

# APLICAÇÃO DE COLUNAS DE MÚLTIPLO-EFEITO NA ECONOMIA DE ENERGIA

Leonel Teixeira Pinto<sup>+</sup>

João A.F. da Rocha Pereira<sup>++</sup>

## INTRODUÇÃO

Análises dos perfis de consumo de energia em diversos países mostraram que a parcela consumida diretamente pelos equipamentos de destilação, principalmente nas indústrias químicas e petroquímicas, situa-se no intervalo de 25-40%. Isto pode representar uma participação de 3-6% no consumo total de energia de um país desenvolvido<sup>(7)(14)</sup>.

Este excessivo consumo de energia aliado a uma baixíssima eficiência termodinâmica transforma as colunas de destilação na primeira área de concentração dos esforços para economia de energia (Shinsky,1977).

Muitos estudos tem surgido, propondo técnicas alternativas, tais como a extração líquido-líquido e a cristalização, entre outras, além de métodos para melhor aproveitamento da energia na própria destilação, tais como a recuperação de vapor e a destilação com múltiplo-efeito.

Nestes trabalhos verifica-se que a técnica de destilação com múltiplo-efeito tem interessado muitos pesquisadores e indústrias, uma vez que requer pequeno investimento de capital e por ter mostrado, em todas as análises preliminares já levadas a efeito, ser uma possibilidade atrativa para economia de vapor<sup>(1)(19)(14)</sup>.

No entanto, ainda não existe na literatura um estudo detalhado

---

+ Universidade Federal de Santa Catarina, DEQ/CTC, CEP 88000,  
Florianópolis, SC

++ UNICAMP, DESQ/AEQ/FEC, CP 6122, CEP 13081, Campinas, SP

desta técnica no que se refere à sua faixa de aplicabilidade e à influência dos valores dos diversos parâmetros, tais como a pressão, a razão de refluxo e as condições térmicas e composição da alimentação. Além disto, o múltiplo-efeito permite uma grande variedade de arranjos, com ou sem integração material, o que dificulta em muito a seleção das melhores alternativas.

No presente trabalho realiza-se uma análise de diversos arranjos, levando em conta o investimento inicial, os problemas de controle e as possibilidades de economia de energia. O estudo é aplicado à destilação do sistema etanol-água sendo apresentadas comparações entre arranjos de múltiplo-efeito e a destilação convencional.

#### DESTILAÇÃO COM MULTIPLO-EFEITO

No funcionamento convencional de uma coluna de destilação fracionada, o vapor de topo deve ser condensado, de modo a poder formar o refluxo líquido que irá retornar ao seu interior. Este produto de topo transporta energia nobre, na forma de calor latente, que facilmente pode ser cedida. O problema reside apenas em que ele é rico no componente mais volátil e portanto está a uma temperatura inferior à base da coluna, onde se encontram líquidos pobres neste componente. Assim, este calor não pode ser aproveitado diretamente no refeedor.

A idéia do múltiplo-efeito é utilizar este potencial em outra coluna, mediante uma integração energética. Para isso, quando as colunas processam a mesma separação, a segunda deve funcionar à pressão inferior a da primeira. A integração é então realizada através de um trocador de duplo-efeito que funciona simultaneamente como refeedor (da coluna de menor pressão) e condensador (da de maior pressão). A partir daí, muitos arranjos podem ser imaginados, nos quais se varia a forma de alimentação, o número de colunas ou ainda, se efetua alguma forma de integração material.

Alguns exemplos desta diversidade de arranjos estão colocados nas figuras (1,2,3). Pode-se observar que o maior número de

propostas ficam por conta dos arranjos com integração material.

Na figura (1) tem-se um sistema de duplo-efeito simples que consiste unicamente na utilização de um trocador de duplo-efeito. Não há integração material. As duas colunas tem funções idênticas: ambas separam o mesmo alimento em produtos aproximadamente puros. As únicas diferenças são as suas pressões. Manipulando-se as pressões das duas colunas, pode-se conseguir que o vapor de topo da primeira tenha temperatura igual ou superior ao produto de fundo da segunda. Nesta situação é possível processar aproximadamente o dobro de um alimento, mantidas as suas condições térmicas (6).

Nas figuras (2,3), exemplifica-se algumas das inúmeras possibilidades na utilização do duplo-efeito quando se promove, também, algum transporte de material entre as colunas.

