

Análise Técnica da Eficiência de um Trocador de Calor do Tipo Casco-Tubos

Filipe José Ferreira Chaves* (Graduando em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Carla Gabriela Azevedo Misael; (Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Caroline Vasconcelos Fernandes; (Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Josiele Souza Batista Santos; (Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Juan Nicolas Andrade Cavalcante; (Graduando em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

Suênia Fernandes de Vasconcelos; (Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

*Email: felipejosefch@gmail.com

resumo:

A troca de calor entre fluidos de diferentes temperaturas é de suma importância para os processos industriais e possui diversas aplicações na engenharia. Trocadores de calor, principalmente, do tipo casco e tubos, são equipamentos utilizados para a manipulação e reaproveitamento de cargas térmicas entre correntes de processo. O uso eficiente de energia é um fator crítico para as indústrias, podendo configurar um processo economicamente atrativo e competitivo. O presente trabalho estuda uma unidade experimental de um trocador de calor casco-tubos, avaliando as configurações operacionais para se obter máxima eficiência na troca energética. Foram analisados o efeito da variação de vazão e temperatura no trocador de calor para as duas situações de escoamento do fluido, paralelo e contracorrente. Posteriormente, afim de determinar a condição de transferência térmica no trocador de calor, foram registrados as temperaturas de entrada e saída para estas configurações. A partir da análise realizada foi possível verificar que os comportamentos de temperatura como função da posição no trocador se assemelharam aos encontradas na literatura para os diferentes casos estudados. Em geral, as trocas térmicas de ambas as configurações foram semelhantes, imagina-se que isto ocorreu, por consequência do tamanho do trocador de calor.

palavras-chave:

Trocador de calor; Eficiência energética; Escoamento em paralelo; Escoamento em Contracorrente

1. Introdução

A busca pela otimização de processos industriais vem aumentando, e com ela também a necessidade de se aprimorar tecnicamente e desenvolver produtos mais eficientes em relação ao seu custo de produção. Para a área térmica, os trocadores de calor representam uma grande parcela da energia gasta no processo. Dessa forma, esforços têm sido despendidos em termos de pesquisa para aprimorar estes sistemas (PERUSSI, 2010).

O processo de troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas é um fenômeno muito comum em aplicações de engenharia (PEREIRA *et al.*, 2015). Os trocadores de calor utilizados para implementar essa troca de calor, podem ser usados para aquecimento ou resfriamento de fluidos, na produção de energia, na recuperação de calor em processos e no processamento químico (INCROPERA E WITT, 1998).

Os trocadores de calor são geralmente classificados em função da configuração do escoamento dos líquidos e do tipo de construção. O trocador de calor mais simples é aquele em que o escoamento dos fluidos quente e frio ocorre no mesmo sentido ou em sentidos opostos (SILVA, 2010). No arranjo dito de escoamento paralelo, os fluidos quente e frio entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e deixam o trocador, também, pela mesma extremidade. No arranjo em contracorrente os fluidos entram no sistema por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e saem do sistema por extremidades opostas.

Um tipo de trocador de calor comumente utilizado em instalações industriais é o Casco-Tubos. Este tem um casco com múltiplos tubos, cujo escoamento se dá em um único passe através do casco. Chicanas ou deflectores são frequentemente instalados para aumentar o coeficiente de convecção do lado do casco pela indução de turbulência e por uma componente de velocidade de corrente cruzada (SILVA, 2010).

No estudo de trocadores de calor, é conveniente trabalhar com o coeficiente global de transferência de calor U , que representa a contribuição da resistência do material e dos fluidos a transferência de calor (RISTOF e MATTJIE, 2013). O fenômeno de incrustação na superfície dos trocadores de calor é um fator que, também, afeta o coeficiente U , sendo considerado como um dos problemas mais críticos na indústria (SIQUEIRA E GUTIERREZ, 2015). A taxa de transferência de calor entre os dois fluidos em um local de um trocador de calor, também, depende da magnitude da diferença de temperatura no local, que varia ao longo do trocador de calor (RISTOF E MATTJIE, 2013).

