



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SIMULAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR COM MUDANÇA DE FASE

Juliana P. Silva¹, André L. H. Costa¹, Márcio L. L. Paredes¹, Eduardo M. Queiroz²

¹ Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, CEP 20550-900, e-mail: andrehc@uerj.br

² Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco E, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, CEP 21949-900, e-mail: mach@eq.ufrj.br

Resumo – Trocadores de calor são equipamentos largamente empregados em plantas de refino de petróleo, promovendo a modificação de temperatura e/ou estado físico de correntes de processo. As equações de projeto tradicionais desses equipamentos foram desenvolvidas com base em um conjunto de hipóteses clássicas (e.g. Método da Média Log). Contudo, a análise de diversos processos demanda uma abordagem mais sofisticada, como, por exemplo, trocadores com mudança de fase. Como estas tarefas são realizadas normalmente em caros softwares comerciais, o presente trabalho apresenta uma proposta de algoritmo capaz de realizar alternativamente o cálculo destes equipamentos. O algoritmo apresentado descreve o comportamento de trocadores casco-e-tubos com correntes escoando através dos tubos com mudança de fase, i.e., condensadores e vaporizadores. Os resultados da simulação apresentam os parâmetros básicos da performance do equipamento, como carga térmica, temperaturas de saída, etc., assim como perfis das variáveis de estado ao longo dos trocadores.

Palavras-Chave: trocadores de calor; mudança de fase; simulação.

Abstract – Heat exchangers are widely employed equipments in refining plants, responsible for the modification of the temperature and/or physical state of process streams. The traditional design equations of heat exchangers were developed based on a set of classical hypothesis (e.g. LMTD). However, the analysis of many thermal services demands a more sophisticated approach, as, for example, phase change operations. Considering that these tasks are usually restricted to expensive commercial engineering software, this paper presents a proposal of algorithm capable to alternatively the equipment evaluation. The algorithm presented can describe the behavior of shell-and-tube heat exchangers considering streams that flow along the tubes suffering phase change, i.e., condensers and vaporizers. Simulation results display the basic parameters of the equipment performance (heat load, outlet temperatures, etc) together with profiles of the state variables along the exchangers.

Keywords: heat exchangers; phase change; simulation.

1. Introdução

Trocadores de calor são equipamentos que promovem modificações de temperatura e/ou estado físico de correntes materiais, através da transferência de calor entre correntes com diferentes temperaturas (correntes quentes e frias). Há vários tipos diferentes de trocadores em relação a sua construção mecânica (bitubulares, casco-e-tubos, placas, espiral, etc.). Em uma planta de refino de petróleo típica, pode ser encontrado um grande número destes equipamentos, desta forma, ferramentas computacionais que possibilitem o acompanhamento do seu desempenho podem ser bastante úteis neste campo.

As equações tradicionais de projeto de trocadores de calor estão baseadas em um conjunto de hipóteses clássicas, como coeficiente global de transferência de calor e propriedades termofísicas constantes ao longo da área de transferência. Estas considerações permitem soluções analíticas, funções da configuração do escoamento, do balanço de energia e da equação de projeto ao longo da área de transferência de calor, representadas pelas relações conhecidas do Método MLDT ou do Método da Efetividade (Incropera e DeWitt, 2002). Entretanto, há processos térmicos que não são apropriadamente descritos por estas equações convencionais. Por exemplo, na condensação e na vaporização, podem ocorrer variações significativas do coeficiente de transferência de calor com mudança de fase e, caso a resistência térmica correspondente seja relevante, a hipótese de coeficiente global constante fica prejudicada, podendo comprometer a acurácia dos resultados obtidos. Há vários softwares comerciais para a simulação de trocadores de calor (B-JAC, HTRI, HTFS, etc.), que utilizam modelos rigorosos, contudo esses programas estão vinculados a licenças caras e, freqüentemente, as correlações empregadas não são abertas.

O presente trabalho apresenta o modelo matemático e a simulação numérica de trocadores casco-e-tubos com mudança de fase. As equações do balanço de energia são resolvidas sequencialmente ao longo do comprimento do equipamento e o coeficiente de transferência de calor no lado do tubo é avaliado a cada passo.

2. Equacionamento

A modelagem de trocadores de calor é composta por dois balanços de energia, aplicados aos fluidos quente e frio, complementados por uma equação para cálculo da taxa de transferência de calor.