Na primeira delas, observa-se 3 casos em que a coluna inferior recebe a totalidade da alimentação. Na figura (2.a) o produto de cabeça da primeira coluna é apenas parcialmente enriquecido no componente mais volátil. A segunda coluna é então alimentada com este destilado, separando-o em dois produtos relativamente puros. Neste caso, fica mais difícil processar o dobro de alimento por unidade de calor fornecido. Othmer (1936) sugeriu uma configuração similar com o objetivo de reduzir a razão de refluxo  $R$ , da segunda coluna, de  $R=9$  para  $R=2$ . Apesar de não haver diminuição no calor do refeedor, resulta uma redução significativa na necessidade de refrigeração no condensador. Na figura (2.b) a situação é modificada, passando a seção de esgotamento da primeira coluna a produzir um destilado que ainda contém parte expressiva do componente mais volátil. É idêntica, agora, a função da segunda coluna, separar este produto em dois outros relativamente puros. Finalmente, a literatura cita outra possibilidade mostrada na figura (2c) na qual se unem as duas anteriores (King, 1971; O'Brien, 1976). Neste caso o intervalo de temperatura da primeira coluna é muito pequeno e em consequência é também pequeno o grau de degradação da energia calorífica. Isto diminui a irreversibilidade do processo. Fora isto, disposições deste tipo foram sugeridas por Weiß (1980), como parte de arranjos de colunas

para separação de múltiplos componentes.

Na figura (3) ve-se uma situação em que ocorre alimentação em paralelo na primeira coluna. Nestes sistemas, há necessidade de um gasto de energia adicional para comprimir o produto de fundo da segunda coluna antes de alimentar a primeira. Segundo O'Brien (1976) existe uma planta operando na Du Pont Co. para separar xileno de outros compostos orgânicos.

#### SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

Para uma comparação entre a destilação com múltiplo-efeito e a convencional visando economia de energia, foi selecionado um sistema de duplo-efeito simples, sem integração material (fig.1). Esta decisão foi tomada por diversas razões.

Inicialmente, a seleção de uma alternativa deve levar em conta os futuros problemas de controle que ela produzirá. Com relação às colunas de destilação integradas, sua pouca utilização deve-se justamente à este tipo de problema. Neste sentido, estudos de sensibilidade mostram que a resposta à desvios na integração energética pura são muito mais rápidas do que à desvios na integração material. Nestes estudos verifica-se que os sistemas de controle aumentam de complexidade a medida que aumenta o número de interações entre as colunas<sup>(9)</sup>.

Além disso, uma análise preliminar mostrou que, quando há apenas uma alimentação, tal como na figura (2), não se consegue reduções muito significativas na quantidade de energia necessária ao primeiro refulvador. A economia fica por conta de outras vantagens, como menor necessidade de refrigeração e maior pureza dos produtos.

Tem sido estimado que 10 a 20% de toda a energia atualmente usada em destilação deverá ser economizada por operações mais eficientes de equipamentos já existentes<sup>(10)</sup>. Objetivando atingir a maioria dos casos a coluna convencional e uma das integradas sempre funcionará à pressão atmosférica.

## DESTILAÇÃO CONVENCIONAL

O objetivo do presente trabalho é realizar uma comparação da técnica de destilação com múltiplo-efeito com a convencional, voltada para a economia de energia. Para tanto, a coluna de destilação é calculada pelo método de Newton-Raphson, através da tridiagonalização de sua matriz Jacobiana <sup>(2)(8)</sup>. Como modelo termodinâmico para o cálculo do equilíbrio líquido-vapor foi usada a equação virial, com os coeficientes previstos pelo método de Hayden e O'Connell para a fase vapor e, para a fase líquida, o método UNIQUAC <sup>(4)(5)(12)</sup>.

O sistema escolhido para ser usado foi o etanol-água, destilado até a obtenção do azeótropo.

condições de funcionamento :

R	∈	[20;30]
T <sub>f</sub>	∈	[20;65]
C <sub>f</sub>	∈	[1:15;3:15]
η	=	0,70
P	=	760 mm Hg
V <sub>f</sub>	=	10 <sup>4</sup> mol/hora

A vazão do destilado foi sempre aquela necessária para conter todo o álcool alimentado, na concentração do azeótropo:

$$D = \frac{\text{vazão molar do álcool alimentado}}{0,895} \quad (1)$$

Nestas condições foi calculado (Pinto,1987) que a porcentagem do calor fornecido no refeedor e retirado no condensador está entre 75.7 à 97.1%.