Na análise do desempenho e projeto dos trocadores, diversos métodos têm sido estudados ao longo dos anos. Dentre os mais amplamente utilizados estão os da média logarítmica da diferença de temperatura (MLDT) e Efetividade – Número de unidades de transferência (NUT). O método MLDT é amplamente usado na análise de trocadores de calor, particularmente no dimensionamento. Já o método da efetividade – NUT é comumente utilizado para avaliar a razão entre a taxa de transferência de calor real e a taxa de transferência máxima do trocador de calor. Ambos os métodos são utilizados para situações onde as temperaturas são conhecidas (PERUSSI, 2010).

Nesse contexto, estudou-se uma unidade experimental de um trocador de calor, casco-tubos avaliando seu desempenho em diferentes configurações operacionais, sendo o objetivo do trabalho encontrar a melhor configuração para a operação do trocador de calor obter a máxima eficiência na troca energética. Para isso, uma análise técnica do trocador de calor foi realizada para a avaliação das possíveis variações de temperatura de cada fluido ao longo do trocador, em função da direção do escoamento dos fluidos, paralelo e contra corrente.

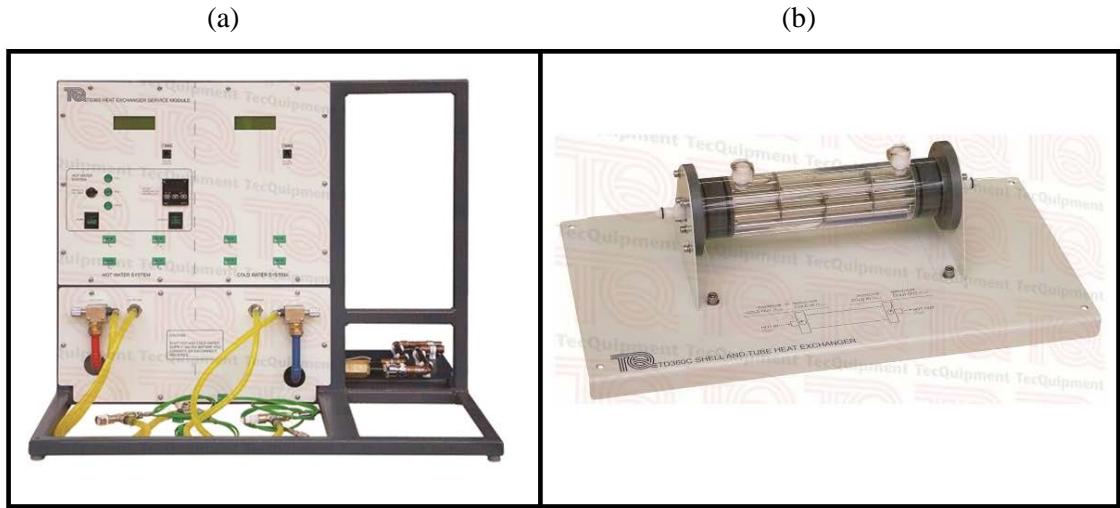
1.1 Descrição da Planta Piloto

Uma planta piloto é um pequeno sistema de processamento em escala reduzida. Estas são operadas para gerar informações sobre o comportamento do sistema, estabelecendo os parâmetros de operação ótimos de tal processo para o posterior projeto e construção da planta em escala industrial (CAMPOS, 2007).

O sistema experimental estudado é caracterizado por um módulo de serviço, Figura 1(a), e um trocador de calor, Figura 1(b). A parte principal é o módulo de serviço que pode ser resumido em dois circuitos de água (quente e frio) e instrumentos para controlar, medir e exibir o fluxo de água e de

temperatura. O trocador de Calor se encaixa na parte frontal do módulo de serviço e liga-se aos seus circuitos de água e de medição de temperatura.

Figura 1 – Planta Piloto (a) modulo de serviço do trocador de calor (TD360); (b) trocador de calor casco e tubo.

