

## **CRIAÇÃO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA FACILITAR O ESTUDO DE TROCADORES DE CALOR BITUBULARES**

**Adriano Enrique Oliveira Lima\*** **Frederico Ribeiro do Carmo\*\***

### **RESUMO**

É de grande importância, em uma planta industrial, projeto e 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 é o trocador de calor. Este trabalho tem como objetivo elaborar um software para análise de desempenho de trocadores de calor bitubulares. O algoritmo é desenvolvido na plataforma Delphi e utiliza o método Kern como procedimento para os cálculos. Recorre-se a um banco de dados dos fluidos mais utilizados, especialmente hidrocarbonetos, de modo a facilitar a utilização pelo usuário. Pode-se ressaltar a importância de ferramentas computacionais para projetos e análises de desempenho de equipamentos industriais, em destaque, os equipamentos de troca térmica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Operações unitárias. Trocador de calor. Método Kern.

### **DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL TO EASE THE STUDY OF DOUBLE-PIPE HEAT EXCHANGERS**

### **ABSTRACT**

*In an industrial plant, the design and analysis of the performance of its equipments is of great importance while minimizing costs, environmental impacts and especially reducing the likelihood of accidents. A good example of equipment directly linked to these three aspects mentioned above is the heat exchanger. This work aimed to develop software for performance analysis of double-pipe heat exchangers. The algorithm was developed in Delphi and it uses the Kern's method as procedure for the calculations. The software has a database of commonly used fluids (especially hydrocarbons) to make it more familiar to the user. One can emphasize the importance of computational tools for designs and performance analysis of industrial equipment, highlighting the heat exchange equipments.*

**KEYWORDS:** Unit operations. Heat exchanger. Kern method.

### **1 INTRODUÇÃO**

Equipamentos de troca térmica são usados na indústria quando se deseja recuperar calor entre dois fluidos de processo. Nesses equipamentos, objetiva-se elevar ao máximo a taxa de transferência de calor dentro de uma faixa limite de queda de pressão do sistema de bombeamento do fluido, criando assim, em nível de projeto uma situação ótima. A problemática encontra-se na constatação de que os parâmetros responsáveis para a elevação da capacidade de troca térmica também contribuem para a elevação da queda de pressão, exigindo um estudo refinado antes mesmo da construção do aparato (Rosenhow e Hartnett, 1973). A escolha do projeto, geralmente, é avaliada por procedimentos iterativos, envolvendo muitas provações, até que se admita um projeto razoável que atenda as necessidades térmicas e respeite a necessidade hidráulica do mesmo (Shah e Bell, 2000).

Genericamente, trocadores de calor podem ser definidos 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 multituibulares, amplamente, utilizados na indústria química e petroquímica. 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).

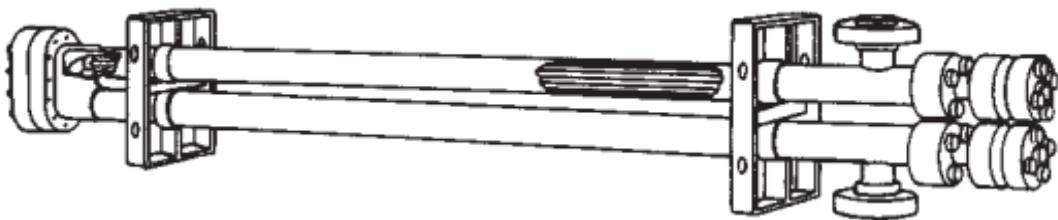
(\*) Doutorando em Engenharia Química na Universidade Federal do Ceará, campus do Pici. Engenheiro Químico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará , campus de Iguatu.

(\*\*) Doutorando em Engenharia Química na Universidade Federal do Ceará, campus do Pici.

A principal utilização de trocadores duplo tubo (bitubulares) são para aquecimento ou arrefecimento de fluido quando necessárias pequenas áreas de transmissão térmica. Esses trocadores também podem ser utilizados para ebulação ou condensação de pequenas quantidades de fluido. As principais vantagens dos trocadores bitubulares estão na flexibilidade de aplicação em diversos arranjos, facilidade do controle no fluxo de distribuição em cada canal de um tubo duplo, fácil instalação e limpeza (Bell, 1983).

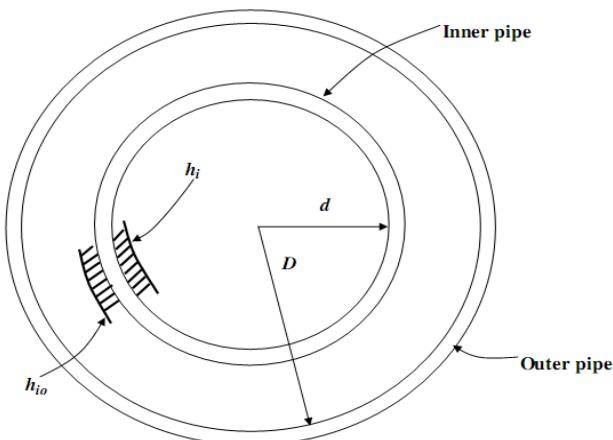
Guy (1983) ressalva que os trocadores de calor bitubulares são geralmente utilizados para realizarem pequenas tarefas, ou seja, quando a troca térmica desejada entre os fluidos no processo não for elevada.

