



CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA FACILITAR O APRENDIZADO NO ESTUDO DE TROCADORES DE CALOR BITUBULARES

Adriano Erique de Oliveira Lima – adrianoerique@ifce.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – *campus* Iguatu
Rodovia Iguatu – Várzea Alegre, km 05, Vila Cajazeiras
65000-000 – Iguatu - CE

Frederico Ribeiro do Carmo – frederico-rc@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará – *campus* do Picí
Av. Mister Hull, s/n, DEQ, Bloco 709
CEP – Fortaleza - CE

Rodrigo Silveira Vieira – rodrigo@gpsa.ufc.br

Universidade Federal do Ceará – *campus* do Picí
Av. Mister Hull, s/n, DEQ, Bloco 709
CEP – Fortaleza - CE

Resumo: *É de grande importância em uma planta industrial o projeto e a análise do desempenho de seus equipamentos minimizando custos, impactos ambientais e principalmente reduzindo a probabilidade de eventuais acidentes. Um equipamento que está diretamente ligado a esses três aspectos citados acima é o trocador de calor. Saber dimensionar e analisar desempenho de equipamentos de troca térmica é, indiscutivelmente, competência do profissional de engenharia, que utiliza sempre como partida para seus cálculos, ferramentas computacionais. Neste caso, fica evidenciada a necessidade de uma ferramenta que auxilie aos responsáveis pelo projeto e análise do equipamento. Este trabalho teve como objetivo elaborar um software para análise de desempenho de trocadores de calor bitubulares. O algoritmo foi desenvolvido na plataforma Delphi e utiliza o método Kern como procedimento para os cálculos. Foi também inserido um banco de dados dos fluidos mais utilizados (especialmente hidrocarbonetos) de modo a facilitar a utilização pelo usuário. Pode-se ressaltar a importância da utilização de ferramentas computacionais para projetos e análises de desempenho de equipamentos industriais, em destaque a equipamentos de troca térmica. Deste modo, esse trabalho auxiliará nas diferentes disciplinas oferecidas pelo Departamento de Engenharia Química, especialmente na Universidade Federal do Ceará - UFC, tais como: Operações Unitárias II, Laboratório de Engenharia Química II e Projeto de Final de Curso, contribuindo assim na formação profissional dos alunos.*

Palavras-chave: *Desempenho, Trocadores Bitubulares, Método Kern.*



1 INTRODUÇÃO

O profissional de Engenharia Química que trabalha, principalmente, com projeto de equipamentos vem sendo cobrado constantemente pela competência e segurança nos parâmetros calculados, pela rapidez na emissão dos resultados e indiscutivelmente pela desenvoltura ao analisar determinado problema e solucioná-lo, minimizando custos e possíveis riscos ambientais.

Nesse contexto, cabe ao profissional responsável escolher ferramentas que garantam todos esses benefícios e assegure a condição de um bom projeto. Em projetos industriais, sem dúvidas, a ferramenta mais utilizada pelos profissionais são programas computacionais que muitas vezes resolvem o problema de maneira rápida.

Como exemplo prático na indústria química, pode-se citar como recurso indispensável de projeto e análise de desempenho, a utilização de algoritmos computacionais para resolução e dimensionamento de equipamentos de troca térmica. Tais equipamentos, além de serem extremamente importantes para o processo industrial, necessitam que seu funcionamento esteja sendo efetuado corretamente, em outras palavras, o equipamento e o processo em si terá um bom rendimento se o mesmo for bem projetado.

Genericamente podem-se definir trocadores de calor como equipamentos no qual ocorre a transferência de calor entre duas ou mais substâncias, sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas. Entretanto, o mais comum ao utilizar esse termo é restringi-lo àqueles que promovem a troca térmica entre dois fluidos em escoamento, como é o caso dos trocadores bitubulares e casco e tubos, amplamente utilizados na indústria química e petroquímica (ASSENHAIMER, 2005). Em geral, trocadores de calor industriais são classificados de acordo com a construção, mecanismo de transferência de calor, grau de compactação superficial, regime de fluxo e arranjo dos fluidos (KUPPAN, 2000).