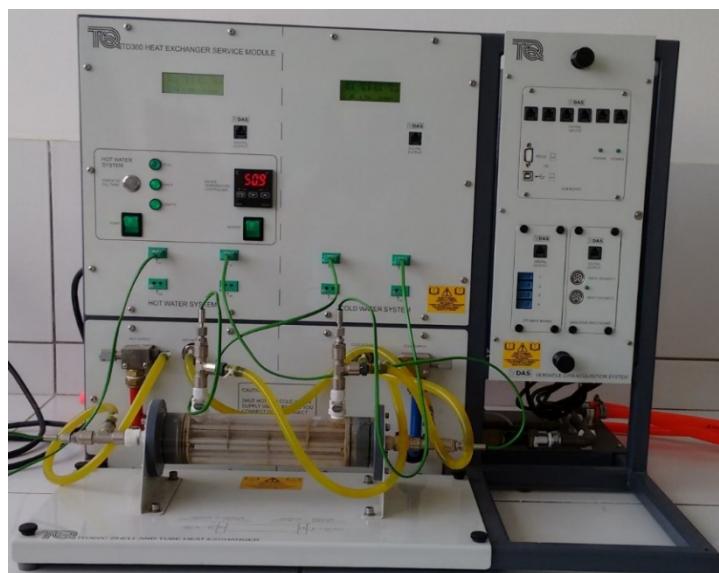


Fonte: (TEQQUIPMENT, 2009).

2. Metodologia

O trabalho foi realizado no trocador de calor de casco-tubos, Figura 2, no qual o fluido quente escoou pelo tubo interno e o fluido frio pelo casco (tubo externo). As direções relativas do escoamento foram especificadas como correntes paralelas e contracorrente.

Figura 2 – Sistema montado com o módulo e o trocador utilizados no trabalho conectados.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Inseriram-se os dados de operação do processo, os quais se basearam na capacidade de operação da planta piloto. O Quadro 1 mostra detalhes do projeto do trocador de calor casco e tubos, utilizados no cálculo da transferência de calor.

Quadro 1 – Medidas do trocador de calor.

Largura X Profundidade X Altura	500 mm X 260 mm X 150 mm
Casco: Diâmetro externo X Diâmetro interno	60 mm X 50 mm
Tubo: Diâmetro externo X Diâmetro interno	6 mm X 4 mm
Chicanas	3
Área média de transferência de calor	0,02 m ²

Fonte: TECQUIPMENT, 2009

Posteriormente, ajustou-se a temperatura do tanque de aquecimento para 50 °C e garantiu-se que o trocador de calor operasse em fluxo paralelo. Em seguida, as válvulas de controle dos fluxos quente e frio foram ajustadas para que o fluxo frio permanecesse aproximadamente constante com valores de 1,50 L/min e o fluxo quente varia-se de 1,5 L/min a 4,0 L/min com um passe de 0,5, totalizando 6 medidas. O mesmo procedimento foi realizado para a configuração de contracorrente.

Dessa forma, fixados os valores de vazão, anotaram-se as temperaturas de entrada e saída para ambas as configurações (paralelo e contracorrente). A Tabela 2 e 3 apresentam os dados coletados da corrente paralela e contracorrente, respectivamente.

Tabela 2 – Dados dos fluidos quente e frio em paralelo.

Fluxo Quente [L/min]	Tquente (entrada) [°C]	Tquente (saída) [°C]	Fluxo Frio [L/min]	Tfrio (entrada) [°C]	Tfrio (saída) [°C]
1,5	50,5	47,3	1,50	24,5	28,4
2,0	50,2	47,6	1,50	24,6	29,0
2,5	50,1	47,9	1,49	24,6	29,5
3,0	50,2	48,3	1,49	24,6	29,8
3,5	50,4	48,7	1,50	24,6	30,3
4,0	49,5	48,0	1,50	24,6	30,3

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 – Dados dos fluidos quente e frio em contracorrente.

