

# MODELAGEM ESTRUTURADA DE TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS

Gerson Balbuena Bicca, Argimiro Resende Secchi, Keiko Wada

Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)  
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Rua Sarmiento Leite, 288/24 – CEP: 90050-170 – Porto Alegre – RS – Brasil  
Email: {bicca, arge, keiko}@enq.ufrgs.br

**RESUMO** – Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de procedimentos hierárquicos de cálculo para os parâmetros de avaliação de trocadores de calor tipo casco e tubos com precisão adequada e baixo custo computacional, facilitando a simulação e otimização de processos, implementados dentro do simulador EMSO. Os modelos criados permitem a simulação de trocadores do tipo E Shell, F Shell e trocadores casco e tubos multipasses conforme a designação das normas TEMA para esses equipamentos. Várias simulações foram realizadas em uma bateria de trocadores de calor de uma unidade de destilação atmosférica de uma refinaria de petróleo. Os resultados encontrados permitem ao usuário ter fácil acesso aos parâmetros do trocador de calor, ou incorporar novos procedimentos para o cálculo desses equipamentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** trocadores de calor; simulação de processos; EMSO.

**ABSTRACT** – The aim of this work is the development of hierarchical procedures for calculating the evaluation parameters of shell and tube heat exchangers with adequate accuracy and low computational cost, facilitating the process simulation and optimization, implemented in the EMSO simulator. The developed models allow the simulation of heat exchangers of the E Shell, F Shell, and multipass types in agreement with the TEMA standards for this equipment. Several simulations had been carried through in a battery of heat exchangers of an atmospheric distillation unit of an oil refinery. The obtained results allow the user to have easy access to the parameters of the heat exchanger, or to incorporate new procedures for the calculation of these pieces of equipment.

## 1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor casco e tubos são equipamentos largamente empregados nas indústrias em geral. Uma descrição e classificação completa desses equipamentos do ponto de vista da engenharia de processos podem ser encontradas em Saunders (1988) e Kakac et al. (1981).

Um entendimento básico dos parâmetros que influenciam no desempenho térmico e hidráulico do trocador de calor é de vital importância ao engenheiro de processos. Existem muitos softwares comerciais de projeto e avaliação de trocadores de calor disponíveis no mercado, tais como Aspen B-JAC, HTFS, HTRI, entre outros. Contudo, esses softwares são de custos elevados para a obtenção de suas licenças e as correlações empregadas não são de completo domínio público.