O trocador de calor normalmente é aplicado a dois ou mais fluidos a diferentes temperaturas, separados fisicamente ou não por uma parede, que trocam calor entre si. Este equipamento é largamente utilizado em indústrias, automóveis, residências, etc. tendo seu uso direcionado a vários propósitos como a manutenção ou adequação da temperatura de determinado fluido necessário a um ciclo térmico ou processo, geração de vapor, condicionamento de ar, recuperação de calor em processos, entre outras mais (KRAHE, 2004).

Em 1998, LEONG et al. relatou que para aplicações reais de engenharia, a maioria dos trocadores de calor são projetados utilizando *Softwares* comerciais desenvolvidos por organizações tais como: *Heat Transfer and Fluid Flow Service* (HTFS) e *Heat Transfer Research Inc.* (HTRI).

Deste modo, este trabalho objetivou desenvolver um *software* para avaliar o desempenho de trocadores de calor bitubulares, considerando a média logarítmica das diferenças das temperaturas, correção das viscosidades das correntes de entrada, cálculo dos coeficientes de película pelas equações de Sieder e Tate (1936) e avaliação do projeto hidráulico, onde a queda de pressão em cada corrente será comparada com a informada pelo usuário. O *software* foi nomeado de TCSIM (Simulador de Trocadores de Calor). Todos os resultados obtidos são salvos em arquivos gerados por relatórios.



Cada relatório salvo pelo usuário, contém todas as informações referentes ao projeto térmico e hidráulico, tais como: viscosidade, densidade, calor específico, temperaturas de entrada e saída, temperatura calórica, área de escoamento tubular e anular, quedas de pressão, entre outras.

2 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

2.1 Estimativas de propriedades físicas

A primeira etapa para o desenvolvimento do *software* TCSIM versão 1.0 é discriminar, sucintamente, o procedimento de cálculo para estimar as propriedades físicas dos fluidos das correntes fria e quente no trocador. Propriedades como: densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica são introduzidos no projeto do trocador de calor através de correlações testadas e validadas disponível na literatura científica. Para a versão 1.0 do TCSIM, será disponibilizado um banco de dados de fluidos compondo os principais hidrocarbonetos e frações de petróleo. São utilizadas no *software* as correlações direcionadas para cada grupo de fluido, de modo, a obter um resultado confiável para minimizar os erros ao fim da simulação. Os valores dos parâmetros A, B, C, D e E estão inseridos no banco de dados do *software* e recebem valores específicos para cada fluido.

2.1.1 Calor específico

- Calor Específico de Hidrocarbonetos Líquidos (PERRY, 1999):

$$C_p = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 + E.T^4 \quad (1)$$

- Calor Específico de Frações de Petróleo (KERN, 1980):

$$C_p = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 \quad (2)$$

2.1.2 Condutividade térmica

- Condutividade Térmica de Hidrocarbonetos Líquidos (PRAUNITZ, 1987):

$$k = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 \quad (3)$$

- Condutividade Térmica de Frações de Petróleo (KERN, 1980):

$$k = A + B.T \quad (4)$$

2.1.3 Viscosidade

- Viscosidade de Hidrocarbonetos Líquidos (PRAUNITZ, 1987):



$$\ln(\mu) = A + \frac{B}{T} + C.T + D.T^2 \quad (5)$$

- Viscosidade de Frações de Petróleo (KERN, 1980)

$$k = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 \quad (6)$$

2.2 Cálculo do coeficiente de película (projeto térmico)

Nesse trabalho, será utilizado para o cálculo do coeficiente de película as equações propostas de dados ajustados para hidrocarbonetos e frações de petróleo em tubos verticais e horizontais (SIEDER & TATE, 1936). Com isso, tem-se:

- Regime Laminar (Reynolds < 2100)

$$(Nusselt) = 1,86 \cdot \left[(\text{Reynolds}) \cdot (\text{Prandtl}) \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \right]^{(1/3)} \quad (7)$$

- Regime Turbulento (Reynolds > 2100)

$$(Nusselt) = 0,027 \cdot \left[(\text{Reynolds})^{0,8} \cdot (\text{Prandtl})^{(1/3)} \right] \quad (8)$$

2.3 Queda de pressão (Projeto hidráulico)

Após a conclusão do projeto térmico de um trocador de calor, é necessário também a verificação se o equipamento atende as condições de reais de projeto hidráulico. Em um processo que a pressão total fornecida pela bomba seja inferior ao projetado para o equipamento, possivelmente, haverá uma ineficiência no resultado final da troca térmica, ou seja, o fluido quente não cederá calor suficiente para resfriar o fluido frio nas condições prevista inicialmente. Para evitar tal problema, o cálculo de perda de pressão nas duas correntes (frio e quente) é incluído no cálculo de projeto de um trocador de calor bitubular. Para essa análise, têm-se as seguintes equações para queda de pressão:

- Tubo Interno

$$\Delta P_p = \frac{\left[\left(\frac{4 \cdot f \cdot G_p^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot D} \right) \cdot \rho \right]}{144} \quad (9)$$

- Tubo Externo

$$\Delta P_a = \frac{\left[\left(\frac{4 \cdot f \cdot G_a^2 \cdot L}{2 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot D_e} \right) + \left(\frac{3 \cdot V^2}{2 \cdot g'} \right) \right]}{144} \quad (10)$$



3 INTERFACE DO TCSIM VERSÃO 1.0

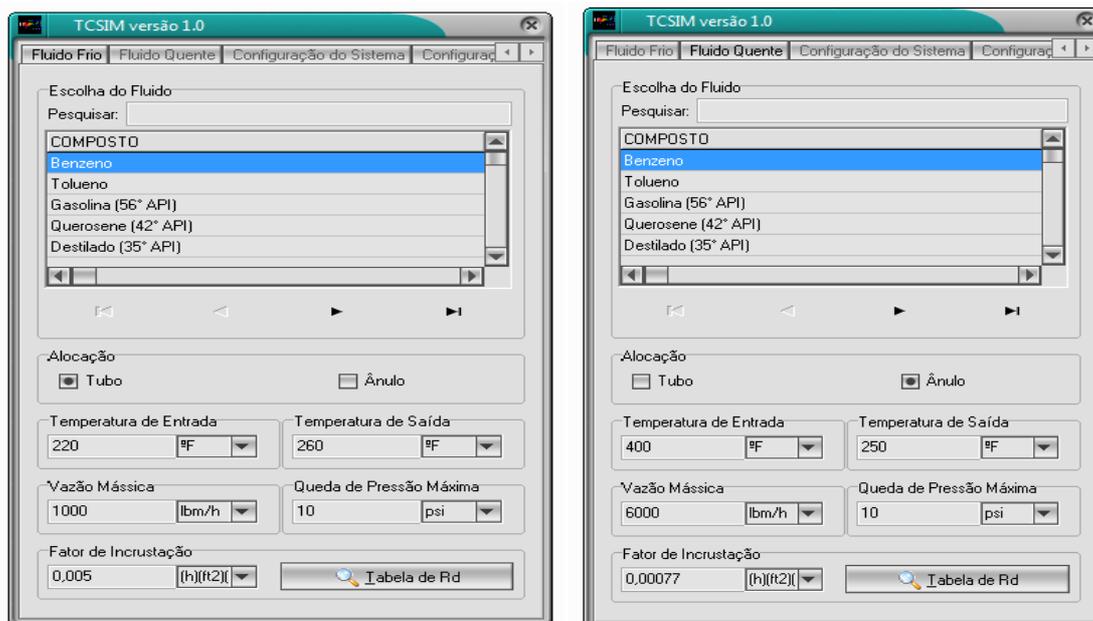


Figura 1 – Inserindo dados iniciais para a simulação.