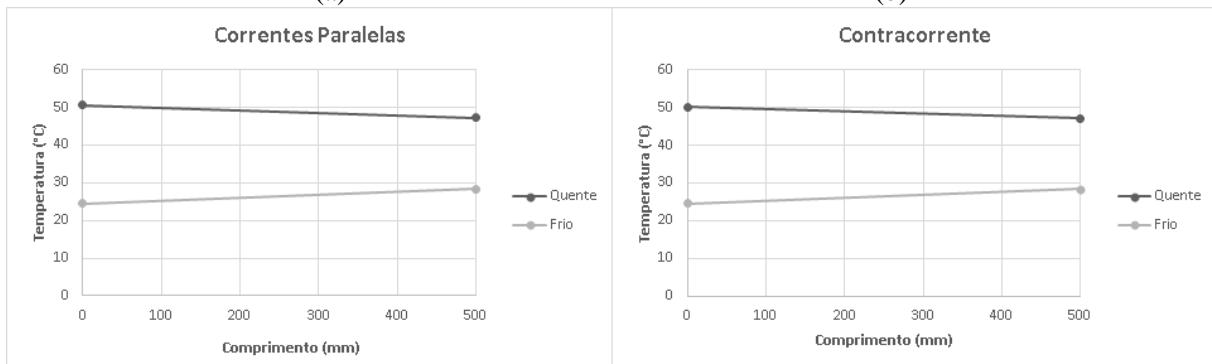
Fluxo Quente [L/min]	Tquente (entrada) [°C]	Tquente (saída) [°C]	Fluxo Frio [L/min]	Tfrio (entrada) [°C]	Tfrio (saída) [°C]
1,5	50,1	47,1	1,48	24,6	28,4
2,0	50,3	47,6	1,49	24,5	28,9
2,5	49,7	47,5	1,49	24,5	29,3
3,0	49,4	47,5	1,49	24,6	29,6
3,5	49,4	47,9	1,49	24,6	29,9
4,0	50,1	48,0	1,49	24,6	30,0

Fonte: Elaborado pelos autores.

3. Resultados e discussão

A fim de se comparar como as diferentes configurações de escoamento afetam a distribuição de temperatura em cada um dos fluidos ao longo do comprimento do trocador foram plotados dois gráficos. Estes expõem está distribuição de temperatura para um fluxo de 1,5 tanto para o fluxo quente como para o fluxo frio, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Distribuição de temperatura para um trocador de calor casco-tubos. (a) Em escoamento de correntes paralelas (b) Em escoamento contracorrente



Fonte: Elaborado pelos autores.

O fluxo de calor transferido entre os fluidos em um trocador é diretamente proporcional à diferença de temperatura média entre os fluidos. No trocador de calor em contracorrente à diferença de temperatura entre os fluidos não varia tanto, o que acarreta em uma diferença média maior. Como consequência, mantidas as mesmas condições, espera-se que o trocador de calor trabalhando em correntes opostas seja mais eficiente. Como a variação de temperatura ao longo do trocador não é linear, para retratar a diferença média de temperatura entre os fluidos é usada então a Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (MLDT).

A partir dos dados de temperaturas das Tabelas 2 e 3, calculou-se a média logarítmica das diferenças de temperatura. Os valores estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores das médias logarítmicas das diferenças de temperatura para cada passo de fluxo quente.

Fluxo Quente [L/min]	MLDT (Paralelo)	MLDT (Contracorrente)
1,5	22,26	22,10
2,0	21,91	22,24
2,5	21,76	21,67
3,0	21,86	20,83
3,5	15,51	21,34
4,0	21,10	21,71

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, para o escoamento em paralelo calculou-se o fluxo de calor, o coeficiente global de transferência de calor e a eficiência. Esse procedimento foi realizado para a corrente quente e fria, Tabela 3.

Tabela 3 – Valores do fluxo de calor, coeficiente global de transferência de calor e eficiência para o fluido quente e frio escoamento em paralelo.