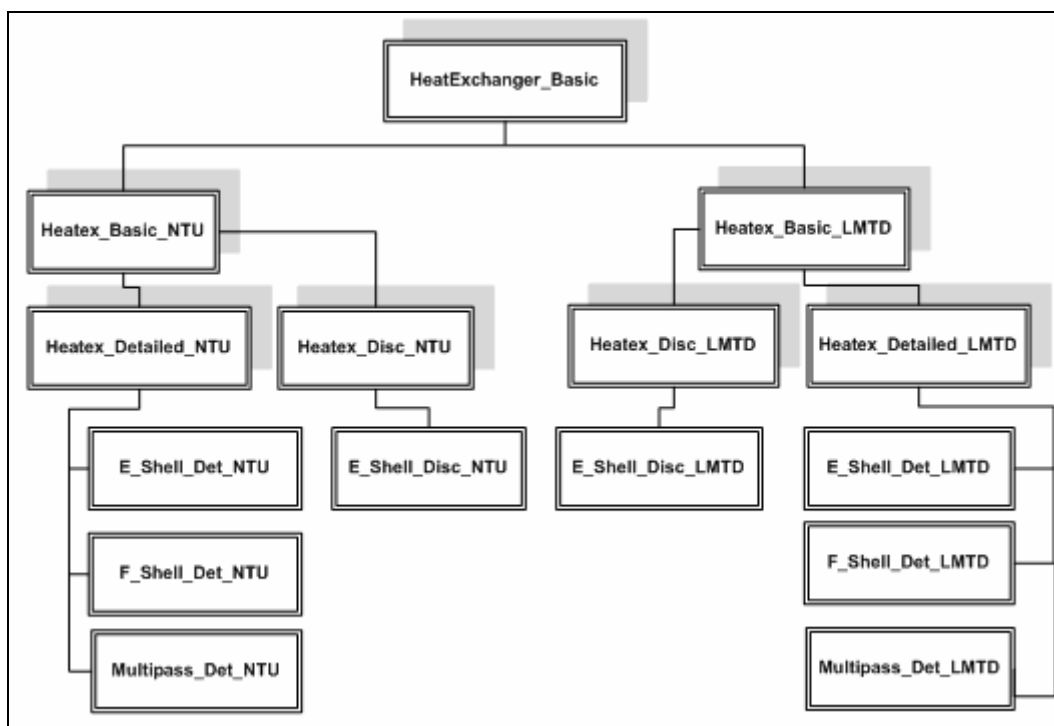


Figura 1 – Hierarquia de classes em trocadores de calor casco e tubos.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de procedimentos hierárquicos de cálculo para os parâmetros de avaliação de trocadores de calor tipo casco e tubos com precisão adequada e baixo custo computacional, facilitando a simulação e a otimização de processos, implementados dentro do simulador EMSO (Soares e Secchi, 2003).

Para tratar a modelagem matemática dos diferentes tipos de trocadores de calor e as diferentes metodologias de cálculos, fez-se uso dos recursos da linguagem de programação orientada a objetos disponível no simulador EMSO. Desta forma, foi possível estruturar a modelagem desses equipamentos aproveitando ao máximo os conceitos de composição e herança e facilitando o desenvolvimento de novos modelos de trocadores de calor.

A Figura 1 ilustra a hierarquia usada na modelagem matemática de trocadores de calor casco e tubos e os métodos de cálculo a partir de modelos básicos.

## 2. MODELAGEM HIERÁRQUICA

Os diferentes tipos de trocadores de calor casco e tubos possuem características comuns que podem ser reunidas em um único modelo básico.

Essas características (parâmetros, variáveis e equações) são descritas em modelos separados e que através da composição e herança é adicionada ao modelo básico. Isto faz com que a modelagem seja estruturada diminuindo a complexidade de equacionamento do equipamento e uma maior capacidade de reuso do código.

O bloco *HeatExchanger\_Basic* do esquema mostrado na Figura 1 é um modelo básico e é a abstração matemática de um determinado comportamento do equipamento. Este bloco por sua vez é composto de vários outros modelos básicos e contém as equações comuns de trocadores de calor, tais como balanços de massa e energia e cálculos das propriedades físicas dos fluidos.

O modelo básico contém portas que são pontos de conexão das informações que entram e que saem do equipamento e são associadas ao modelo de correntes que carregam as informações do processo (temperatura, vazão, pressão, composição, entalpias, etc.). Dessa maneira é possível conectar o trocador de calor a qualquer outro equipamento através das suas portas.

As propriedades termodinâmicas e de transporte dos fluidos são calculadas por uma rotina externa ao simulador, pois o EMSO contém mecanismos de interfaces que possibilitam ao usuário utilizar diferentes pacotes termodinâmicos de cálculos de propriedades ou de criar as suas próprias rotinas para tal serviço.

Os blocos *Heatex\_Basic\_LMTD* e *Heatex\_Basic\_NTU* são modelos básicos para os métodos de cálculos disponíveis para o trocador de calor, podendo o usuário optar por um dos dois métodos. O primeiro método contém as equações de transferência de calor baseado na diferença de temperaturas média logarítmica (LMTD) e do fator de correção da LMTD, enquanto que o segundo faz uso das relações de efetividade e do número de unidades de transferência do trocador de calor (NTU).

Através da composição desses blocos, foram criados dois novos blocos para cada método de cálculo empregado. Os blocos *Heatex\_Detailed\_LMTD* e *Heatex\_Detailed\_NTU* que descrevem a modelagem macroscópica dos trocadores de calor e os blocos *Heatex\_Disc\_LMTD* e *Heatex\_Disc\_NTU* que descrevem a modelagem a parâmetros distribuídos.

A partir dessa hierarquia, foram desenvolvidos modelos de equipamentos que permitem a simulação dos tipos de trocadores de calor casco e tubos comumente usados na indústria e designados pelas normas TEMA (1988) como:

- *E Shell* – Trocador de calor casco e tubos com um único passe no casco.
- *F Shell* – Trocador de calor casco e tubos com dois passes no casco.
- *Trocadores multipasses* – Trocadores *E Shell* conectados em série.