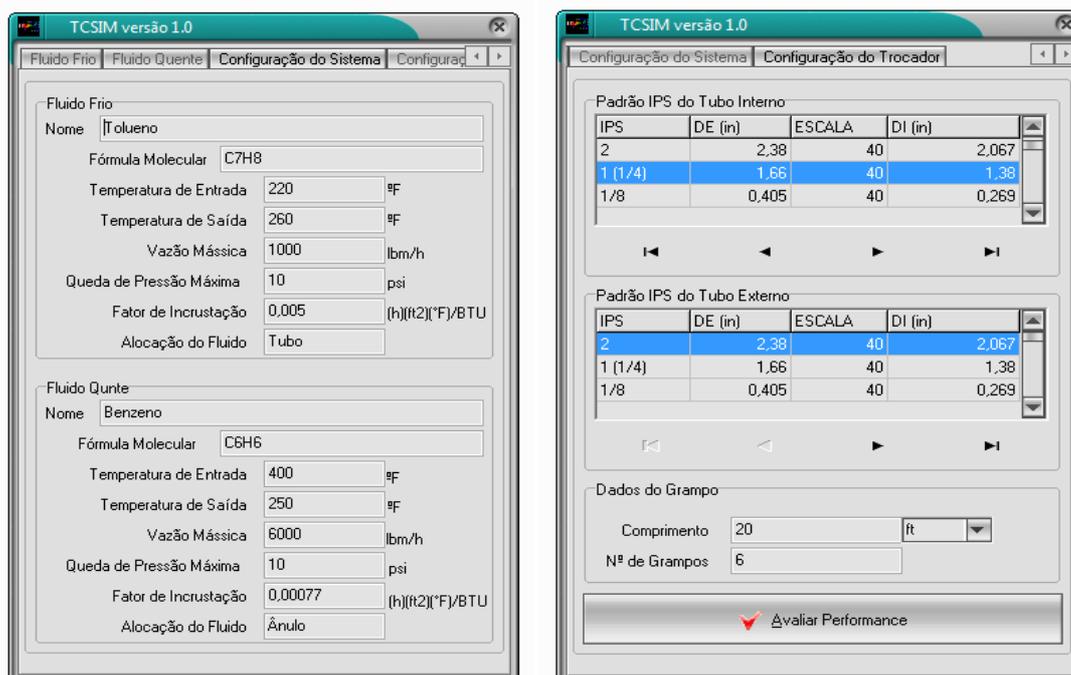


Figura 2 – Especificações do trocador de calor.

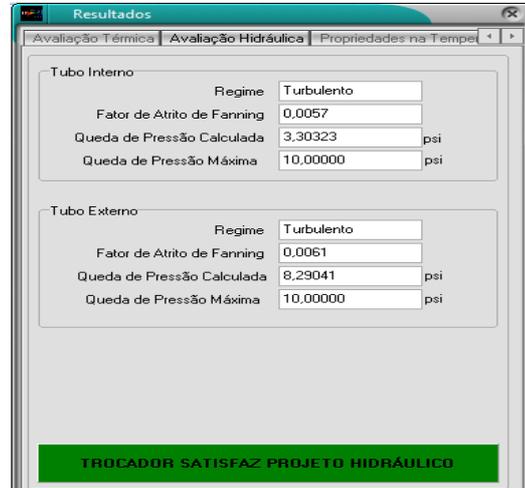
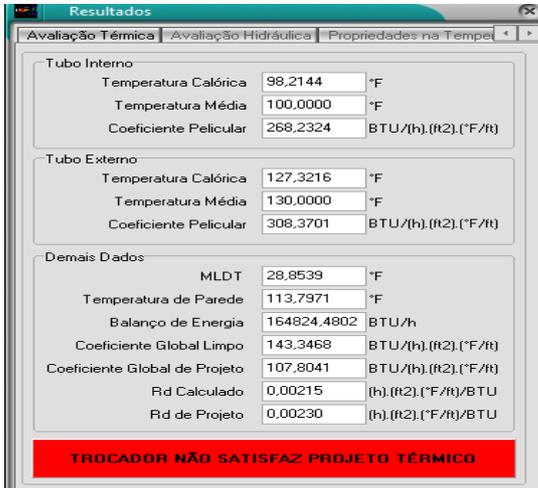