**Figura 1 - Modelo de trocador de calor bitubular. Fonte: (Perry et al., 1999).**



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 ou residências tendo seu uso direcionado a vários propósitos como a manutenção ou adequação da temperatura de determinado fluido necessário a um ciclo térmico ou processo, condicionamento de ar, a uma geração de vapor, recuperação de calor, entre outras mais Leog *et al.* (1998). Já foi relatado por Leog *et al.* (1998) 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).

**Figura 2 – Visão do corte de secção de um trocador de calor bitubular. Fonte: (Swamee et al., 2007).**



Deste modo, o presente trabalho objetiva 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 propostas por Sieder e Tate (1936) e avaliação do projeto hidráulico, onde a queda de pressão em cada corrente foi 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 físicas, como densidade, viscosidade, calor específico e condutividade térmica são introduzidas no projeto do trocador de calor através de correlações testadas e validadas disponível na literatura científica. Para a versão 1.0 do TCSIM, é disponibilizado um banco de dados de fluidos com 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 (das equações características de cada propriedade) são inseridos no banco de dados do *software* sendo específicos para cada fluido.

<b>Nomenclatura</b>	
$D_o$	Diâmetro interno do tubo interno (ft)
$D_1$	Diâmetro externo do tubo interno (ft)
$D_2$	Diâmetro interno do tubo externo (ft)
$D_e$	Diâmetro equivalente ( $\text{ft}^2$ )
$A_i$	Área de escoamento interna ( $\text{ft}^2$ )
$A_e$	Área de escoamento externa ( $\text{ft}^2$ )
$A_t$	Área de troca térmica ( $\text{ft}^2$ )
$L$	Comprimento do tubo (ft)
$N$	Número de tubos (adimensional)
$U_d$	Coef. global de proj. "sujo" ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$ )
$U_c$	Coef. global de proj. "limpo" ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$ )
$R_d$	Fator de incrustação de proj. ( $(\text{h})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})/(\text{BTU})$ )
$Re$	Número de Reynolds (adimensional)
$Nu$	Número de Nusselt (adimensional)
$Pr$	Número de Prandtl (adimensional)
$Cp$	Calor específico ( $\text{BTU}/\text{lb}^\circ\text{F}$ )
$K$	Condutividade térmica ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft})(^\circ\text{F})$ )
$\mu$	Viscosidade (cp)
$\text{Com}$	Calor específico na temp. média ( $\text{BTU}/\text{lb}^\circ\text{F}$ )
$Cp_c$	Calor específico na temp. calórica ( $\text{BTU}/\text{lb}^\circ\text{F}$ )
$k_m$	Cond. térmica na temp. média ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft})(^\circ\text{F})$ )
$k_c$	Cond. térmica na temp. calórica ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft})(^\circ\text{F})$ )
$\mu_m$	Viscosidade na temp. média (cp)
$\mu_c$	Viscosidade na temp. calórica (cp)
$T_e$	Temperatura de entrada do fluido quente ( $^\circ\text{F}$ )
$T_s$	Temperatura de saída do fluido quente ( $^\circ\text{F}$ )
$t_e$	Temperatura de entrada do fluido frio ( $^\circ\text{F}$ )
$t_s$	Temperatura de saída do fluido frio ( $^\circ\text{F}$ )
$T_m$	Temperatura média do fluido quente ( $^\circ\text{F}$ )
$t_m$	Temperatura média do fluido frio ( $^\circ\text{F}$ )
$T_c$	Temperatura calórica do fluido quente ( $^\circ\text{F}$ )
$t_c$	Temperatura calórica do fluido frio ( $^\circ\text{F}$ )
$T_p$	Temperatura de parede ( $^\circ\text{F}$ )
$W_a$	Vazão mássica do fluido no tubo ( $\text{lbm}/\text{h}$ )
$W_p$	Vazão mássica do fluido no ânulo ( $\text{lbm}/\text{h}$ )
$Q$	Quantidade de calor transferida ( $\text{BTU}/\text{h}$ )
$\Delta p_p$	Queda de pressão no tubo (psi)
$\Delta p_a$	Queda de pressão no ânulo (psi)
$f$	Fator de atrito de Fanning(adimensional)
$G_p$	Fluxo mássico do tubo interno ( $\text{lb}/\text{h} \cdot \text{ft}^2$ )
$G_a$	Fluxo mássico do tubo interno ( $\text{lb}/\text{h} \cdot \text{ft}^2$ )
$g$	Aceleração da gravidade ( $\text{ft}/\text{s}^2$ )
$g'$	Aceleração da gravidade ( $\text{ft}/\text{s}^2$ )
$\rho$	Densidade do fluido ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ )
$V$	Velocidade do fluido (ft/s)
$MLDT$	Média logarítmica das temperaturas ( $^\circ\text{F}$ )

#### 2.1.1 Calor específico

- Calor Específico de Hidrocarbonetos Líquidos (Perry *et al.*, 1999):

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (1)$$

- Calor Específico de Frações de Petróleo (Rosenhow, 1973):

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (2)$$

#### 2.1.2 Condutividade térmica

- Condutividade Térmica de Hidrocarbonetos Líquidos (Reid *et al.*, 1987):

$$k = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (3)$$

- Condutividade Térmica de Frações de Petróleo (Bell, 1983):

$$k = A + BT \quad (4)$$

### 2.1.3 Viscosidade

- Viscosidade de Hidrocarbonetos Líquidos (Reid *et al.*, 1987):

$$\ln(\mu) = A + \frac{B}{T} + CT + DT^2 \quad (5)$$

- Viscosidade de Frações de Petróleo (Reid *et al.*, 1987):

$$k = A + BT + CT^2 + DT^3 \quad (6)$$

## 2.2 Cálculo da Temperatura calórica

Colburn (1933) constatou que a transferência de calor é sempre governada por um fluido de controle, ou seja, a taxa de calor transferido de um fluido quente está intimamente relacionada à capacidade de o fluido frio absorver esse calor. Com isso, define-se fração calórica como:

$$K_c = \frac{U_2 - U_1}{U_1} = \frac{U_h - U_c}{U_c} \quad (7)$$

Os índices c e h referem-se ao terminal frio e quente, respectivamente. Com isso, as temperaturas calóricas dos fluidos são dadas por:

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2) \quad (8)$$

E também:

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1) \quad (9)$$

## 2.3 Cálculo da Temperatura de parede

Analizando o fluido escoando dentro do tubo de um trocador de calor, geralmente se desconsidera a diferença de temperatura através do interior no tubo metálico ( $t_p$ ) e da superfície externa da parede ( $t_w$ ) desse mesmo tubo. Essa diferença de temperatura entre o interior e a superfície do tubo, pode ser provocada pelo atrito existente no escoamento dos fluidos no trocador, acrescentado devido ao efeito da natureza física dos fluidos utilizados. Para casos em que a troca térmica de um fluido com elevada viscosidade e uma grande diferença de temperatura dos terminais quente e frio, o cálculo da temperatura de parede é indispensável. Com isso, o cálculo de  $t_w$  é feito como segue nas equações (10), (11), (12) e (13).

- Para fluido frio no interior do tubo:

$$t_w = t_c + \frac{h_o}{h_{io} + h_o}(T_c - t_c) \quad (10)$$

Ou mesmo,

$$t_w = T_c - \frac{h_{io}}{h_{io} + h_o}(T_c - t_c) \quad (11)$$

- Para fluido quente no interior do tubo:

$$t_w = t_c + \frac{h_{io}}{h_{io} + h_o} (T_c - t_c) \quad (12)$$

Ou mesmo,

$$t_w = T_c - \frac{h_o}{h_{io} + h_o} (T_c - t_c) \quad (13)$$

## 2.4 Cálculo do coeficiente de película (projeto térmico)

Neste trabalho, são utilizadas para o cálculo do coeficiente de película as equações propostas por Sieder e Tate (1936), em que se ajustam dados para hidrocarbonetos e frações de petróleo em tubos verticais e horizontais. Com isso, têm-se:

- Regime Laminar ( $Re < 2100$ )

$$Nu = 1,86 \left[ (Re)(Pr) \left( \frac{D_0}{L} \right) \right]^{1/3} \quad (14)$$

- Regime Turbulento ( $Re > 2100$ )

$$Nu = 0,027 \left[ (Re)^{0,8} (Pr)^{1/3} \right] \quad (15)$$

## 2.5 Queda de pressão (Projeto hidráulico)

Após a conclusão do projeto térmico de um trocador de calor, é necessário também verificar se o equipamento atende as condições reais do 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 aquecer o fluido frio nas condições previstas 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

$$\Delta P_p = \frac{\left[ \left( \frac{4 f G_p^2 L}{2 g \rho^2 D_0} \right) \rho \right]}{144} \quad (16)$$

- Tubo Externo

$$\Delta P_a = \frac{\left[ \left( \frac{(4 f G_a^2 L)}{(2 g \rho^2 D_e)} \right) + \left( \frac{3V^2}{2g} \right) \right]}{144} \quad (17)$$

Para o cálculo do fator de atrito de Fanning ( $f$ ) em regime turbulento para tubos, utilizam-se as equações propostas por Drew *et al.* (1932):

$$f = 0,0014 + \frac{0,125}{\left( \frac{D.G_p}{\mu} \right)^{0,32}} \quad (18)$$

Para representar o fator de atrito de Fanning em tubos no regime laminar, utiliza-se um 1/4 do fator de Darcy, conhecido também como coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{16}{Re \cdot y} \quad (19)$$

## 2.6 Critério de avaliação térmica e hidráulica

Na medida em que o trocador de calor, já projetado, estiver no seu estado de funcionamento por muito tempo, a lama e o depósito sobre a superfície do tubo interno e externo produzirão um aumento na resistência de troca térmica. A resistência adicionada reduz o valor do coeficiente global de troca térmica, consequentemente, a quantidade de calor transferida não é mais a mesma na superfície que a inicialmente projetada. Provavelmente, a temperatura de saída do fluido quente será superior e a temperatura de saída do fluido frio inferior ao esperado. Com isso, a avaliação térmica é realizada mediante análise comparativa do fator de incrustação calculado  $R_d$  (calculado) pelo TCSIM e o fator de incrustação de projeto  $R_d$  (projeto). Esse cálculo é realizado com auxílio da equação (20). O valor de  $R_d$  (calculado) é referente ao balanço de energia encontrado pelas condições iniciais das correntes acrescidas das propriedades do trocador, já o  $R_d$  (projeto) é referente aos valores iniciais inseridos pelo usuário.