Na modelagem a parâmetros concentrados as propriedades físicas das correntes são avaliadas a uma temperatura média, isto é, a média entre as temperaturas de entrada e saída do equipamento.

No modelo a parâmetros distribuídos a transferência de calor e a perda de carga são calculadas defletor a defletor e consiste em dividir o trocador de calor em partes denominadas zonas. Sendo o número de zonas dados pela Equação 1 e mostradas na Figura 2.

$$\text{Zonas} = \text{Nr de Defletores} + 1 \quad (1)$$

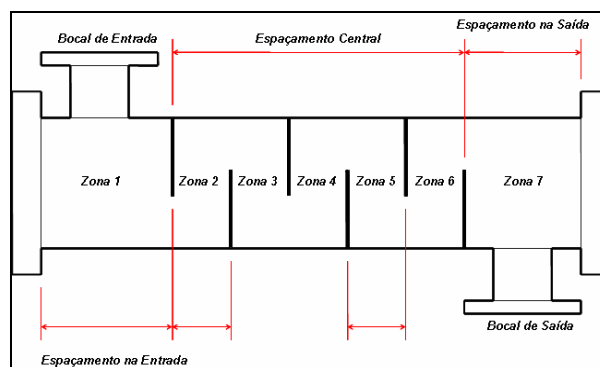


Figura 2 – Modelo a parâmetros distribuídos.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

O cálculo do coeficiente de transferência de calor para o lado dos tubos é avaliado por correlações sugeridas na literatura. Para o escoamento laminar, a correlação de Hausen (Incropera e Dewitt, 1988) é usada nas condições de temperatura de superfície constante e para números de Reynolds ( $Re_D$ ) menores do que 2300.

Para o escoamento turbulento, a equação de Petukhov e Popov (Incropera e Dewitt, 1988) é utilizada no intervalo de  $10^4 < Re_D < 5 \cdot 10^6$  e, a correlação de Gnielinski (1976) é usada para a região de transição e válida para  $3000 < Re_D < 5 \cdot 10^6$ . Outras correlações podem ser facilmente incluídas no modelo, devido sua estrutura modular.

A queda de pressão do fluido percorrendo vários passes nos tubos é calculada por (Saunders, 1988):

$$\Delta P_{tubos} = \frac{2 \cdot f \cdot L \cdot N_{pt} \cdot \rho_t \cdot V_t^2}{Di \cdot \Phi} \quad (2)$$

onde  $N_{pt}$  é o número de passes,  $L$  é o comprimento efetivo do tubo,  $\rho_t$ ,  $Di$  e  $V_t$  são respectivamente a massa específica, o diâmetro interno do tubo e a velocidade média do fluido escoando no interior do tubo.

$f$  é o coeficiente de atrito que para o escoamento turbulento e transição é calculado por (Incropera e Dewitt, 1988):

$$f = (0,790 \cdot \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad (3)$$

Para o escoamento laminar o coeficiente de atrito é dado por:

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (4)$$

A correção da viscosidade é dada por (Sieder e Tate, 1936):

$$\Phi = \left( \frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (5)$$

Onde  $\mu_w$  é a viscosidade do fluido na temperatura da parede e  $\mu_t$  é a viscosidade do fluido na temperatura média global do fluido.

A perda de carga nos bocais de entrada e saída é baseada na velocidade do fluido nos bocais. As perdas são expressas em termos do adimensional  $K$  que caracteriza essas perdas (Saunders, 1988):

$$\Delta P_{bocais} = K \cdot \frac{\rho_t \cdot V_{bocal}^2}{2} \quad (6)$$

$$K = 1,1 \quad (\text{Bocal de entrada}) \quad (7)$$

$$K = 0,7 \quad (\text{Bocal de saída}) \quad (8)$$

A perda de carga total para o fluido dos tubos é computada por:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{tubos} + \Delta P_{bocais} \quad (9)$$

O método de cálculo implementado para o lado do casco é o método de Bell-Delaware (Bell, 1963) que segundo Palen e Taborek (1969), ainda é considerado o mais adequado dos métodos para a análise do casco, pois se encontra ampla e claramente descrito na bibliografia e apresenta resultados dentro de uma faixa razoável de precisão.

