



MODELAGEM DE TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS

Gerson Balbuena Bicca¹, Argimiro Resende Secchi¹, Keiko Wada¹

¹Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,
E-MAIL: {bicca, arge, keiko}@enq.ufrgs.br

Palavras Chaves: Trocadores de calor, simulação de processos, TEMA, EMSO.

Resumo: Trocadores de calor são equipamentos largamente empregados nas indústrias em geral. Dentre as muitas formas desse equipamento, um tipo bastante comum pela sua ampla utilização são os trocadores do tipo casco e tubos. Apesar da grande aplicabilidade do trocador de calor casco e tubos, o seu projeto não apresenta, conforme os fluidos, as condições e o método empregado, a precisão desejada. Visando a análise e a simulação de equipamentos de troca térmica no simulador EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization), este trabalho tem por objetivos o desenvolvimento de procedimentos de cálculo para os parâmetros de avaliação de trocadores de calor tipo casco e tubos com precisão adequada, sem excessivo tempo de processamento e dificuldade de execução, facilitando a otimização de projetos. Os modelos criados serão incorporados à biblioteca de modelos do simulador EMSO e atenderá os trocadores do tipo E Shell, F Shell e trocadores casco e tubos multipasses conforme a designação das normas TEMA para esses equipamentos. O método de avaliação para o lado do casco é o método de Bell-Delaware amplamente descrito na literatura sobre o assunto. Para o lado dos tubos a transferência de calor e a perda de carga serão estimadas a partir das correlações existentes. Os procedimentos de cálculo proporcionarão também a discretização do trocador para uma melhor acurácia na avaliação dos coeficientes de troca térmica e na variação das propriedades físicas dos fluidos dentro do trocador.

1 INTRODUÇÃO

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

Dentre as muitas formas desse equipamento, um tipo bastante comum pela sua ampla utilização são os trocadores do tipo casco e tubos. Apesar da grande aplicabilidade do trocador de calor casco e tubos, o seu projeto não apresenta, conforme os fluidos, as condições e o método empregado, a precisão desejada.

Visando a análise e a simulação de equipamentos de troca térmica no simulador EMSO (Soares e Secchi, 2003), este trabalho tem por objetivos o desenvolvimento de procedimentos de cálculo para os parâmetros de avaliação de trocadores de calor tipo casco e tubos com precisão adequada, sem excessivo tempo de processamento e dificuldade de execução, facilitando a otimização de projetos. Os modelos criados serão incorporados à biblioteca de modelos do simulador EMSO e atenderá os trocadores do tipo E Shell, F Shell e trocadores casco e tubos multipasses conforme a designação das normas TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) para esses equipamentos.



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma extensa e detalhada revisão bibliográfica foi realizada para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente estudou-se os conceitos básicos sobre os trocadores de calor casco e tubos, os detalhes mecânicos e construtivos, os métodos de cálculos para a transferência de calor e a perda de carga tanto para o lado do casco como para o lado dos tubos. Nesta seção será apresentada uma revisão sucinta desse estudo como segue:

2.1 Transferência de calor em tubos: fase simples

Uma correlação em particular a ser usada para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor dentro de tubos depende do regime de escoamento do fluido dentro do tubo, o qual pode ser laminar, turbulento ou de transição. O regime de escoamento no interior de tubos pode ser caracterizado através do número de Reynolds, o qual pode ser expresso por:

$$Re_D = \frac{V_t \cdot D_i \cdot \rho_t}{\mu} \quad (1)$$

Onde V_t é a velocidade média do fluido no interior do tubo, D_i o diâmetro interno do tubo, ρ_t e μ são respectivamente a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido escoando no interior do tubo.

Para valores de Re_D menores que 2300 o escoamento é dito laminar, a velocidade do fluido no interior do tubo é baixa, não há movimento turbilhonar e conseqüentemente não há mistura entre as partículas fluidas mais quentes e mais frias sendo a troca de calor somente por condução.

Para Re_D entre 2300 e 10000, o coeficiente de transferência de calor está entre os valores do regime laminar e turbulento e não pode ser calculado com precisão. Este regime é denominado regime de transição e é caracterizado por um aumento na velocidade do escoamento, uma maior turbulência das partículas fluidas, e, portanto um aumento nos coeficientes de transferência de calor.