Um balanço diferencial de energia aplicado a um fluido em escoamento pode ser representado por (Incropera e DeWitt, 2002):

$$dH + m(vdv + g dz) = dQ - dW_e \quad (1)$$

onde H é a taxa de transporte de entalpia, m é a vazão mássica de fluido, v é a velocidade média do escoamento, z é a cota, Q é a taxa de transferência de calor e W_e é o termo relativo ao trabalho mecânico. Considerando especificamente o escoamento ao longo de um trocador de calor, onde não há trabalho mecânico e as variações das energias cinética e potencial não são significativas quando comparadas à mudança de entalpia, o balanço por ser simplificado para:

$$dH = dQ \quad (2)$$

A Equação 2 pode ser escrita nas seguintes formas particulares, respectivamente, para fluidos sem mudança de fase e para fluidos puros bifásicos (casos tratados no presente trabalho):

$$mC_p dT = dQ \quad (3)$$

$$m\lambda dx_G = dQ \quad (4)$$

onde m é a vazão mássica, C_p é a capacidade calorífica, λ é o calor latente e x_G é a fração vaporizada.

O balanço de energia representado pela Equação 2 deve ser aplicado aos dois fluidos. Organizando estes balanços de acordo com uma taxa de transferência de calor com sinal positivo, tem-se (os equipamentos térmicos enfocados neste trabalho possuem um passo nos tubos e no casco):

$$dH_H = a dQ \quad (5)$$

$$dH_C = b dQ \quad (6)$$

onde $a = -1$ e $b = 1$, para a configuração paralela, e $a = 1$ e $b = 1$, para a configuração contracorrente, tendo como referência a trajetória do fluido frio.

A parcela relacionada à taxa de transferência de calor pode ser calculada por (condução axial desprezada):

$$dQ = U dA (T_H - T_C) \quad (7)$$

onde T_H e T_C são as temperaturas dos fluidos quente e frio, e o coeficiente global de transferência de calor, U , pode ser calculado pela expressão (considerando trocador tubular e baseado na área externa da superfície de troca térmica, A):

$$U = \frac{1}{\left(\frac{D_e}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_t}\right) + \left(\frac{D_e}{D_i}\right)Rd_t + \frac{D_e \ln(D_e / D_i)}{2k_w} + Rd_s + \frac{1}{h_s}} \quad (8)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, Rd é a resistência térmica unitária de depósito, D_i e D_e são os diâmetros interno e externo dos tubos e os subscritos t e s indicam os lados do tubo (interno) e do casco (externo), respectivamente.

O método de solução proposto envolve a discretização do sistema de equações – Equações 5 a 7 – ao longo da área de transferência de calor, para $k = 1, \dots, N$:

$$H_{H,k+1} - H_{H,k} = adQ_k \quad (9)$$

$$H_{C,k+1} - H_{C,k} = bdQ_k \quad (10)$$

$$Q_k = U \Delta A \frac{(T_{H,k+1} - T_{C,k+1}) + (T_{H,k} - T_{C,k})}{2} \quad (11)$$

Com as entalpias de entrada dos fluidos frio e quente representadas por $H_{C,I}$ e $H_{H,I}$; e as entalpias na saída representadas por $H_{C,O}$ e $H_{H,O}$, as condições de contorno são:

$$x = 0 \Rightarrow H_{C,1} = H_{C,I} \quad \text{e} \quad H_{H,1} = H_{H,I} \quad \text{para configuração em paralelo} \quad (12)$$

$$x = 0 \Rightarrow H_{C,1} = H_{C,I} \quad \text{e} \quad H_{H,1} = H_{H,O} \quad \text{para configuração contracorrente} \quad (13)$$

A solução de cada sistema de equações algébricas relacionadas a um elemento de volume é obtida pelo método Newton-Raphson. Os valores calculados das variáveis em cada volume correspondem às condições de contorno locais para o próximo volume ao longo da trajetória de integração.

Na configuração de escoamento em contracorrente, na Equação 13, o valor de $H_{H,O}$ é desconhecido. Neste caso, foi construído um ciclo externo também baseado no método Newton-Raphson, com objetivo de determinar o valor de $H_{H,O}$ associado ao valor conhecido de $H_{H,I}$.

2.1. Transferência de Calor

O coeficiente de transferência convectiva de calor no escoamento ao longo do casco sem mudança de fase é calculado utilizando o método Bell-Delaware, descrito por Taborek (1986). Devido à complexidade e as informações restritas envolvidas na versão completa do Método das Correntes, o método de Bell-Delaware torna-se a melhor opção aberta para a descrição da transferência de calor no lado do casco em trocadores casco-e-tubos.

