T \quad (2)$$

$$q = U A \Delta T_{ml} \quad (3)$$

Tabela 2 – Comparação entre o calor teórico e experimental.

TIC (°C)	Q_q (m ³ /s)	q_q (W)	q (W)	Erro	Erro ²
35,000	8,889E-08	1,280	1,482	0,158	0,025
50,000	8,889E-08	5,916	4,780	0,192	0,037
65,000	8,889E-08	8,943	8,132	0,091	0,008
35,000	2,667E-07	3,732	3,691	0,011	0,000
50,000	2,667E-07	9,559	9,615	0,006	0,000

65,000	2,667E-07	15,665	17,276	0,103	0,011
35,000	4,444E-07	4,186	4,069	0,028	0,001
50,000	4,444E-07	10,961	10,362	0,055	0,003
65,000	4,444E-07	18,038	18,487	0,025	0,001
Soma					0,085

Sendo, na Eq. 1, m_q a vazão mássica do fluido quente, C_p a capacidade calorífica dele e ΔT sua diferença de temperatura. Na Eq. 2, U é o coeficiente global de troca térmica, A é a área dessa troca e ΔT_{ml} a média logarítmica das temperaturas. Na Tabela 2, Q_q é a vazão volumétrica do fluido quente.

Os erros presentes na Tabela 2 podem ser considerados pequenos, sendo a maioria menor que 10%. Na validação foi feito o mesmo procedimento com os dados, gerando erro também pequenos (Tabela 3):

Tabela 3 – Comparação entre o calor teórico e experimental (validação).

TIC (°C)	Q_q (m ³ /s)	q_q (W)	q (W)	Erro
40,000	4,458E-07	4,519062	5,255	0,163
30,000	1,231E-05	2,468782	2,659	0,077
40,000	1,231E-05	5,869149	5,901	0,005

Para o cálculo da espessura (e) ótima do isolante sugerido, foi desenvolvida a função objetivo, ou $F.O.$ (Eq. 4), levando em conta a perda de calor para o ambiente do trocador com e sem isolamento (q' e q , respectivamente), o custo da energia elétrica (E) no *campus* Montes Claros do IFNMG, considerado igual a R\$0,87/KWh e o custo do próprio isolante (C).

$$F.O. = (q - q') E - C e \quad (4)$$

Para a otimização da espessura, a função foi derivada em relação a ela e igualada à zero.

Foi escolhida a situação em que a vazão de fluido quente é igual à 2,667E-07 m³/s, entrando no trocador à 50°C. Como isolante, foi selecionada a manta de fibras de sisal tratada com 2% de hidróxido de sódio e de gramatura 1100/1200 g/m², custando R\$2,82/m² com espessura de 0,01067 m.

As fibras de sisal com essa especificidade apresentam condutividade térmica (k) igual a 0,0619 W/m.K conforme Neira (2005), podendo ser classificadas como bom material isolante, ao serem comparadas com materiais comuns usados para este fim, como a lã de vidro ($k = 0,038$ W/m.K a 300K) e a lã de rocha ($k = 0,048$ W/m.K a 300K), segundo Incropera, Dewitt, Bergman e Levine (2008).

Foi escolhido esse material por ser uma fibra vegetal, sendo um material biodegradável, e também para revitalizar a cultura do sisal, agregando valor a seus derivados.

Determinou-se o valor da espessura ótima como 0,0001 m, sendo esse um valor dentro do esperado para o trabalho pois no trocador de calor estudado, por ser de escala laboratorial, ocorre uma baixa taxa de troca térmica, como pode ser observado pelos valores do balanço de energia na Tabela 2.

5. CONCLUSÕES

Foi elaborada a modelagem fenomenológica para o módulo didático do trocador de calor bitubular, chegando na expressão $Nu = 0,0188 Re^{1,9617} Pr^{1,2243}$ para os coeficientes

convectivos do sistema. Pode-se inferir que a equação foi adequada, uma vez que o erro entre a troca térmica teórica e experimental foi pequeno, variando de 19,2% a 0,6% nos pontos escolhidos para a própria modelagem e de 16,3% a 0,5 % na validação da mesma. A espessura encontrada para o isolante foi de 0,0001 m, sendo esse valor suficiente para minimizar a perda de calor para o ambiente e diminuir o custo com a energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ANTONESCU, Nicolae; STANESCU, Paul-Dan. **Computacional model for a condensing boiler with finned tube heat exchanger**. Energy Procedia 112, Elsevier – 2017. P. 555 – 562.
- BERTO, Maria Isabel. **Modelagem matemática e simulação dinâmica de trocadores de calor de placas para o resfriamento de sucos de laranja natural e concentrado**. Departamento de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas.
- BICCA, Gerson Balbuena. **Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- COSTA, Mayse Cintia Vieira da. **Simulação e análise do efeito da variação de parâmetros sobre a perda de carga e transferência de calor em trocadores de calor casco e tubo**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- DVORÁK, Václav; VÍT, Tomáš. **CAE methods for plate heat exchanger desing**. Procedia Engineering 134, Elsevier – 2017. P. 234 – 243.
- ESFE, Mohammad Hemmat et al. **Multi-objective optimization of nanofluid flow in double tube heat exchangers for applications in energy systems**. Energy 137, Elsevier – 2017. P.160 - 171.
- GAO, Tianyi; GEER, James; SAMMAKIA, Bahgat. **Development and verification of compact transient heat exchanger models using transient effectiveness methodologies**. International Journal of Heat and Mass Transfer 87, 2015. P. 265 – 278.
- GAO, Tianyi; GEER, James; SAMMAKIA, Bahgat. **Dynamic response and control analysis of cross flow heat exchangers under variable temperature and flow rate conditions**. International Journal of Heat and Mass Transfer 81, 2015. P. 542 – 553.
- IMEN, Dhahri; AMMAR, Lotfi. **Distribution os the temperature in the coaxial tube heat exchanger with spherical end**. Case Studies in Thermal Engineering, 2017.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MASHOOFI, N.; POURAHMAD, S.; PESTEEI, S. M.; **Study the effect of axially perforated twisted tapes on the termal performance enhancement fator of a double tube heat exchanger**. Case Studies in Thermal Engineering, 2017.
- NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. Fibras de sisal (Agave sisalana) como isolante térmico de tubulações. Centro de Tecnologia Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.
- WANG, Y.; LEE, J.; PARK, M.; JIN, B.; YUN T.; SONG, Y.; KIM, I. **A Study on 3d Numerical Model for Plate Heat Exchanger**. Procedia Engineering 174, Elsevier – 2017. P. 188 – 194.
- WESTPHALEN, Denis Libert. **Modelagem, simulação e otimização de sistemas de evaporação**. Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, 1999.

APÊNDICE A

MODELING AND GREAT ISOLATION OF A BITUBULAR HEAT EXCHANGER

Abstract. Heat transfer is a phenomenon that happens unceasingly in environments with different temperatures. An example is on heat exchangers, a device used in industries intending to heat or to cool some operating fluid. In this paper was made a phenomenological modeling of a double tube heat exchanger, finding circumstantial parameters from the process. Also, was propoused the application of a treated sisal fiber insulating with a great thickness of 0,0001 m in its outside.

Keywords: Modeling, Great isolation, Bitubular heat exchanger