### PARAMETROS ESTUDADOS

Os resultados obtidos são avaliados através de dois parâmetros, E<sub>r</sub> e E<sub>c</sub>. O primeiro mede a economia conseguida na energia requerida pelo refeedor, Q<sub>r</sub>, enquanto o segundo avalia a redução da energia a ser retirada no condensador, Q<sub>c</sub>. em outras palavras, E<sub>r</sub> e E<sub>c</sub> são ambas medidas de economia, em porcentagem.

respectivamente, do vapor de aquecimento e da água de refrigeração.

$$E_r = 100 \frac{(Q_r - Q_r^k)}{Q_r} \quad (2)$$

$$E_c = 100 \frac{(Q_c - Q_c^k)}{Q_c} \quad (3)$$

Os trocadores de duplo-efeito funcionam como um estágio teórico, com uma eficiência de 100%. Deste modo, recebem dois fluxos a mesma temperatura, nas condições de líquido e vapor saturados, fazendo apenas a transferência de calor latente.

## RESULTADOS

Em todas as configurações encontrou-se para P e N

$$\begin{aligned} P_1 &= 1 \text{ atm} \\ P_2 &= .4343 \text{ atm} \\ N &\in [36;40] \end{aligned}$$

Apesar da coluna com vácuo parcial favorecer o enriquecimento do destilado final, sua variação foi mínima, quando comparadas às composições obtidas no duplo-efeito e na coluna convencional.

$$\begin{aligned} \text{para a coluna convencional} \quad x_d &= .889 \\ \text{para o duplo-efeito} \quad x_d &= .891 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos para  $E_r$  e  $E_c$  estão sintetizados nas figuras (5)-(8). Observa-se que a economia de energia aumenta com o acréscimo na temperatura ou composição da alimentação. Para a água economizada no condensador, o comportamento é invertido. Para condições de alimentação relativamente comuns, baixas concentrações de etanol e temperatura em torno de 20°C, os valores obtidos foram,  $E_r = 48,88$  e  $E_c = 51,57$  (R=30). O comportamento destes parâmetros é linear com a temperatura de alimentação. Para a composição de alimentação os maiores efeitos são produzidos na faixa de 1:15 a 2:15 e tendem a desaparecer nas composições superiores a 3:15.

Neste trabalho foram estudadas 40 configurações, envolvendo diferentes condições de funcionamento. Os resultados limites foram:

$$\begin{aligned} E_r &\in [44,08;48,91] \\ E_c &\in [49,25;54,28] \end{aligned}$$

A dependência entre os resultados e os diversos parâmetros foram as seguintes:

$E_r$	$E_c$	$C_f$	$T_f$	R
Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo
Mínimo	Máximo	Mínimo	Mínimo	Mínimo

### CONCLUSÕES

Os resultados mostram que a técnica de destilação com duplo-efeito aplicada ao sistema etanol-água é uma interessante alternativa, no que concerne à economia de energia. Verificou-se que é possível obter uma economia de 48,9% no vapor de aquecimento e de 54,2% na água de refrigeração.

As porcentagens de economia conseguidas são independentes da vazão de alimentação podendo ser atingidas para qualquer capacidade de produção de álcool da destilaria.

As figuras mostram que  $E_r$  é diretamente proporcional à  $C_f$ ,  $T_f$  e R acontecendo o contrário com  $E_c$ . Ambos variam linearmente com a temperatura da alimentação.  $E_r$  é fortemente influenciado pela composição da alimentação apenas para baixas concentrações de etanol.

Finalmente, para alimentações com altas concentrações de etanol e condições próximas da saturação, a economia de energia no refervedor estabiliza em torno de 49%.

### SIMBOLOGIA

- $C_f$  composição da alimentação (Vol. etanol:Vol. água)
- D vazão molar do destilado
- $E_c$  redução da energia a ser removida no condensador (%)
- $E_r$  redução da energia requerida no refervedor (%)
- N número total de estágios
- P pressão absoluta da coluna convencional
- $P_i$  pressão absoluta da coluna i
- $Q_c^k, Q_c$  energia retirada no condensador (duplo-efeito k, destilação convencional)
- $Q_r^k, Q_r$  energia requerida no refervedor (duplo-efeito k, destilação convencional)
- R razão de refluxo
- $T_f$  temperatura de alimentação ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $V_f$  vazão molar de alimentação
- $x_d$  fração molar do etanol no destilado
- $\eta$  eficiência de Murphree constante