O método de Bell (1963) usa os conceitos da teoria das correntes de Tinker (1958). Baseia-se no cálculo de fatores que descrevem a transferência de calor e a perda de carga em um feixe de tubos ideal modificado pela presença de defletores que introduzem distorções no escoamento devido à formação de correntes de vazamentos e *bypass* que surgem através de folgas do equipamento. Essas correntes foram assim denominadas:

1. **Corrente de fluxo cruzado puro (B):** corrente relacionada ao fluxo ideal sobre o feixe de tubos. Esta corrente age forçando parte do fluxo através de folgas causando vazamento e *bypass*;
2. **Corrente de vazamento entre a parede do casco e a extremidade do defletor (E):** refere-se ao fluxo através da folga entre o defletor e a parede interna do casco;

3. **Corrente de vazamento entre tubos e defletor (A):** é formada devida á folga entre a parede do tubo e o orifício do defletor;
4. **Corrente de bypass (C):** formada entre a parede do casco e o feixe de tubos.
5. **Corrente de bypass (F):** formada na partição dos tubos devido à omissão de alguns tubos. Essa corrente foi adicionada ao modelo original de Tinker (1958) por Palen e Taborek (1969).

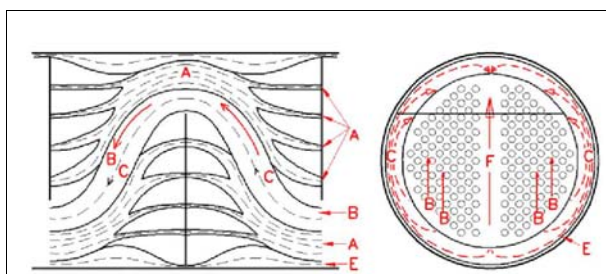


Figura 3 – Correntes de Fluxos em trocadores casco e tubos baseado em Tinker (1958).

Cada uma das correntes mostradas na Figura 3 introduz um fator de correção para as correlações de transferência de calor em um escoamento ideal através de um feixe de tubos. A equação básica para o cálculo do coeficiente de transferência de calor para o casco é dada por:

$$h_c = h_{ideal} \cdot J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s \quad (10)$$

onde  $h_{ideal}$  é o coeficiente de transferência de calor em um escoamento ideal através do feixe de tubos.

$J_c$  - é o fator de correção para os efeitos de configuração no defletor (corte da janela e espaçamento).

$J_l$  - é o fator de correção para os efeitos de vazamento no defletor.

$J_b$  - é o fator de correção para os efeitos de bypass no feixe de tubos (correntes C e F).

$J_s$  - é o fator de correção para os efeitos de espaçamentos do defletor diferentes na entrada e/ou saída.

$J_r$  - é o fator de correção para o gradiente de temperatura adverso no escoamento laminar.

A perda de carga para o lado do casco é constituída pelos seguintes componentes, ilustrados nas Figuras 4 a 7:

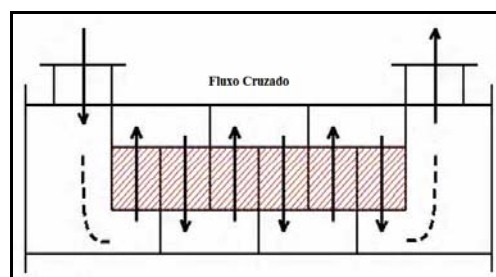


Figura 4 – Perda de carga em fluxo cruzado puro,  $\Delta P_c$ .

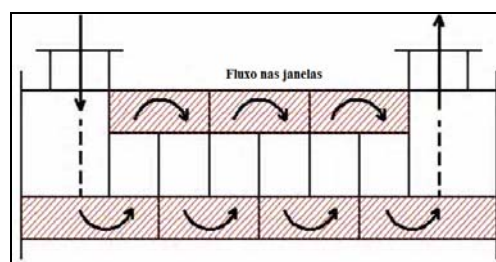


Figura 5 – Perda de carga nas janelas dos defletores,  $\Delta P_w$ .