A abordagem adotada para descrever o coeficiente de transferência de calor no escoamento do fluido em vaporização no interior dos tubos é baseada no método de Chen, que pode ser visto em Smith (1986). De acordo com o método de Chen, o coeficiente de transferência de calor no escoamento no interior dos tubos é determinado pela contribuição (soma) de duas parcelas: uma devida à chamada ebulição convectiva, ligada à intensificação da convecção forçada pela mudança de fase; e outra devida à ebulição nucleada, associada à formação de bolhas de fluido vaporizado sobre a superfície interna dos tubos. O coeficiente para a ebulição convectiva é calculado pelo produto entre o coeficiente de convecção forçada no líquido e um fator de amplificação, função do parâmetro de Martinelli (X_{TT}). A ebulição nucleada ocorre quando o superaquecimento da superfície de troca térmica atinge um certo valor, função de cada líquido. O valor do coeficiente de transferência de calor correspondente pode ser calculado pela correlação de Chen. No entanto, esta correlação é função do fluxo térmico local, o que implica que a sua avaliação envolve um procedimento iterativo, resolvido pelo método Newton-Raphson, para determinar a temperatura da parede.

O escoamento de uma mistura líquido-vapor em condensação pode ocorrer seguindo vários padrões. A abordagem adotada simplifica esta descrição ligando os resultados a dois possíveis padrões de escoamento: escoamento estratificado e escoamento anular. A abordagem geral empregada está baseada na descrição apresentada em Butterworth (1986). A transferência de calor em escoamento anular é descrita através de correlações desenvolvidas para o escoamento vertical associado à uma intensa tensão cisalhante. O coeficiente de transferência de calor para o escoamento estratificado é avaliado com base em resultados obtidos da teoria de Nusselt sobre condensação em filmes. A identificação de qual padrão de escoamento predomina considera a razão entre forças cisalhantes e a força

gravitacional. De forma análoga aos cálculos envolvendo a vaporização, as correlações para a condensação necessitam do conhecimento da temperatura da parede, que deve ser avaliada através de um procedimento iterativo.

3. Resultados Numéricos

As rotinas de simulação de trocadores de calor desenvolvidas foram implementadas utilizando o software Scilab (software livre para computação científica muito similar ao Matlab). Dois exemplos são apresentados referentes a problemas com mudança de fase envolvendo hidrocarbonetos: um vaporizador de butano e um condensador de pentano. Dados das correntes estão apresentados na Tabela 1 e dados mecânicos dos trocadores estão descritos na Tabela 2. As folgas nos trocadores em ambos os exemplos são: chicana-tubo: 0,79 mm, casco-chicana: 3,18 mm e casco-matriz tubular: 9,52 mm.

Tabela 1. Dados das correntes.

		Vaporizador	Condensador
Lado do Tubo	Fluido	Butano líquido saturado	Pentano vapor saturado
	Vazão mássica (kg/h)	30000	7000
	Temperatura de entrada (°C)	50,2	124,2
	Pressão na entrada (bar)	5,0	10,0
	Resistência de depósito ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0,00001	0,00009
Lado do Casco	Fluido	Água quente	Água de resfriamento
	Vazão mássica (kg/h)	70000	125000
	Temperatura de entrada (°C)	80,0	32,0
	Pressão na entrada (bar)	5,0	2,0
	Resistência de depósito ($\text{m}^2\text{K/W}$)	0,00002	0,00034

Tabela 2. Dados mecânicos dos trocadores.

	Vaporizador	Condensador
Área (m^2)	30,4	23,9
Configuração	Contracorrente	Paralelo
Comprimento dos tubos (mm)	2440	3658
Diâmetro do casco (mm)	387	305
Nº de tubos por passo	208	109
Diâmetro interno dos tubos (mm)	15,75	15,75
Diâmetro externo dos tubos (mm)	19,05	19,05
Arranjo da matriz tubular (°)	30	30
Passe nos tubos (mm)	23,81	25,40
Espaçamento das chicanas (mm)	400	150
Corte das chicanas (%)	25	28

3.1. Vaporizador

A Figura 1 apresenta os perfis de temperatura relativos ao fluido quente, ao fluido frio e a temperatura da parede do tubo ao longo do equipamento. A temperatura de saída do fluido quente é 60,5 °C e o fluido frio permanece a uma temperatura de 50,2 °C com vaporização de 57,6 % da corrente. A carga térmica total do trocador é 1594 kW. A Figura 2 apresenta os perfis relativos a fração vaporizada e o coeficiente global de transferência de calor.