Passo de Fluxo Quente	Fluido Quente			Fluido Frio		
	Fq(L/min)	Qq(W)	U (W/m ² .°C)	ξq	Qf (W)	U (W/m ² .°C)
1,5	142,94	318,39	0,1231	173,96	387,46	0,1500
2,0	154,86	350,55	0,1016	196,55	444,93	0,1719
2,5	163,79	373,57	0,0863	217,43	495,90	0,1922

Tabela 3 – Valores do fluxo de calor, coeficiente global de transferência de calor e eficiência para o fluido quente e frio escoamento em paralelo.

(Continuação)

3,0	169,75	385,64	0,0742	230,74	524,19	0,2031
3,5	1219,50	3603,06	0,4535	254,62	752,29	0,2209
4,0	178,68	420,81	0,0602	254,62	599,65	0,2289

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com os dados obtidos das eficiências para o fluido quente e frio da Tabela 3, calculou-se a eficiência do processo para cada ponto, como resultado da média aritmética das eficiências. O resultado é observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da eficiência do processo em cada ponto (escoamento em paralelo).

Fluxo Quente [L/min]	ξ	ξ (%)
1,5	0,1365	13,65
2,0	0,1367	13,67
2,5	0,1392	13,92
3,0	0,1387	13,87
3,5	0,1434	14,34
4,0	0,1446	14,46

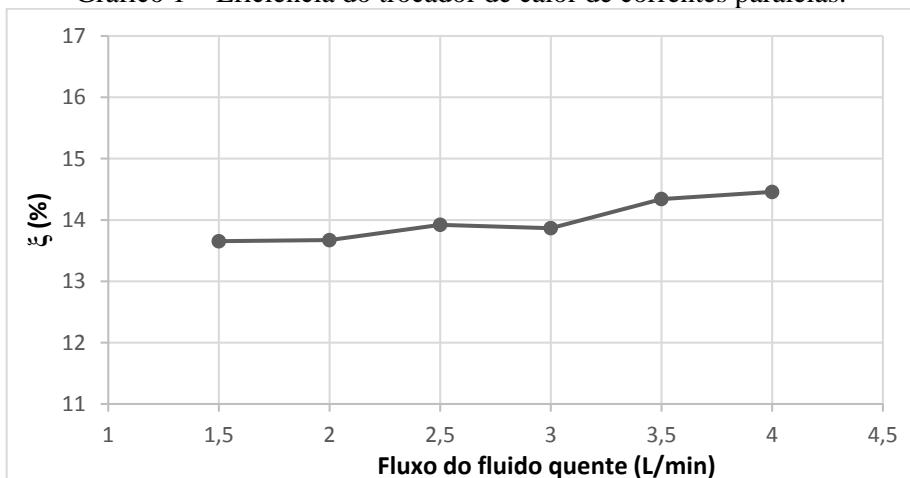
Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos valores obtidos, percebeu-se que no fluido quente com fluxo de 4,0 L/min, obteve o maior valor na eficiência. Segundo Santos e Stapasolla (2010) o fluxo que passa em um trocador de calor é extremamente importante, pois ele é diretamente responsável pela quantidade de troca de calor obtida com o equipamento.

Dessa forma, como a troca térmica é um binômio da diferença de temperatura e do fluxo de fluido à medida que se eleva o valor do fluxo quente tem-se um aumento da diferença de temperatura média entre os fluidos garantido uma maior troca térmica, embora que para maiores valores de fluxo a troca térmica entre os fluidos diminua.

Para este caso, é possível verificar que, à medida que elevou-se o fluxo houve um aumento da eficiência do processo, visto que a contribuição da diferença de temperatura supera a contribuição negativa do aumento do fluxo. Este processo pode ser verificado nitidamente no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Eficiência do trocador de calor de correntes paralelas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

De forma semelhante, calculou-se o fluxo de calor, o coeficiente global de transferência de calor e a eficiência para o escoamento em contracorrente. Esse procedimento foi realizado para a corrente quente e fria, Tabela 5.