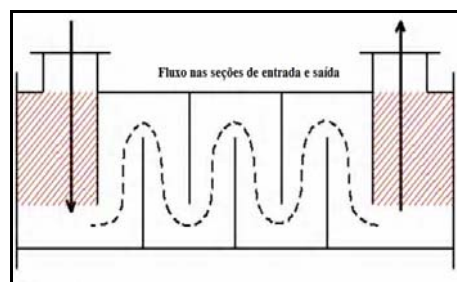


Figura 6 – Perda de carga nas seções de entrada e saída do trocador,  $\Delta P_e$ .

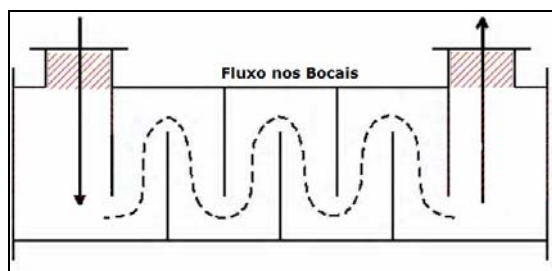


Figura 7 – Perda de carga nos bocais de entrada e saída do trocador,  $\Delta P_{bocal}$ .

Finalmente, a perda de carga total no lado casco é computada por:

$$\Delta P_{casco} = \Delta P_c + \Delta P_w + \Delta P_e + \Delta P_{bocal} \quad (11)$$

O método de Bell é um método de avaliação (*rating method*). Avaliar um trocador de calor significa determinar o desempenho termo-hidráulico de um trocador existente com uma geometria conhecida e especificada. Os modelos propostos são restritos aos trocadores de calor casco e tubos com defletores segmentados operando no estado estacionário e sem mudança de fases, cujas correntes podem ser gás ou líquido.

#### 4. VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para a validação dos modelos várias simulações foram realizadas em uma bateria de trocadores de calor de uma unidade de destilação atmosférica de uma refinaria de petróleo.

As correntes de processo foram originalmente caracterizadas por pseudo-componentes e a partir de informações do banco de dados fornecidos pela refinaria as propriedades físicas dessas correntes e a sua dependência com a mudança de temperatura foram correlacionadas pelo ajuste de curvas e calculadas por uma rotina externa ao simulador.

Os equipamentos avaliados foram trocadores de calor casco e tubos do tipo *E Shell* com defletores segmentados e com dois

passes nos tubos. O *Flowsheet* para a simulação no EMSO é mostrado na Figura 8.

```
AL2B_macro.mso
- FlowSheet Trocador_AL2B
DEVICES
  exchanger as E_Shell_LMTD_Det;
  streamhot_in as stream_therm;
  streamcold_in as stream_therm;
CONNECTIONS
  streamhot_in to exchanger.Inlet.Hot;
  streamcold_in to exchanger.Inlet.Cold;
PARAMETERS
  PP as CalcObject (File="petroil.d11");
  NComp as Integer (Brief="Number of chemical components");
  HE as CalcObject (File="heatex.d11");
SET
  PP.Components = ["Fhot","Fcold"];
  NComp = PP.NumberOfComponents;
  exchanger.HOTside = 0;
  exchanger.Tpass = 2;
  exchanger.Dishell = 0.914 "m";
  exchanger.Lcf = 0.0430898 "m";
  exchanger.Nss = 2;
  exchanger.Donozzle_Shell = 0.38735 "m";
  exchanger.Dinozzle_Shell = 0.38735 "m";
  exchanger.Honozzle_Shell = 0.0225 "m";
  exchanger.Hinozzle_Shell = 0.02155 "m";
  exchanger.Ntt = 775;
  exchanger.Pattern = 90;
  exchanger.pitch = 0.0254 "m";
  exchanger.Ltube = 5.970 "m";
  exchanger.Ditube = 0.0148336 "m";
  exchanger.Dotube = 0.01905 "m";
  exchanger.Kwall = 0.057 "kW/m/K";
  exchanger.Donozzle_Tube = 0.15405 "m";
  exchanger.Dinozzle_Tube = 0.15405 "m";
  exchanger.Lcd = 0.0047625 "m";
  exchanger.Bc = 35;
  exchanger.Ltd = 0.0003969 "m";
  exchanger.Nb = 8;
SPECIFY
  streamhot_in.F = 40.476 "mol/s";
  streamhot_in.T = 419.25 "K";
  streamhot_in.v = 0;
  streamhot_in.z = [1,0];
  streamhot_in.P = 733.06 "kPa";
  streamcold_in.F = 121.698 "mol/s";
  streamcold_in.T = (90.2+273.15) "K";
  streamcold_in.v = 0;
  streamcold_in.z = [0,1];
  streamcold_in.P = 2210.26 "kPa";
  exchanger.Baffles.Ls = 0.622 "m";
  exchanger.Baffles.Lsi = 0.807813 "m";
OPTIONS
#-----
# Simulation Options
#-----
mode = "steady";
relativeAccuracy = 1e-6;
end
```