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c U_d} \quad (20)$$

O coeficiente global atual é calculado da seguinte maneira:

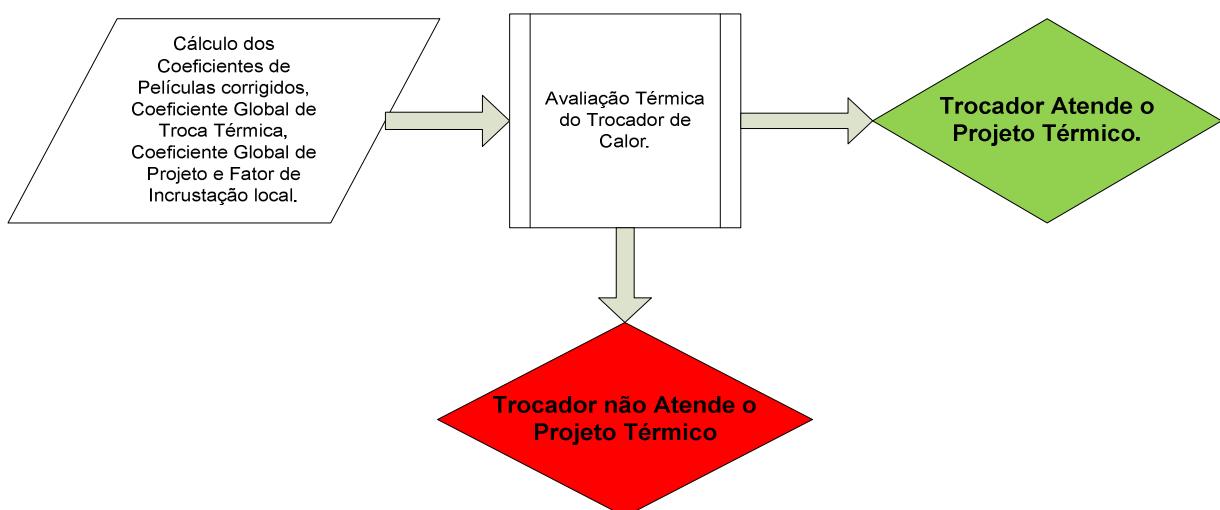
$$U_{ATUAL} = \frac{Q_{Medio}}{AxMLDT} \quad (21)$$

Com isso,

$$R_d = \frac{U_c - U_{ATUAL}}{U_c U_{ATUAL}} \quad (22)$$

Enquanto o valor do  $R_d$  (calculado) for maior do que o  $R_d$  (projeto), o trocador atende ao projeto térmico. Caso a condição, anteriormente citada, não for satisfeita, o trocador de calor não atende ao projeto térmico (ver fluxograma a seguir).

**Figura 3 – Critério de avaliação térmica do equipamento.**



A análise hidráulica do trocador é realizada de maneira similar. Caso os valores de queda de pressão apresentados no tubo e ânulo forem superiores aos informados pelo usuário, mediante avaliação pela equação

(9) e (10), o equipamento estará incapaz de realizar tal operação. O contrário também é verdadeiro (ver fluxograma a seguir).

**Figura 4 – Critério de avaliação hidráulica do equipamento.**



## 2.7 Plataforma e banco de dados

O TCSIM versão 1.0 foi desenvolvido em ambiente *Windows* para tornar o estudo de trocadores de calor mais simples. Apesar do aprendizado no processo de transferência de calor, especialmente, no estudo das simulações de trocadores de calor serem independentes da ferramenta computacional utilizada, pode-se afirmar que interpretação, compreensão e manuseio do *software* são melhor assegurados em ambiente computacional que possua enriquecimento visual de interface.

Dentre todas as linguagens que apresentam esse recurso visual, a escolhida para o desenvolvimento desse software foi a Pascal. O critério de escolha é baseado tanto no poder de recurso visual que essa linguagem oferece quanto na facilidade do processo de elaboração do *software*.

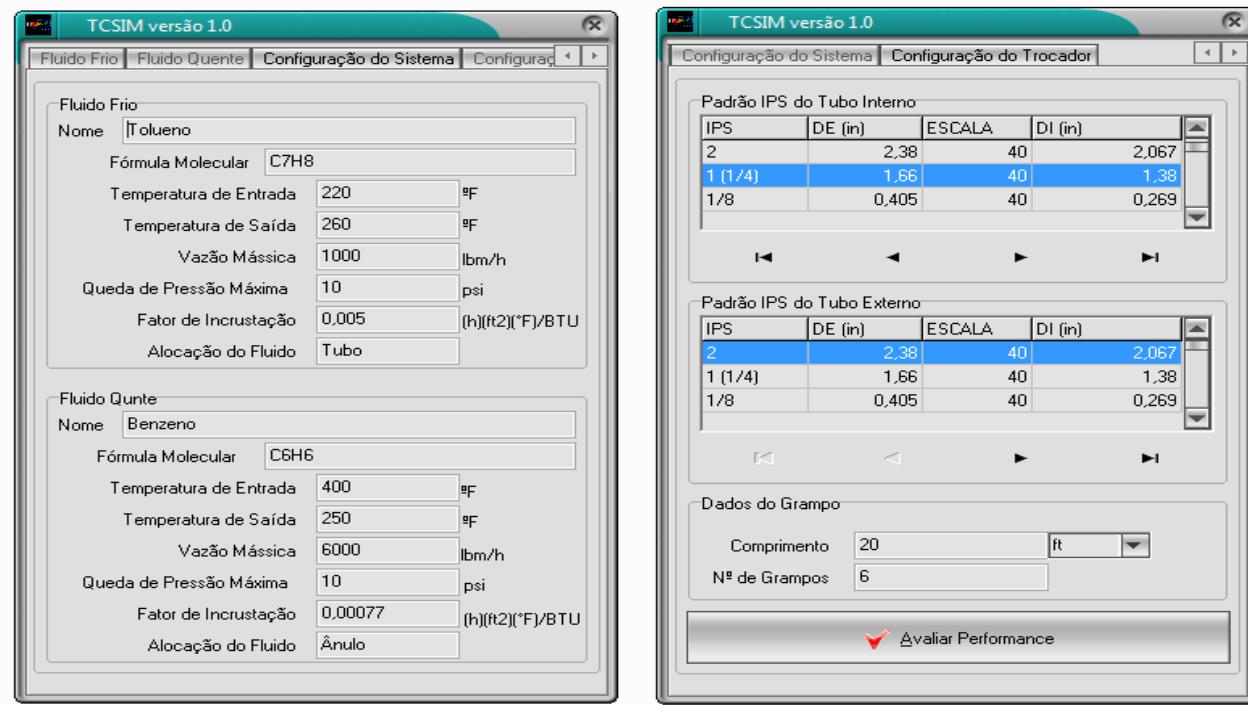
O acoplamento do Delphi a um sistema de gerenciamento de banco de dados é, sem dúvida, responsável pela maior facilidade da configuração e simulação dos trocadores de calor no TCSIM versão 1.0. Neste trabalho é utilizado banco de dados *MS Access*® para armazenar todas as informações dos fluidos e dos trocadores que podem ser usados nas simulações. O componente *MS Access*® permite o desenvolvimento rápido de aplicações que envolvem tanto a modelagem de estrutura, como também a interface utilizada pelo usuário. A característica principal do componente *Access* é a facilidade que o programador tem de trabalhar com o banco de dados juntamente com a interface visual e disponibilidade nas funções de importação e exportação, permitindo a integração entre *Windows* e outras aplicações de plataforma.