Tabela 5 – Valores do fluxo de calor, coeficiente global de transferência de calor e eficiência para o fluído quente e frio escoamento contracorrente.

Passo de Fluxo Quente	Fluido Quente			Fluido Frio		
F_q (L/min)	Q_q (W)	U (W/m ² ·°C)	ξ_q	Q_f (W)	U (W/m ² ·°C)	ξ_f
1,5	134,01	303,23	0,1176	167,24	378,41	0,1490
2,0	160,81	361,55	0,1046	195,24	438,95	0,1705
2,5	163,79	377,85	0,0873	212,99	491,34	0,1905
3,0	259,09	621,84	0,1169	221,86	532,50	0,2016
3,5	156,35	366,26	0,0605	235,17	550,92	0,2137
4,0	250,15	576,17	0,0824	254,62	599,65	0,2289

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com os dados obtidos das eficiências para o fluido quente e frio da Tabela 5, calculou-se a eficiência do processo para cada ponto, como resultado da média aritmética das eficiências. O resultado é observado na Tabela 6.

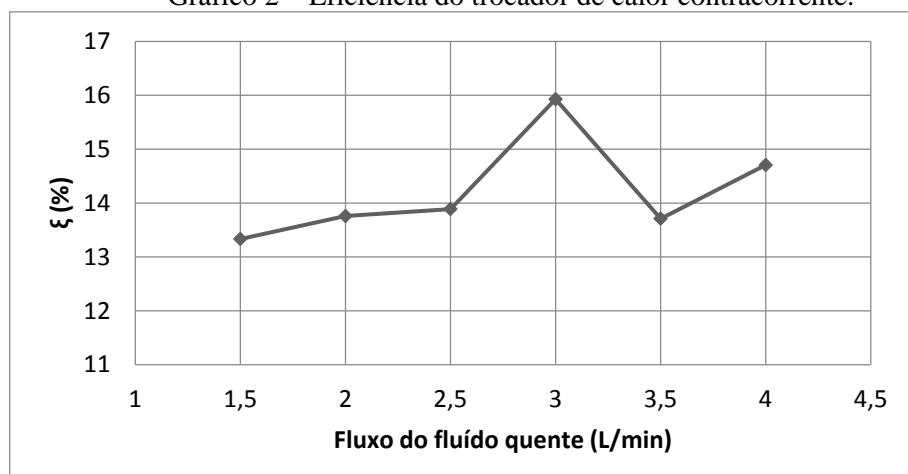
Tabela 6 – Valores da eficiência do processo em cada ponto (escoamento em contracorrente).

Fluxo Quente [L/min]	ξ	ξ (%)
1,5	0,1333	13,33
2,0	0,1376	13,76
2,5	0,1389	13,89
3,0	0,1593	15,93
3,5	0,1371	13,71
4,0	0,1471	14,71

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos valores obtidos, o Gráfico 2 foi plotado.

Gráfico 2 – Eficiência do trocador de calor contracorrente.



Fonte: Elaborado pelos autores

Percebe-se no Gráfico 2 que no fluído quente com fluxo de 3 L/min, obtém-se o maior valor numérico de eficiência, porém esse resultado contrapõe o comportamento apresentado pelos outros pontos, sendo considerado um provável erro experimental visto que, seu valor de eficiência deveria estar entre 13,89 e 14,71. Excluindo-se esse ponto, verifica-se que no fluído quente com fluxo de 4,0 L/min, obteve o maior valor na eficiência, assim como o apresentado para o caso de fluxo paralelo.

Os resultados mostram que o processo de troca térmica obteve resultados semelhantes para ambas as configurações, embora segundo Perussi (2011) o trocador de calor de calor em contra corrente apresenta melhor desempenho quando comparado por um do mesmo tipo em fluxo paralelo.