Figura 8 – *FlowSheet* para a simulação no EMSO.

Duas simulações foram realizadas: a primeira com o modelo a parâmetros concentrados e a segunda com o modelo a parâmetros distribuídos onde se obteve os perfis de temperatura e pressão e a variação das propriedades físicas ao longo do comprimento do trocador de calor.

Em ambas as simulações o usuário obtém informações da taxa de calor trocado, os coeficientes de transferência de calor, as velocidades no casco e nos tubos, o coeficiente global de troca térmica e os fatores de correção para a transferência de calor no lado casco estimados pelo método de Bell-

Delaware, entre outras informações peculiares de trocadores de calor.

A Figura 9 mostra os perfis de temperaturas ao longo do equipamento.

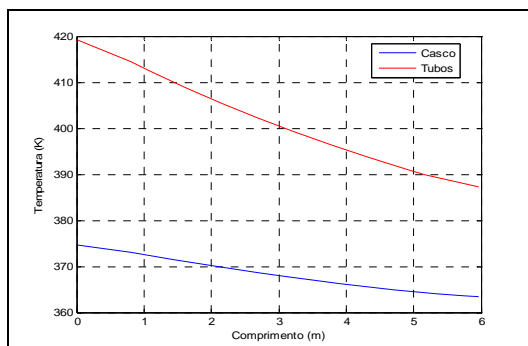


Figura 9 – Perfil de temperaturas.

A Tabela 1 mostra a distribuição da perda de carga nas diversas seções do casco e a Figura 10 ilustra os perfis de pressão ao longo do comprimento do trocador de calor.

Tabela 1 - Perda de carga nas seções do casco.

Janelas	0,1570 atm
Fluxo Cruzado	0,0508 atm
Seção de Entrada e Saída	0,0242 atm
Bocal de Entrada	0,0495 atm
Bocal de Saída	0,0477 atm
<b>Perda de Carga Total</b>	<b>0,3292 atm</b>

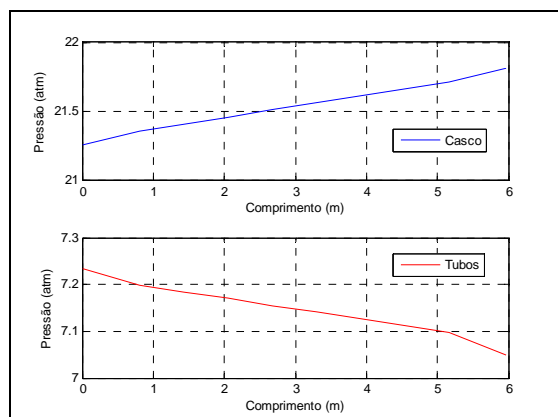


Figura 10 – Distribuição da pressão ao longo do comprimento do trocador de calor.

A Figura 11 mostra a variação da densidade e viscosidade ao longo do trocador de calor.

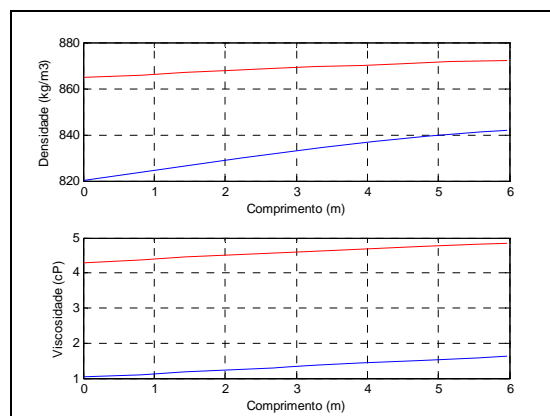


Figura 11 – Variação da densidade e viscosidade.