Figura 3 – Resultados da análise de desempenho.

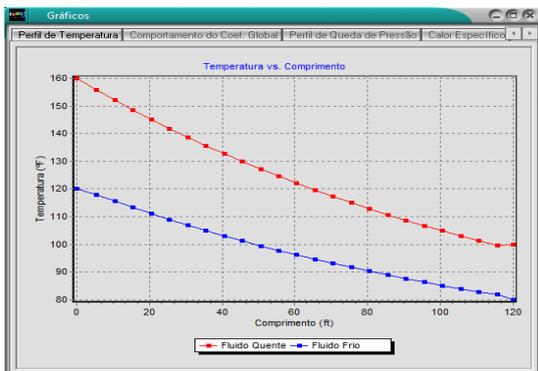


Figura 4 – Variação da temperatura x comprimento .

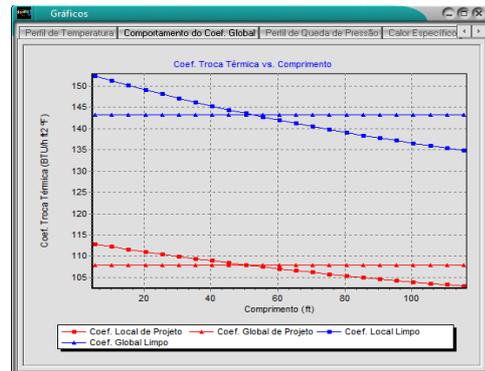


Figura 5 – Variação do coeficiente global x comprimento .

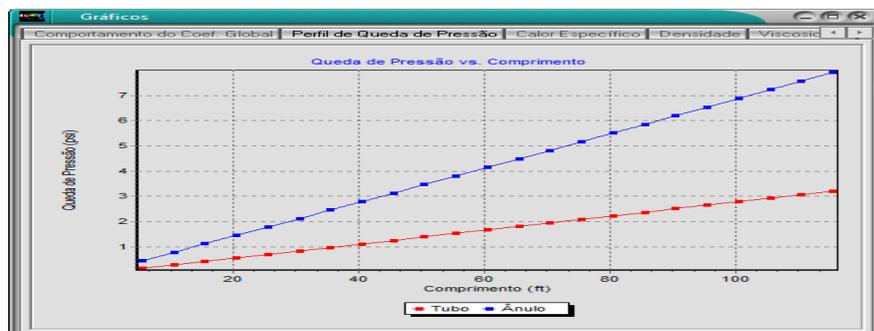


Figura 6 – Variação da temperatura x comprimento .



4 ESTUDO DE CASO: RESFRIAMENTO DE TOLUENO UTILIZANDO BENZENO

A tabela 1 mostra os principais parâmetros de projeto do trocador que irá simular o resfriamento da corrente de tolueno líquido utilizando uma corrente de benzeno também líquido.