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BAHN, A.; HOPPE, K.; THOSS, M.; MÜLLER, J. & LEHMANN, H. J., "Möglichkeiten zur energetischen verbesserung von destillationsprozessen", Chem. Techn., 33, 263, Juni 1981.
2. FREDENSLUND, A; GMEHLING, S. & RASMUSSEN, P., Vapor-Liquid equilibria using UNIFAC a group-contribution method. Elsevier, Amsterdam, 1977.
3. FREY, R. M.; DOHERTY, M. F.; DOUGLAS, J. M. & MALONE, M. F., "Controlling thermally linked distillation columns", Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 23, 483, 1984.
4. GMEHLING, J. & ONKEN, V., Vapour-liquid equilibrium data collection. Dechema Chem. Data Series, Vol.1 - Part.1, 1977.
5. HAYDEN, J.G. & O'CONNELL, J.P., "A generalized method for predicting second virial coefficients". Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 14, 209, 1975.
6. KING, C.J., Processos de Separación. Ed. Reverte. Barcelona, 1980.
7. MIX, T.W.; DWECK, J.S.; WEIMBERG, M. & ARMSTRONG, R.C., "Energy conservation in distillation", Chem.Eng.Prog., 49, 1978.
8. NAPHTALI, L.M. & SANDHOLM, D.P., "Multicomponent separation calculations by linearization", AIChE J., 17, 148, 1971.
9. O'BRIEN, N.G., "Reducing Column Steam Consumption",  
8  
Chem. Eng. Prog., 65, 1976.
10. OTHEMER, D.F., "Vapor re-use process", Ind. Eng. Chem., 143S, 1936.
11. PINTO, L.T., "Aplicação de Colunas de Múltiplo-Efeito na Destilação do Sistema Etanol-Água. Economia de Energia". Tese de Mestrado, UFSC, 1987.
12. PRAUSNITZ, J.M.; ANDERSON, T.F.; GRENS, E.A.; ECKERT, C.A.; HSIEH, R. & O'CONNELL, J.P., Computer Calculations for Multicomponent Vapor-Liquid and Liquid-Liquid Equilibria. Prentice-Hall, N.J., 1980.
13. RUSH, F.E., "Energy-saving alternatives to distillation", Chem. Eng. Prog., 44, 1980.
14. SCHLÜLER, L. & SCHMIDT, R., "A present trend in rectification energy saving", Int. Chem. Eng., 23, 427, 1983.
15. WEIß, S., "Möglichkeiten zur energieeinsparung bei der destillation", Chem. Techn., 32, 448, 1980.

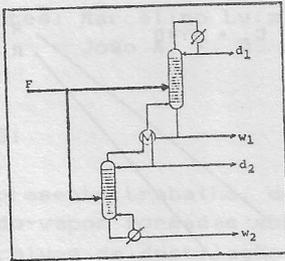


Figura (1) Destilação com duplo-efeito

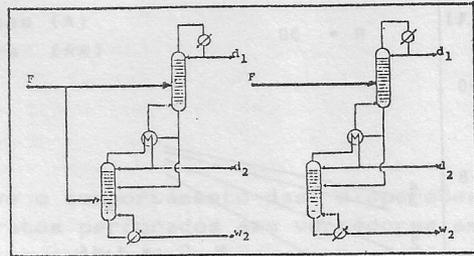


Figura (3) Destilação duplo-efeito com integração material. Alimentação em paralelo de produtos na primeira coluna.

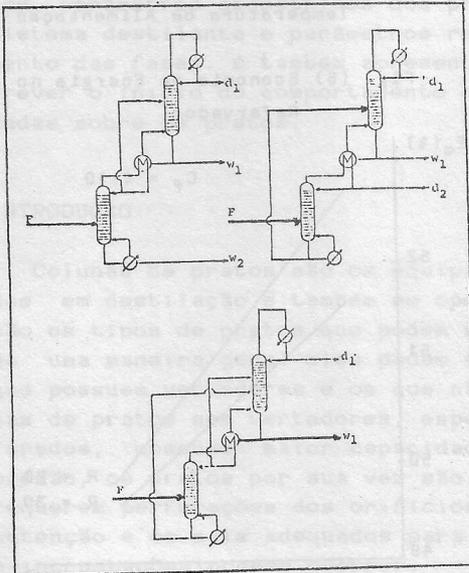


Figura (2) Destilação duplo-efeito com integração material e alimentação em paralelo de produtos na segunda coluna