Desta forma, utiliza-se o Delphi® como plataforma de acoplamento ao banco de dados *MS Access*®.

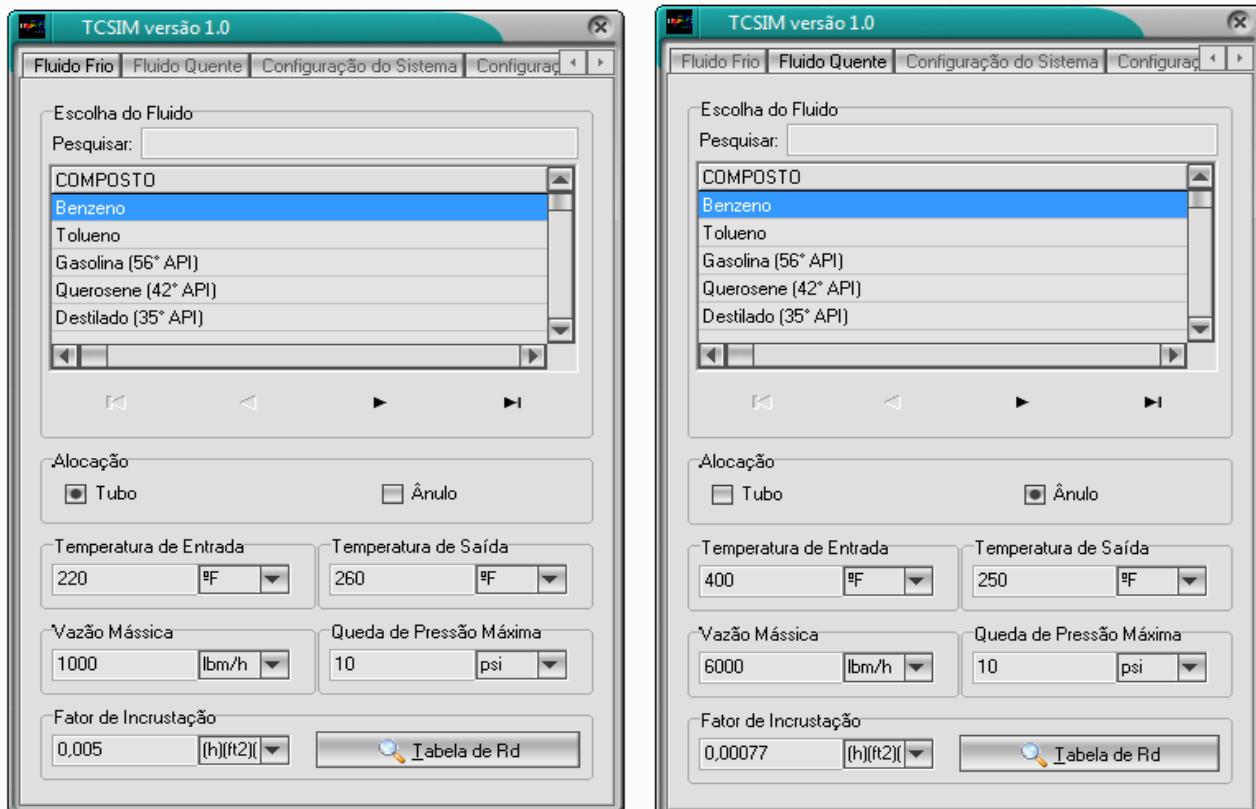
## 3 INTERFACE GRÁFICA DO TCSIM VERSÃO 1.0

O TCSIM é dividido em módulos de forma intuitiva. Os primeiros módulos a serem acessados pelo usuário são os referentes a escolha dos fluidos e trocadores de calor (configuração dos tubos), como mostrado na Figura 5. Posteriormente, tem-se os módulos para se introduzir as características dos fluidos frio e quente (temperaturas de entrada e saída, alocação do fluidos, fator de incrustação e vazão), sendo observado na Figura 6. Após ser realizado todos os cálculos, os módulos de resultados são exibidos, mostrando todos os dados necessários para a avaliação do trocador, sendo exibido se o trocador atende ou não ao projeto térmico e/ou hidráulico (ver Figura 7). Além disso, são exibidos gráficos de propriedades físicas e de projeto em função do comprimento do trocador de calor, como pode ser observado nas Figuras 8 e 9.