Tabela 1 – Dados gerais do trocador para a simulação (KERN, 1980)

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno do tubo interno (D)	0,115 (ft)
Diâmetro externo do tubo interno (D1)	0,138 (ft)
Diâmetro interno do tubo externo (D2)	0,1725 (ft)
Área de escoamento interna (Ai)	0,0104 (ft ²)
Área de escoamento externa (Ae)	0,0762 (ft ²)
Área de troca térmica (At)	50,5 (ft ²)
Comprimento do Tubo (L)	20 (ft)
Número de Tubos (n)	3
Coefficiente global de troca térmica sujo de projeto (Ud)	111 (BTU/(h)(ft ²)(°F))
Fator de incrustação de projeto (Rd)	0,0023 ((h)(ft ²)(°F)/(BTU))

Tabela 2 – Condições iniciais para projeto do trocador (KERN, 1980)

Fluido	Te (°F)	Ts (°F)	Vazão mássica (lb/h)	Rd ((h)(ft ²)(°F)/(BTU))	Deltap (psi)
Benzeno	80	120	9820	0,001	10
Tolueno	160	100	6330	0,001	10

Tabela 3 – Resultados das propriedades térmica da corrente de tolueno

Simulação	Te (°F)	Ts (°F)	W (lb/h)	Tmédia (°F)	Tcalórica (°F)	Tparede (°F)	Q (Btu/h)
01	160	92,79	5850	126,39	122,71	110,69	167377,5
02	160	93,38	5900	126,69	123,09	110,95	167376,4
03	160	93,96	5950	126,98	123,47	111,21	167377,1
04	160	94,53	6000	127,26	123,83	111,46	167377,9
05	160	98,05	6330	129,03	126,08	113,06	167376,9
06	160	101,58	6700	130,79	128,32	114,73	167377,9
07	160	104,16	7000	132,08	129,94	115,99	167376,6
08	160	111,32	8000	135,66	134,38	119,67	167736,7
09	160	116,85	9000	138,42	137,74	122,74	167376,2
10	160	121,25	10000	140,63	140,37	125,34	167374,8



Tabela 4 – Resultados das propriedades físicas da corrente de tolueno

Simulação	C_{pMED} (Btu/lb°F)	C_{pCAL} (Btu/lb°F)	K_{MED} (Btu/(h)(ft)(°F))	K_{CAL} (Btu/(h)(ft)(°F))	μ_{MED} (lb/ft.h)	μ_{CAL} (lb/ft.h)	ρ_{MED} (lb/ft ³)	ρ_{CAL} (lb/ft ³)
01	0,426	0,424	0,0734	0,0737	0,972	0,993	52,38	52,5
02	0,426	0,424	0,0734	0,0737	0,970	0,991	52,37	52,49
03	0,426	0,424	0,0734	0,0737	0,968	0,989	52,36	52,47
04	0,426	0,425	0,0734	0,0736	0,967	0,986	52,35	52,46
05	0,427	0,426	0,0732	0,0735	0,957	0,973	52,29	52,39
06	0,428	0,427	0,0730	0,733	0,947	0,961	52,23	52,31
07	0,428	0,427	0,0730	0,0732	0,940	0,952	52,19	52,26
08	0,430	0,429	0,0727	0,0728	0,921	0,928	52,07	52,11
09	0,431	0,431	0,0725	0,0726	0,907	0,911	51,98	52,00
10	0,432	0,432	0,0723	0,0724	0,896	0,897	51,90	51,91

Tabela 5 – Resultados da avaliação de performance do trocador

Simulação	U_c Btu/(h)(ft ²)(°F)	U_d Btu/(h)(ft ²)(°F)	R_d (h)(ft ²)(°F)/Btu	Δp_{TUBO} (psi)	Δp_{ANULO} (psi)	Avaliação Térmica	Avaliação Hidráulica
01	138,29	97,74	0,0002	3,30	7,19	NÃO ATENDE	ATENDE
02	138,81	98,00	0,0004	3,30	7,30	NÃO ATENDE	ATENDE
03	139,33	98,26	0,0005	3,30	7,42	NÃO ATENDE	ATENDE
04	139,85	98,52	0,0007	3,30	7,53	NÃO ATENDE	ATENDE
05	143,12	100,13	0,0016	3,30	8,29	NÃO ATENDE	ATENDE
06	146,56	101,80	0,0025	3,30	9,19	ATENDE	ATENDE
07	149,19	103,06	0,0031	3,30	9,96	ATENDE	ATENDE
08	157,01	106,76	0,0047	3,30	12,71	ATENDE	NÃO ATENDE
09	163,83	109,84	0,0059	3,30	15,77	ATENDE	NÃO ATENDE
10	169,72	112,46	0,0068	3,30	19,15	ATENDE	NÃO ATENDE