Para valores de Re_D maior que 10000 o fluido encontra-se em regime turbulento no interior do tubo, exceto em uma fina subcamada próxima à parede do tubo em que os turbilhões são

amortecidos em conseqüência das forças viscosas que predominam próximas à superfície. Nesta subcamada viscosa o calor é transmitido por condução e devido à grande queda de temperatura que nela ocorre, atua como controladora da taxa de calor. A partir da subcamada, o calor é transportado e misturado ao seio do fluido rapidamente devido à grande turbulência da massa fluida.

O número de Prandtl é um parâmetro adimensional muito importante na transferência de calor que relaciona as espessuras relativas das camadas limite hidrodinâmica e térmica. É relacionado por:

$$Pr = \frac{c_{p_t} \cdot \mu_t}{k_t} \quad (2)$$

Onde c_{p_t} é a capacidade calorífica do fluido e k_t a sua condutividade térmica. O número de Prandtl é uma função somente das propriedades físicas do fluido e caracteriza a distribuição de velocidade com a distribuição de temperaturas.

O projeto e a análise de qualquer trocador de calor exige o conhecimento do coeficiente de transferência de calor entre a parede do conduto e o fluido que escoar no seu interior. Este coeficiente está relacionado com o número de Nusselt através da expressão:

$$Nu_D = \frac{h_t \cdot D_i}{k_t} \quad (3)$$

Onde h_t é o coeficiente médio de transferência de calor convectivo para o fluido no lado dos tubos.

Para escoamento turbulento plenamente desenvolvido em tubos lisos, a mais recomendada equação é a de Petukhov e Popov (Incropera e Dewitt, 1988), que apresenta uma expressão para o número de Nusselt dada por:

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot Re_D \cdot Pr}{1,07 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

Onde f é o coeficiente de atrito obtido através do diagrama de Moody ou da seguinte expressão de Filonenko:



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

10 anos

$$f = (0,790 \cdot \ln Re_D - 1,64)^{-2} \quad (5)$$

A equação (4) é válida para $10^4 < Re_D < 5 \cdot 10^6$.

Gnielinski (1976) demonstrou mais tarde que o range de validade poderia ser estendido para números de Reynolds menores e propôs uma expressão na forma:

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_D - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (6)$$

Válida para $3000 < Re_D < 5 \cdot 10^6$.

A equação (6) pode ser utilizada dentro do intervalo para a região de transição.

Kays (1955) apresenta uma relação empírica atribuída a Hausen (1943), para o escoamento laminar em tubos, sendo este um valor médio o que implica em um coeficiente de transferência de calor médio ao longo de todo o comprimento do tubo para a condição de temperatura de superfície constante:

$$Nu_D = 3,665 + \frac{0,19 \cdot \left(\left(\frac{D_i}{L}\right) \cdot Re_D \cdot Pr\right)^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot \left(\left(\frac{D_i}{L}\right) \cdot Re_D \cdot Pr\right)^{0,467}} \quad (7)$$

Onde L é o comprimento do tubo.

2.2 Perda de carga em tubos: fase simples

A queda de pressão do fluido percorrendo vários passes nos tubos pode ser calculada por:

$$\Delta P_{total} = \left(4 \cdot f \cdot \frac{L \cdot N_{pt}}{D_i} + 4 \cdot N_{pt}\right) \cdot \frac{\mathbf{r}_t \cdot V_t^2}{2} \quad (8)$$

Onde N_{pt} é o número de passes, f é o coeficiente de atrito dado pela equação (5) para o escoamento turbulento e transição. Para o escoamento laminar temos que o coeficiente de atrito é:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

O segundo termo na equação (8) é uma perda de carga adicional devido ao retorno, que conforme Kern (1950) vale quatro pressões cinéticas por passe, ou seja:

$$\Delta P_{retorno} = 4 \cdot N_{pt} \cdot \frac{\mathbf{r}_t \cdot V_t^2}{2} \quad (10)$$

2.3 Transferência de calor para o lado do casco: fase simples

Em contraste com a transferência de calor em fase simples no interior de tubos, o escoamento de fluidos no lado do casco do trocador de calor é particularmente muito complexo devido aos inúmeros fatores geométricos que estão envolvidos e os vários caminhos que essas correntes possam tomar no interior do casco (Tinker, 1951). Os primeiros estudos que surgiram para a análise térmica e a perda de carga para o lado do casco não obtiveram muito êxito. Foram baseados no fluxo sobre um feixe ideal de tubos, porém sem o uso de defletores e o regime de escoamento foi considerado quase que somente em regime turbulento.