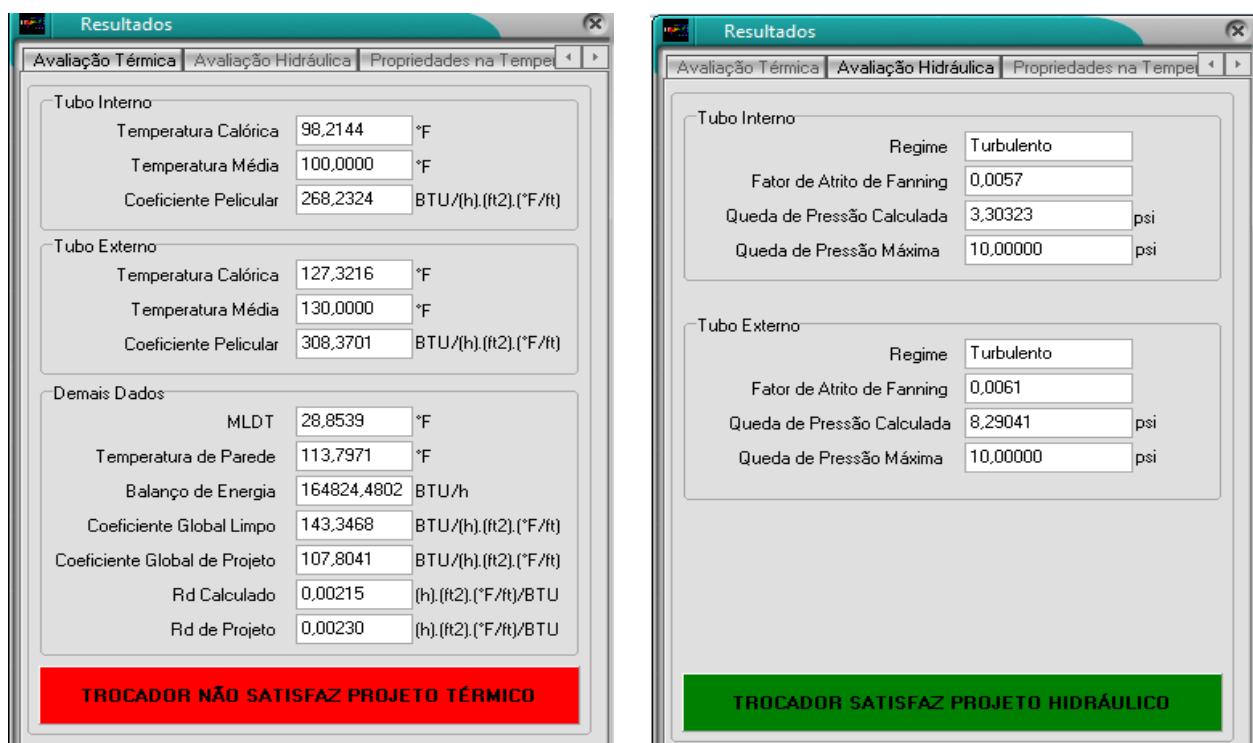
**Figura 5 – Módulos de entrada de dados para escolha dos fluidos e configuração dos tubos.**



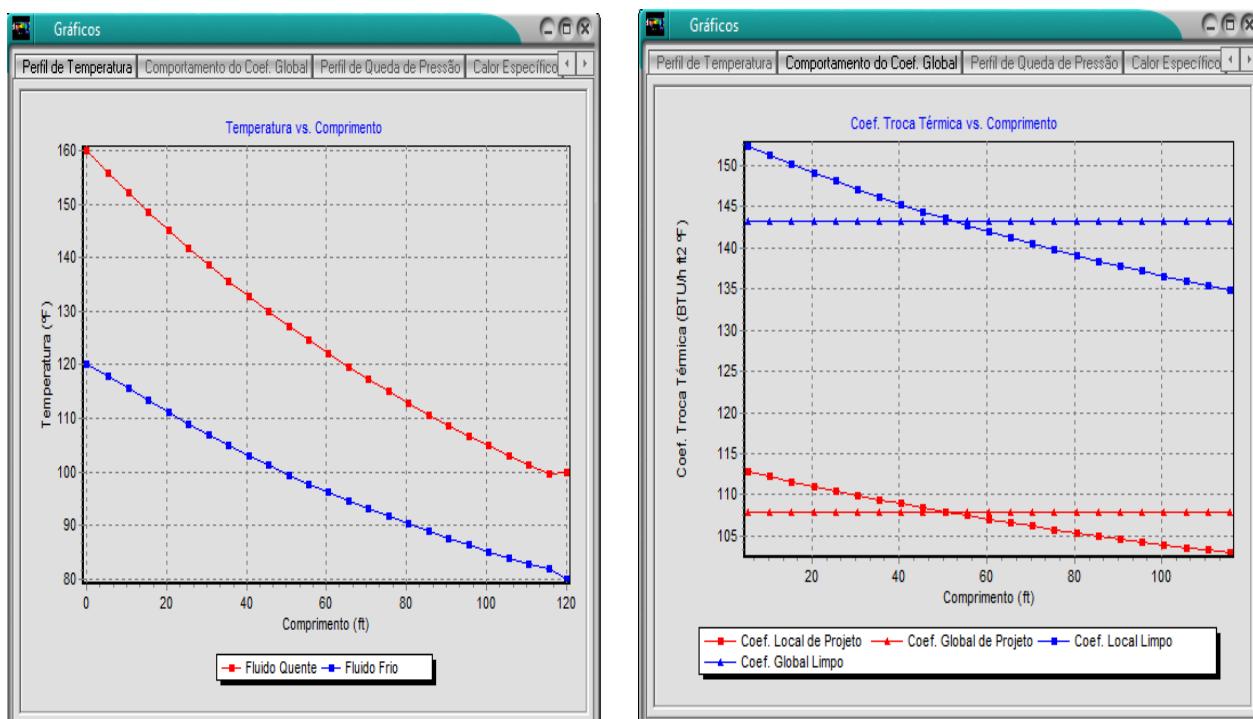
**Figura 6 – Módulos de entrada de dados do trocador para o fluido frio e quente, respectivamente.**