3.2. Condensador

A Figura 3 apresenta os perfis das temperaturas dos fluidos quente e frio ao longo do condensador. As temperaturas de saída são, respectivamente, 73,3 °C (líquido subresfriado) e 37,4 °C. A carga térmica total é 795 kW. A Figura 4 apresenta os perfis de fração vaporizada e fluxo térmico ao longo do trocador. A descontinuidade verificada neste último gráfico ocorre em função das diferenças entre os resultados gerados no escoamento bifásico próximo à condensação total e monofásico após a condensação total (este trecho poderia ser “suavizado” através da inserção de uma interpolação apropriada).

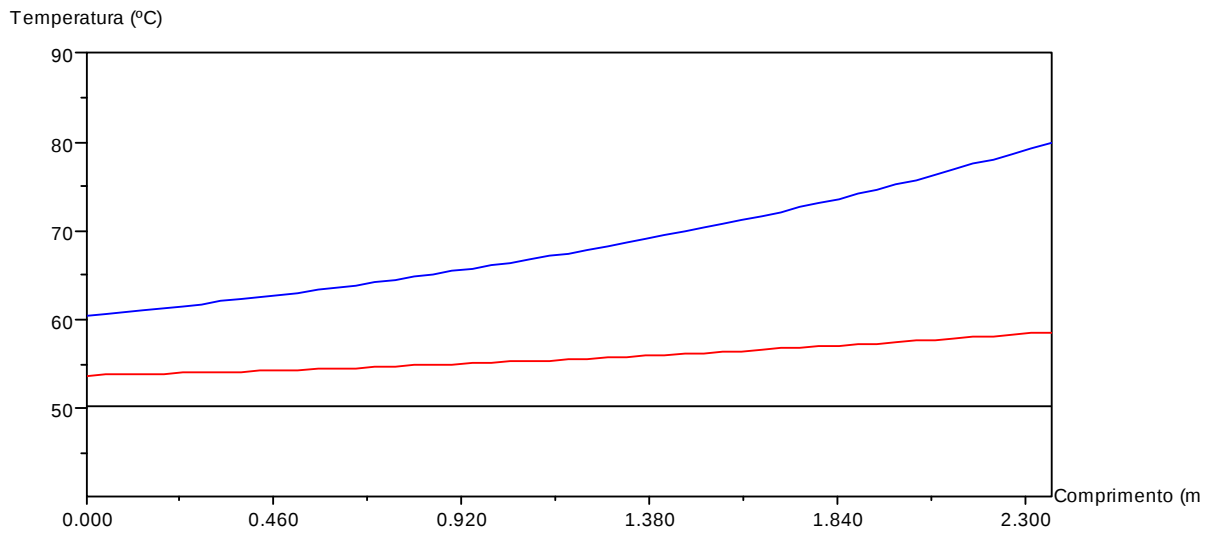


Figura 1. Vaporizador: Perfis de temperatura.

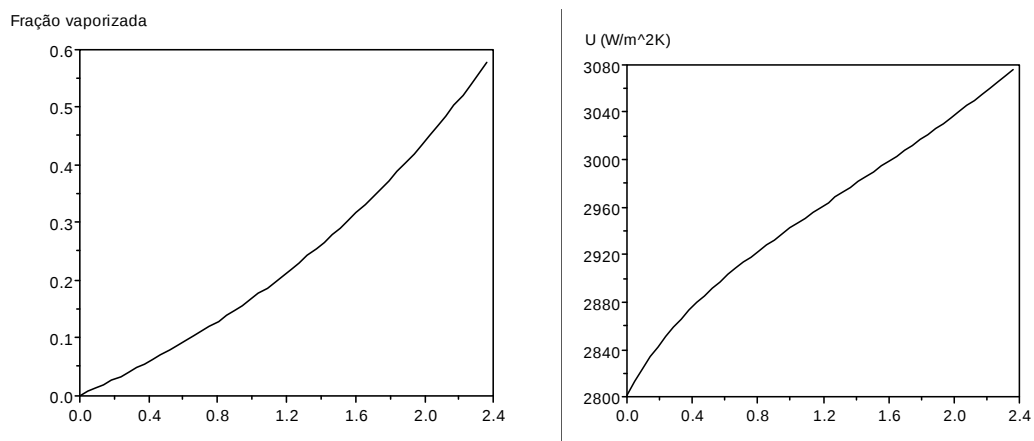


Figura 2. Vaporizador: Perfis de fração vaporizada e coeficiente global de transferência de calor.