Kern (1950) formulou um método simples para o cálculo do coeficiente de transferência de calor e perda de carga para o lado do casco, surgiam os métodos integrais de cálculo. Esses métodos permitiram a análise do fluxo sobre defletores colocados ao longo do trocador de calor, porém não consideravam os efeitos de correntes de bypass e vazamentos que se formavam nas folgas existentes no equipamento.

O método de Kern é restrito a defletores que possuam um percentual de corte na janela de 25% e não é aplicável no escoamento laminar, contudo, o método permite uma rápida estimativa da queda de pressão e do coeficiente de transferência de calor.

O conceito de considerar várias correntes através do trocador foi originalmente proposto por Tinker



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

(1958). Ele sugeriu a divisão do fluxo global em correntes individuais, denominadas:

1. Corrente de fluxo cruzado puro (B): corrente de fluxo cruzado efetiva, a qual pode ser relacionada ao fluxo ideal sobre o feixe de tubos. Esta corrente age forçando parte do fluxo através de folgas de 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 à 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.

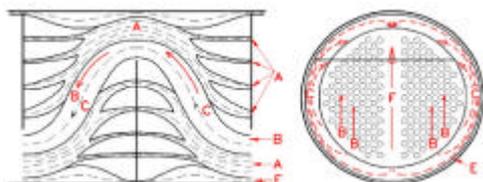


Figura 1: Correntes de Fluxos em trocadores casco e tubos de acordo com Tinker (1951).

O método proposto por Tinker é dito ser um método analítico, pois se resumia na solução de equações referentes à perda de carga e transferência de calor dessas correntes de fluxo. Contudo, devido às dificuldades encontradas em obter dados para as correntes individuais bem como a falta de recursos computacionais que eram necessários à solução iterativa exigida levaram a simplificações na análise. A análise original proveniente dos trabalhos de Tinker foi completamente complexa e difícil de entender, mas foi a base para o método de análise das correntes.

De 1947 até 1963 o Departamento de Engenharia Química da universidade de Delaware realizou extensivas pesquisas sobre o fluxo de fluido no lado do casco e a transferência de calor em trocadores de casco e tubos, levando em consideração os estudos de Tinker de distribuição de correntes. Em 1947, o projeto iniciou com o patrocínio da ASME (American Society of Mechanical Engineers), a qual usou fundos provenientes do TEMA e de outras empresas do ramo de processos petroquímicos. Os principais investigadores foram os professores Olaf Bergelin e Allan Colburn da universidade de Delaware. A tabela 1 mostra uma ordem cronológica durante aquele período do projeto que foi denominado Projeto Delaware.

Tabela 1: Histórico Desenvolvimento do Projeto Delaware.

1947	Início do projeto com fundos da ASME.
1947-1959	Programa Experimental.
1950	Primeiro Boletim (Boletim nº 2).
1958	Segundo Relatório (Boletim nº 4).
1960	Método de Design Publicado.
1963	Relatório Final (Boletim nº 5).

Bell (1963) formulou um método a partir dos estudos da universidade de Delaware, porém, buscando não usar um processo iterativo, o qual não é conveniente para o cálculo manual, recorreu a simplificações resultando um método dito semi-analítico que mesmo respeitando os efeitos das correntes individuais de fluxo, vazamento e bypass, não faz uma interação rigorosa entre elas. Porém, o método de Bell-Delaware ainda é considerado o mais adequado dos métodos analíticos para os cálculos de trocadores casco e tubos para o lado do casco, pois se encontra ampla e claramente descrito na bibliografia e apresenta resultados dentro de uma faixa razoável de precisão (Wolverine Company, 1984).