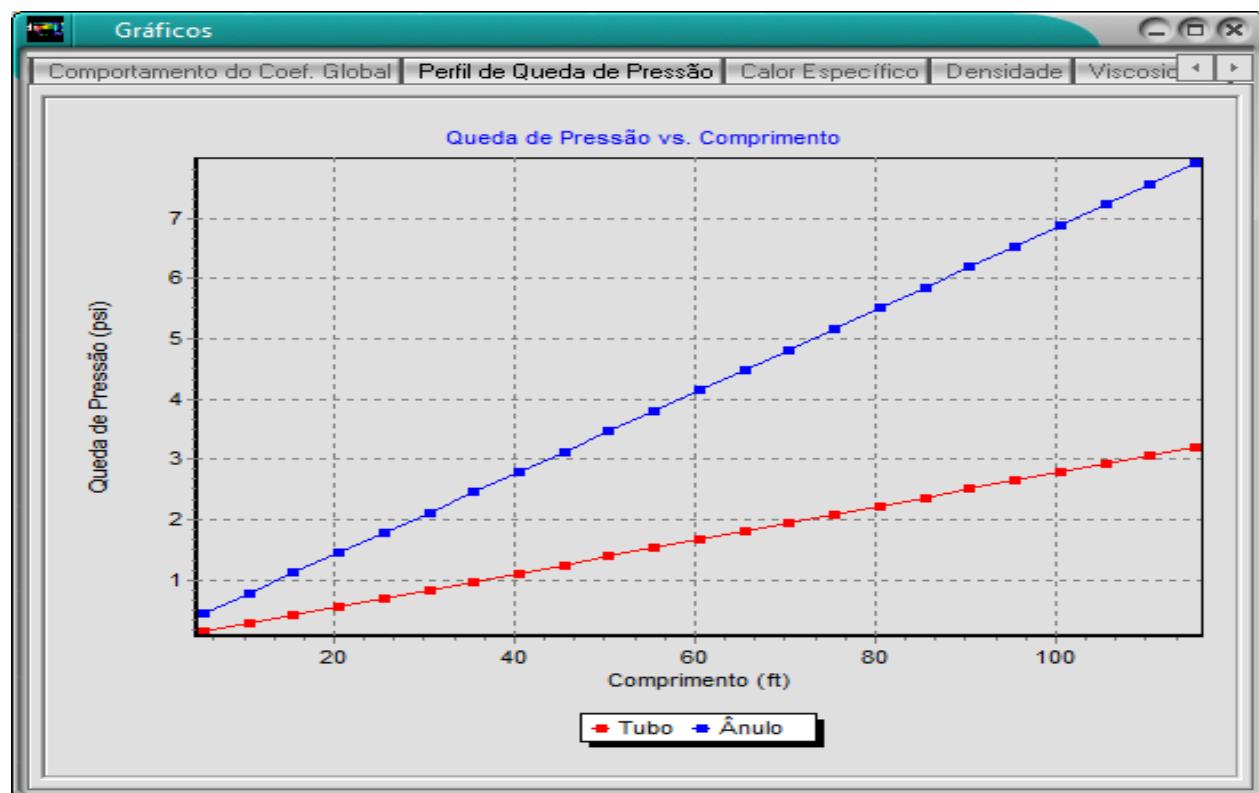


**Figura 7 - Módulos de resultados de análise térmica e análise hidráulica.**



**Figura 8 – Módulo com os gráficos do comportamento das propriedades dos fluidos ao longo do trocador.**



**Figura 9 - Módulo com a queda de pressão ao longo do trocador.**

#### 4. ESTUDO DE CASO: RESFRIAMENTO DE TOLUENO UTILIZANDO BENZENO

Na Tabela 1 são mostrados os principais parâmetros de projeto do trocador que irá simular o resfriamento da corrente de tolueno líquido, utilizando uma corrente de benzeno líquido.