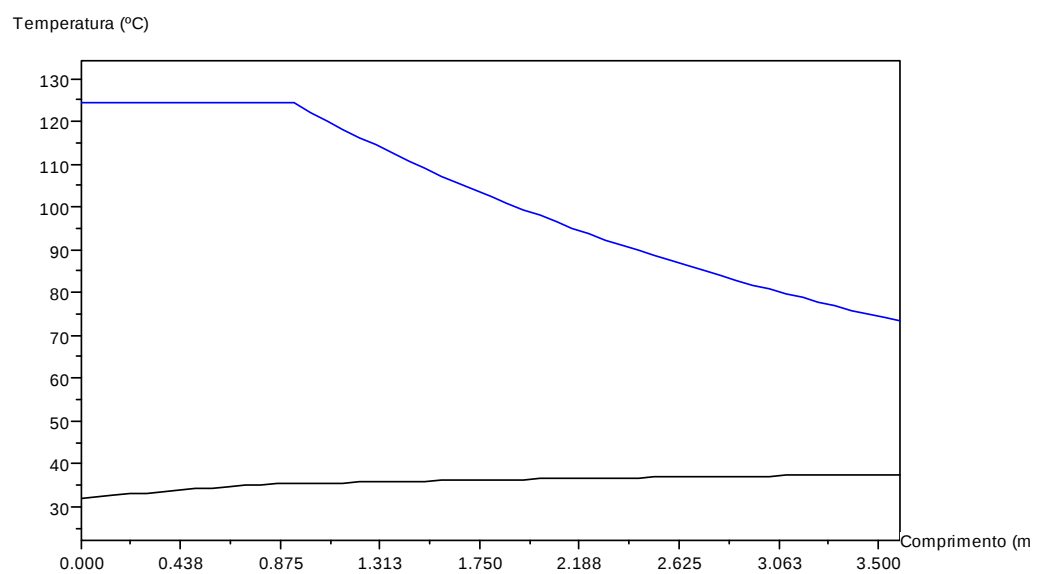


Figura 3. Condensador: Perfis de temperatura.

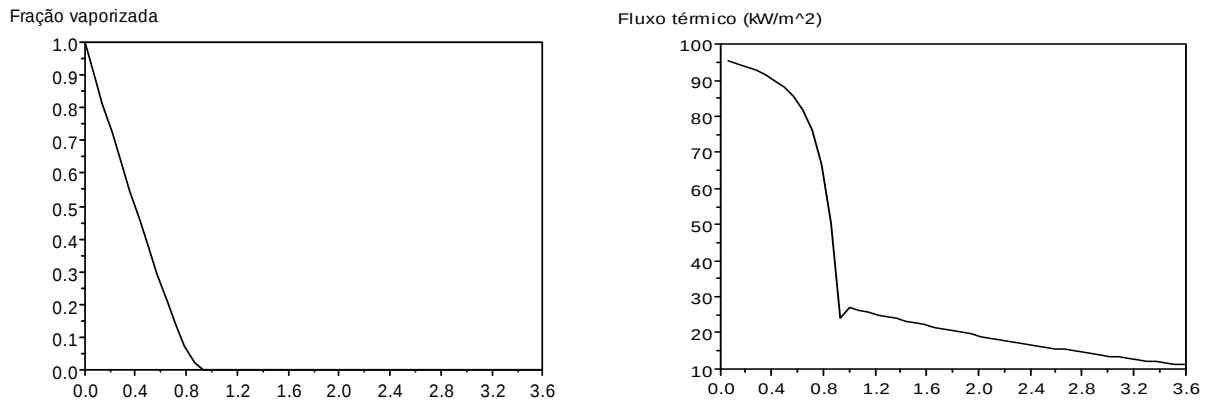


Figura 4. Condensador: Perfis de fração vaporizada e fluxo térmico.

4. Conclusões

Este trabalho apresenta um algoritmo de cálculo de trocadores de calor aplicado a equipamentos térmicos com mudança de fase. A rotina computacional resultante busca servir como alternativa para os softwares comerciais para tarefas envolvendo projeto, simulação, avaliação, otimização entre outras análises envolvendo vaporizadores e condensadores.

5. Agradecimentos

Márcio Paredes agradece à FAPERJ pelo apoio financeiro, e Eduardo Mach Queiroz à ANP e à FINEP, através do Programa PRH, bem como ao CNPq.

6. Referências

- BUTTERWORTH, D. Film condensation of pure vapor. In: *Heat Exchanger Design Handbook*, organized by E. U. Schlünder, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1986.
- INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5. ed. John Wiley and Sons, USA, 2002.
- SMITH, R. A. *Vaporisers: selection, design and operation*. Longman Scientific and Technical, UK, 1986.
- TABOREK, J. Shell-and-tube heat exchangers: single-phase flow. In: *Heat Exchanger Design Handbook*, organized by E. U. Schlünder, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1986.