O método se baseia 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 aos vazamentos e bypass através de folgas.

Cada uma das correntes mostradas na figura 1 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



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

para o cálculo do coeficiente de transferência de calor médio para o casco é dada por:

$$h_c = h_{ideal} \cdot J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s \quad (11)$$

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 ou saída.

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

2.4 Perda de carga para o lado do casco: fase simples

A perda de carga para o lado do casco é composta pela soma dos seguintes componentes:

ΔP_c - Perda de carga no fluxo cruzado puro. Esta perda de carga ocorre entre as extremidades do defletor.

ΔP_w - Perda de carga nas janelas dos defletores.

ΔP_e - Perda de carga nos bocais de entrada e saída do trocador.

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

$$\Delta P_{casco} = \Delta P_c + \Delta P_w + \Delta P_e \quad (12)$$

3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Conforme descrito anteriormente na introdução deste artigo, um dos objetivos principais desse trabalho é o desenvolvimento de modelos de

trocadores de calor casco e tubos a serem incorporados na biblioteca de modelos do simulador EMSO.

EMSO é a sigla utilizada para identificar o sistema Environment for Modeling, Simulation and Optimization (Ambiente para Modelagem, Simulação e Otimização). Trata-se de um ambiente onde o usuário pode modelar e simular processos dinâmicos e estacionários através da seleção e conexão de blocos descritos através de uma linguagem de programação própria. Os recursos da linguagem de programação orientada a objetos utilizada pelo simulador permite a criação de modelos de equipamentos através da composição de seus submodelos.

A figura 2 demonstra a hierarquia usada na modelagem matemática de trocadores de calor casco e tubos e os métodos de cálculo a partir de submodelos:

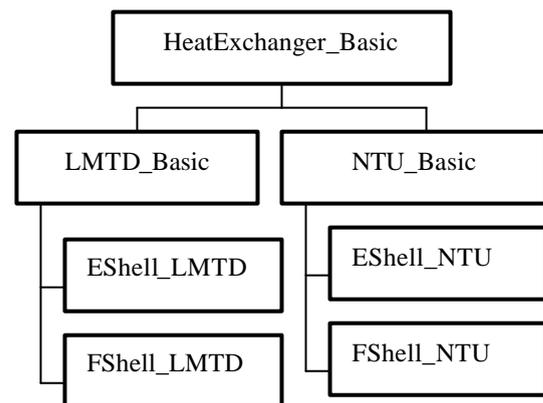


Figura 2: Hierarquia de classes em trocadores de calor casco e tubos.

HeatExchanger_Basic é um submodelo desenvolvido através da linguagem de modelagem do EMSO e incorporada na biblioteca de modelos do simulador denominada EML (*EMSO Model Library*). Esse submodelo descreve as equações básicas para os trocadores de calor, tais como balanços de massa e energia e cálculos das propriedades termodinâmicas e de transporte das correntes do processo.

Os submodelos *LMTD_Basic* e *NTU_Basic* descrevem 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



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

diferença de temperaturas média logarítmica (LMTD), enquanto que o segundo faz uso das relações de efetividade e do número de unidades de transferência do trocador de calor – relações efetividade – NTU.

Através da composição dos submodelos, foram criados dois modelos de equipamentos que permitem a simulação de dois tipos de trocadores de calor casco e tubos comumente usados na indústria e designados pelas normas TEMA 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.

A figura 3 mostra um modelo esquemático para os modelos e as suas conexões de entrada e saída das correntes ao equipamento:

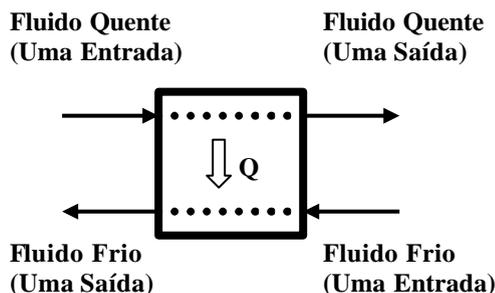


Figura 3: Modelo esquemático para trocadores de calor casco e tubos.