Os resultados das simulações foram comparados com os dados de planta e de simulações feitas no *software* Xist, um programa do *Heat Transfer Research Institute* (HTRI) para a simulação de modelos rigorosos de trocadores calor. A Tabela 2 mostra um resumo das comparações, indicando que o modelo proposto é capaz de reproduzir satisfatoriamente os resultados de modelos consolidados da literatura.

## 5. CONCLUSÃO

As simulações realizadas com dados de planta forneceram resultados com previsões satisfatórias para as correntes de saída. A modelagem de forma estruturada permite ao usuário acrescentar novas correlações e metodologias de cálculos ou desenvolver novos modelos de trocadores de calor. Futuras implementações nos modelos incluem a mudança de fases e novos tipos de trocadores de calor casco e tubos.

## 6. REFERÊNCIAS

- GNIELINSKI, V., *Int. Chem.*, 16, 359, 1976.  
 INCROPERA, F. P. & DEWITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. LTC, Rio de Janeiro (1988).

Tabela 2 – Resumo da simulação e comparações.

	Descrição	EMSO		XIST	
		Entrada	Saída	Entrada	Saída
Casco	Temperatura (K)	363.35	374.68	363.35	374.69
	Pressão (atm)	21.8136	21.2564	21.8136	21.4685
	Perda de Carga Total (atm)	0.32914		0.34503	
	Coeficiente de Filme (W/m <sup>2</sup> K)	713.95		1133.19	
	Fração de Vapor	0	0	0	0
	Prandtl	84.26		78.01	
	Reynolds	3180		4202	
	Correção da Viscosidade	1.026		1.025	
	Velocidade nos Bocais (m/s)	1.18	1.19	1.18	1.19
	Perda de Carga nos Bocais (atm)	0.04951	0.04769	0.02813	0.02724

	Descrição	EMSO		XIST	
		Entrada	Saída	Entrada	Saída
Tubos	Temperatura (K)	419.25	389.47	419,25	387.25
	Pressão (atm)	7.23474	7.10588	7.23474	7.10072
	Perda de Carga Total (atm)	0.12886		0.13402	
	Coeficiente de Filme (W/m <sup>2</sup> K)	649.861		614.22	
	Fração de Vapor	0	0	0	0
	Prandtl	27.14		28.30	
	Reynolds	7053		6751	
	Correção da Viscosidade	0.965		0.973	
	Velocidade nos Bocais (m/s)	2.65	2.58	2.65	2.58
	Perda de Carga nos Bocais (atm)	0.019859	0.030453	0.01934	0.03119
Taxa de Calor Total (MW)	2.694		2.886		
Coef. Global de Transf. De Calor (W/m <sup>2</sup> K)	292.513		330.66		

KAKAC, S., BERGLES, A. E., MAYINGER, F., *Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design*, Hemisphere Publishing, New York (1981).

K.J. BELL, Final Report of the Cooperative Research Program on shell-and-tube heat exchangers, *University of Delaware Eng. Exp. Sta. Bulletin 5*, 1963.

PALEN, J. W., TABOREK, J., Solution of shell side flow pressure drop and heat transfer by stream analysis method, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 65 (92):53-63*, 1969.

SAUNDERS, E. A. D., *Heat Exchangers: Selection Design and Construction*. John Wiley & Sons, New York, 1988.

SIEDER, E. N., TATE, G. E., Heat Transfer and pressure drop of liquids in tubes. *Ind. Eng. Chem.*, 28(12):1429-35, 1936.

SOARES, R. P.; SECCHI, A. R. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimization. In *ESCAPE 13th [S.I.]*: Elsevier Science Publishers, 2003. v. 1, p. 947-952.

TEMA, Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, 7th Ed., N.Y., 1988.

T. TINKER, Shell side characteristics of shell and tube heat exchangers: a simplified rating system for commercial heat exchangers, *J. Heat Transfer* 80 (1958) 36-52.