**Tabela 1 - Especificações do equipamento.**

Parâmetro	Valor
Diâmetro interno do tubo interno ( $D_0$ )	0,115 (ft)
Diâmetro externo do tubo interno ( $D_1$ )	0,138 (ft)
Diâmetro interno do tubo externo ( $D_2$ )	0,1725 (ft)
Área de escoamento interna ( $A_i$ )	0,0104 ( $\text{ft}^2$ )
Área de escoamento externa ( $A_e$ )	0,0762 ( $\text{ft}^2$ )
Área de troca térmica ( $A_t$ )	50,5 ( $\text{ft}^2$ )
Comprimento do Tubo (L)	20 (ft)
Número de Tubos (n)	3
Coeficiente global de troca térmica sujo de projeto (Ud)	111 ( $\text{BTU}/(\text{h})(\text{ft}^2)(^\circ\text{F})$ )
Fator de incrustação de projeto (Rd)	0,0023 ((h)( $\text{ft}^2$ )( $^\circ\text{F}$ )/(BTU))

Fonte: Kern (1950).

Após especificar o equipamento que deverá ser estudado, é necessário informar as condições de cada corrente dentro do equipamento. A Tabela 2 mostra as informações necessárias para esse estudo.

**Tabela 2 - Especificação para cada corrente do equipamento.**

Fluido	Te (°F)	Ts (°F)	W (lb/h)	Rd ((h)(ft <sup>2</sup> )(°F)/(BTU))	Δp (psi)
Benzeno	80	120	9820	0,001	10
Tolueno	160	100	6330	0,001	10

Fonte: Kern (1950).

Nas Tabelas 3, 4 e 5, são mostrados os resultados obtidos pelo TCSIM versão 1.0 para o resfriamento do tolueno, utilizando benzeno, conforme especificações expostas nas tabelas 1 e 2. Observa-se nos pontos 6 e 7 da simulação (Tabela 5) condições ideais de operação do equipamento, onde o mesmo obedece aos critérios de aceitação da faixa de operação térmica e hidráulica.

**Tabela 3 - Resultados das propriedades térmicas da corrente de tolueno.**

Simulação	Te (°F)	Ts (°F)	W (lb/h)	Tm (°F)	Tc (°F)	Tp (°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 <sub>p_m</sub> (Btu/lb °F)	C <sub>p_c</sub> (Btu/lb °F)	k <sub>M</sub> (Btu/(h)(ft)(°F))	k <sub>c</sub> (Btu/(h)(ft)(°F))	μ <sub>M</sub> (lb/ft.h)	μ <sub>c</sub> (lb/ft.h)	ρ <sub>M</sub> (lb/ft <sup>3</sup> )	ρ <sub>c</sub> (lb/ft <sup>3</sup> )
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

Ao observar os resultados de fatores de incrustação e quedas de pressão (tubo e ânulo) presentes na Tabela 5 e comparar com os resultados pré-definidos nas condições iniciais de projeto, exposto na Tabela 1, consegue-se avaliar as condições térmica e hidráulica do mesmo.

**Tabela 5 - Resultados da avaliação de performance do trocador de calor.**

Simulação	Uc Btu/(h)(ft <sup>2</sup> )(°F)	Ud Btu/(h)(ft <sup>2</sup> )(°F)	Rd (h)(ft <sup>2</sup> )(°F)/Btu	ΔP <sub>T</sub> (psi)	ΔP <sub>A</sub> (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 é uma iniciativa ousada na criação de uma ferramenta computacional para, inicialmente, auxiliar no aprendizado dos fenômenos de troca térmica, em especial, no 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 fornece resultados confiáveis para hidrocarbonetos e substâncias puras com propriedades físicas bem definidas.

A nível didático, percebe-se o quanto intuitivo é o software para manuseá-lo. A intenção é, além de facilitar o aprendizado da operação unitária que rege o equipamento, também elaborar o software com uma linguagem computacional bastante utilizada por alunos.

## REFERÊNCIAS

- KERN, D.Q. **Process Heat Transfer**. New York: McGraw-Hill, 1950.
- ROSENHOW, W.M.; HARTNETT, P.J. **Handbook of Heat Transfer**. New York: McGraw-Hill, 1973.
- SHAH, R.K.; BELL, K.J. **Handbook of Thermal Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- KUPPAN, T. **Heat Exchanger Design Handbook**. New York: Marcel Dekker, 2000.
- BELL, K.J. Types of Heats Exchanger. In: SCHLÜNDER, E.U. **Heat exchanger theory**. USA: Hemisphere Publishing Corporation, cap. 3.1.2, p. 2-9, 1983.
- GUY, A.R. Applications of Double-Pipe Heat Exchanger. In: SCHLÜNDER, E.U. **Heat exchanger theory**. USA: Hemisphere Publishing Corporation, cap. 3.2.2, p. 2-8, 1983.
- PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1999.
- LEOG, K.C.; TOH, K.C.; LEONG, Y.C. Shell and Tube Heat Exchanger Design Software for Educational Applications. **Int. J. Engng.** v. 14, p. 217-224, 1998.
- SWAMEE, P.K.; AGGARWAL, N.; AGGARWAL, V. Optimum design of double pipe heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, p. 2260-2266, 2007.
- SIEDER, E.N.; TATE, F.E. Heat Transfer and Pressure Drop in Tubes. **Ind. Eng. Chem.**, v. 28, p. 1429-1436, 1936.
- REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M.; POLING, B.E. **The Properties of Gases & Liquids**, New York: McGraw-Hill Book Company, 1987.
- COLBURN, A.P. Mean Temperature Difference and Heat Transfer Coefficient in Liquid Heat Exchanger. **Ind. Eng. Chem.** v. 25, p. 873-877, 1933.
- DREW, T.B.; KOO, R.C.; Mc ADAMS, W.H.; The friction factors for clean round pipe. **Trans AIChE**, v. 28, p. 56-72, 1932.

Recebido: 02-05-2011

Aprovado: 27-06-2012