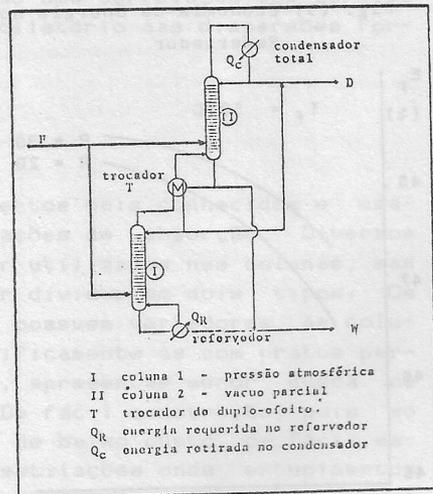


Figura (4) Arranjo em duplo-efeito sem integração material

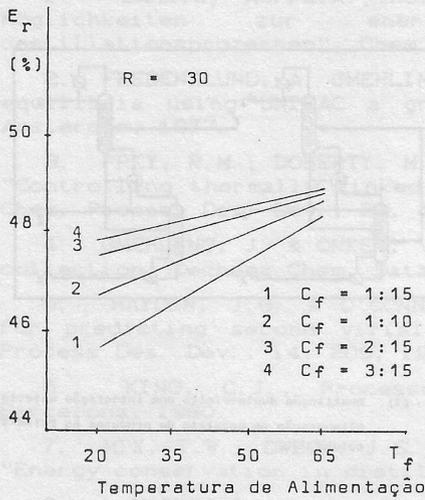


Fig. (5) Economia de Energia no Refervedor

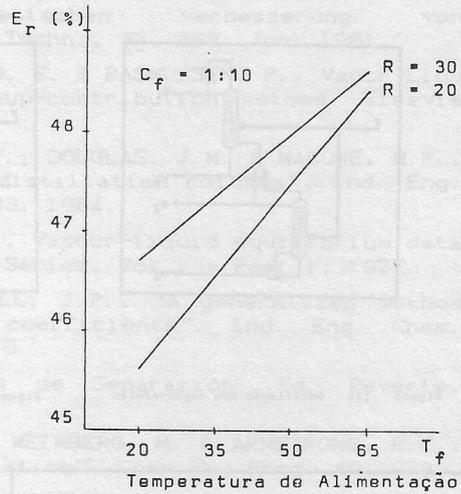


Fig. (6) Economia de Energia no Refervedor

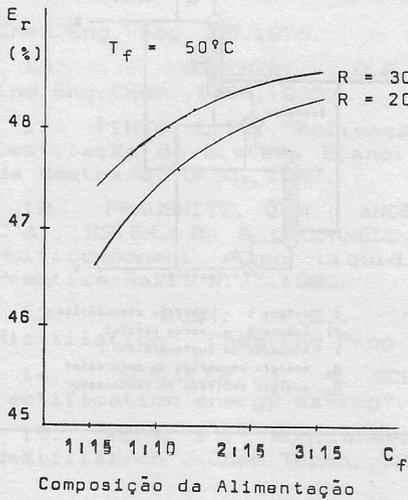


Fig. (7) Economia de Energia no Refervedor

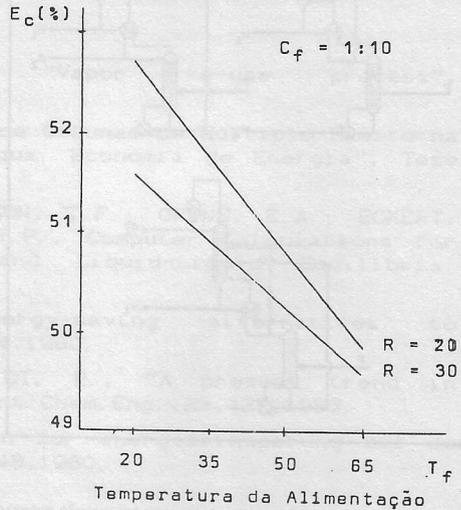
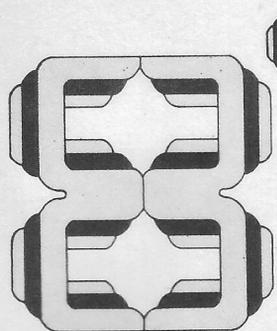


Fig. (8) Economia de Água de Refrigeração no Condensador



# 1º congresso brasileiro de engenharia química

"a engenharia química em tempo de mudanças"

## ANAIS

24 a 27 de julho de 1988



promoção e  
organização:



abeq - associação brasileira de engenharia química

I VOLUME