Os modelos descrevem a troca de calor entre uma corrente quente e uma corrente fria, ambas correntes podem ser vapor ou líquido. As seguintes restrições são impostas ao equipamento:

1. Não há mudança de fase no trocador de calor.
2. Regime estacionário.
3. O cálculo da transferência de calor se baseia na Média logarítmica das temperaturas (LMTD) ou através das relações de efetividade – NUT (Número de unidades de transferência).
4. A transferência de calor e a perda de carga para o lado dos tubos seguem as

correlações apresentadas na seção 2.1 e 2.2.

5. Para o lado do casco o método de Bell-Delaware é empregado.

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 ou especificada. Os modelos propostos determinam a taxa de transferência de calor, os coeficientes de transferência convectivos, o coeficiente global de transferência de calor e as temperaturas de saída dos fluidos para um trocador de calor existente.

4 RESULTADOS PARCIAIS

Para a validação dos modelos, diversas simulações foram realizadas com hipotéticos trocadores de calor e seus resultados comparados com outros simuladores tais como o aplicativo ASPEN PLUS (<http://www.aspentech.com/>). Os resultados encontrados foram satisfatórios não apresentando diferenças significativas, porém para uma validação completa desses modelos estão sendo validados diversos trocadores de calor reais e os resultados das simulações estarão disponíveis quando da realização do oktoberforum 2005.

5 CONCLUSÃO

Os modelos apresentados não atendem por completo as exigências requeridas para uma completa avaliação de trocadores de calor do tipo cascos e tubos, entre essas exigências citam-se:

- A possibilidade de predição e análise de vibração nos tubos relacionada com o fluxo dos fluidos e a geometria do trocador de calor;
- Os modelos são restritos a trocadores do tipo *E Shell* e *F Shell* com defletores de segmento e sem mudança de fase;
- As propriedades físicas dos fluidos são avaliadas a uma temperatura média, isto é, a média entre as temperaturas de entrada e saída do equipamento. Se o fluido for muito viscoso ou se as diferenças de



Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

temperatura no escoamento forem muito grandes, pode haver uma variação significativa nas propriedades do fluido ao longo do trocador de calor e consequentemente uma simples avaliação dessas propriedades a uma temperatura média conduzirá a erros bem significativos.

Contudo, uma primeira etapa para o desenvolvimento de uma biblioteca de modelos de trocadores de calor foi desenvolvida, melhorias estão sendo realizadas e as exigências acima descritas estão sendo incorporadas aos modelos. O método de Bell pode ser estendido com poucas modificações a outros tipos de configurações de trocadores de calor casco e tubos, e para uma melhor acurácia nos resultados, novos modelos estão sendo criados os quais possibilitarão a discretização do trocador de calor para que se possa melhor acompanhar o desenvolvimento da camada limite.

REFERÊNCIAS

JOHN H. LIENHARD. A Heat Transfer Textbook. Third Edition, 2004.

INCROPERA, F. P. & DEWITT, D. P., 1998. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. LTC - Livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro.

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

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.

Y. TIAN. A conceptual description of heat exchanger for programming. Applied Thermal

Engineering 24 (2004) 1171-1178.

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

SCHLUNDER, E.V., Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Corp., New York (1983).

D.Q. KERN. Process Heat Transfer, McGraw-Hill. New York, 1950.

Y. ALI KARA, O. GURARAS. A computer program for designing of shell-and-tube heat exchangers. Applied Thermal Engineering 24 (2004) 1797-1805.

R.H. PERRY, Chemical Engineers Handbook. McGraw Hill, 5th ed., 1973.

R.B. BIRD, W.E. STEWART, E.N. LIGHTFOOT. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, New York, 1960.

TUBULAR EXCHANGER
MANUFACTURERS ASSOCIATION,
Standards, 7th Ed., New York, 1988.

GNIELINSKI, V., Int. Chem., 16, 359, 1976.

T. TINKER, Shell side characteristics of shell and tube heat exchangers, parts I, II and III, general discussion of heat transfer, in: Proc. Inst. Mech. Eng., London, 1951.

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



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Seminário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Oktober Fórum 2005 – PPGEQ

10 anos



Sta. Bulletin 5, 1963.

WOLVERINE COMPANY, Engineering Data
Book II, 1984.

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.