5 CONCLUSÕES

O *software* TCSIM versão 1.0 foi uma iniciativa ousada na criação de uma ferramenta computacional para, inicialmente, auxiliar no aprendizado dos fenômenos de troca térmica, em especial, ao estudo de trocadores de calor. Embora exista a necessidade da otimização de algumas rotinas de cálculo, o *software* consegue abordar com clareza o sentido real das simulações de trocadores de calor bitubulares e informa resultados confiáveis para hidrocarbonetos e substâncias puras com propriedades físicas bem definidas na literatura científica.



A nível didático percebe-se o quão intuitivo é o *software* para manuseá-lo. A intenção foi de além de facilitar o aprendizado da operação unitária que rege o equipamento, também elaborar o *software* em uma linguagem computacional bastante utilizada por alunos de graduação em Engenharia Química afim de que os mesmos possam, futuramente, manuseá-lo livremente e implementar, corrigir e sugerir modificações, haja vista o código será disponível para download no site oficial do DEQ-UFC.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSENHAIMER, C., *Estudo da Troca Térmica de um Trocador de Calor da Petroquímica de Triunfo*. Trabalho Final de Curso. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KERN, D.Q., *Processos de Transmissão de Calor*, 1980, Ed. Guanabara Koogan S. A., Rio de Janeiro.

KUPPAN, T., *Heat Exchanger Design Handbook*, 2000, Ed. Marcel Dekker, New York, U.S.A.

KRAHE, R., VIELMO, H. A., *Criação de Novas Ferramentas para Simulação de Sistemas Térmicos*. In: MercoFrio - Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, 2004, Curitiba, PR. Anais do MercoFrio 2004. Curitiba, PR : ASBRAV, 2004.

LEOG, K. C., TOH, K. C., LEONG, Y. C.; *Shell and Tube Heat Exchanger Design Software for Educational Applications**, *Int. J. Engng*, vol. 14, pp. 217-224, 1998.

PERRY, R. H., BENSLOW, L. R., BEIMESCH, W. E., et al., *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 1999, Ed. McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., POLING, B. E.; *The Properties of Gases & Liquids*, 1987, Ed. McGraw-Hill Book Company, New York, U.S.A.

SIEDER, E. N., TATE, F. E.; *Heat Transfer and Pressure Drop in Tubes*, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 28, pp. 1429-1436, 1936.



SOFTWARE DEVELOPMENT FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF HEAT EXCHANGER BITUBULAR BACK TO SCHOOL

Abstract: *It is of great importance in an industrial plant design and performance analysis of their equipment while minimizing costs, environmental impacts and especially reducing the likelihood of accidents. A device that is directly linked to these three aspects mentioned above is the heat exchanger. Knowing size and analyze the performance of heat exchange equipment is arguably the professional competence of Engineering, always using as basis for their calculations, some computational tool. In this case, it is clear the need for software to assist those responsible for the design and analysis of equipment. This study aimed to develop software for performance analysis of double-pipe heat exchangers. This software platform was developed in Delphi and uses the method Kern as a procedure for the calculations. It also inserted a database of commonly used fluids (especially oil) in order to facilitate the use by User. You can highlight the importance of using computational tools for design and performance analysis of industrial equipment, highlighted the equipment Heat Transfer. Thus, this work assists in the various disciplines offered by the Department of Chemical Engineering, Federal University of Ceara, such as Unit Operations II Laboratory of Chemical Engineering and Design II Final Course, thus contributing to the training of students.*

Key-words: Performance, double-pipe heat exchangers, method kern.