4. Conclusão

A partir da análise realizada foi possível obter as distribuições de temperatura para as diferentes configurações de escoamento dos fluidos (correntes paralelas e contracorrente). Os comportamentos de temperatura como função da posição no trocador se assemelharam aos encontrados na literatura para ambos os casos. Além disso, foi possível obter a eficiência das duas configurações, podendo dessa forma, compara-las. Embora a diferença seja pequena, pode-se observar um ponto de melhor eficiência no trocador de calor com escoamento contracorrentes. Porém, esse ponto é provavelmente um erro experimental visto que não segue o comportamento apresentado pelos outros pontos.

Em geral, as trocas térmicas de ambas as configurações foram semelhantes, imagina-se que isto ocorreu, por consequência do tamanho do trocador de calor. Espere-se um aumento dessa diferença para trocadores de calor em escala industrial, visto que a configuração do escoamento é um fator determinante na eficiência na transferência da taxa de calor entre os fluidos.

5. Agradecimento

Os autores desse trabalho agradecem a Universidade Federal de Campina Grande e a Unidade Acadêmica de Engenharia Química.

Technical Analysis on the Efficiency of a Shell-Tube Heat Exchanger

Abstract: The heat exchange between fluids of different temperatures is of great importance for industrial processes and it has many applications in engineering. Heat exchangers, especially the shell and tube ones, are devices used for handling and reusing thermal loads between process streams. Efficient use of energy is critical for the industries; it may set it up as an economically attractive and competitive process. This paper studies an experimental unit of a heat exchanger shell-tube heat, evaluating the operational settings to achieve maximum efficiency in energy trading. Thus, the effect of the flow rate and temperature in the heat exchanger has been analyzed for both situations of fluid leakage, parallel and counter flow. Subsequently, in order to determine the heat transfer condition in the heat exchanger, the in and out temperatures for these settings have been registered. From the analysis results, it is possible to see that the temperature behavior as a function of position on the exchanger is similar to the one found in the literature for the different cases that were studied. In general, the thermal exchanges in both settings were quite the same, it is wondered that it must have been occurred because of the heat exchanger size.

Keywords: Heat Exchange; Energy Efficiency; Parallel Flow; Counter Flow

Referências bibliográficas

CAMPOS, R. C. C., **Projeto e construção de planta piloto de neutralização de pH e proposta de metodologia para incorporação de informações auxiliares na identificação narx racional.** Dissertação de Mestrado em Engenharia - Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (UNILESTE), Coronel Fabriciano-MG 2007.

INCROPERA, F. P. & WITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, terceira edição, 1998.

PEREIRA, A. S.; MAGALHÃES, M. L.; CARTAXO, S. J. M.; "ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODO DIFERENCIAL TERMOFLUIDODINÂMICO PARA TROCADORES DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBOS 1-2 COM CHICANAS FRACIONADAS E HELICOIDAIS", p. 2617-2623 . In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica [=Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.3]. ISSN Impresso: 2446-8711. São Paulo: Blucher, 2015.
ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeqic2015-375-33986-261126

PERUSSI, R., **Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), São Carlos-SP,2010.

RISTOF, R., MATTJIE, C. A., **Dimensionamento de um trocador de calor para resfriamento de fluido em um circuito hidráulico utilizado em uma plantadeira.** Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica - Faculdade Horizontina (FAHOR), Horizontina-RS,2013.

SANTOS, F. C., STAPASOLLA T. Z., **Construção trocador de calor tipo casco tubo para resfriamento de mosto de cerveja.** Trabalho final da disciplina de medições térmicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre –RS,2011.

SILVA, M.P.,**Controle Preditivo em Rede Aplicado a um Trocador de Casco-Tubos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande -PB, 2010.

SIQUEIRA, L. V.; GUTIERREZ, C. G. C. C.; "ESTUDO EXPERIMENTAL DE INCRUSTAÇÃO EM TROCADORES DE CALOR NO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO DO LEITE", p. 1980-1985 . In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica [=Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.3]. ISSN Impresso: 2446-8711. São Paulo: Blucher, 2015.
ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeqic2015-381-33993-261174

Technical teaching equipment for engineering (TECQUIPMENT). Página: <http://www.tecquipment.com/> - Acessado em 19 de julho de 2015.