

REDUÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR E DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO NA DESTILAÇÃO DE ÁLCOOL CARBURANTE

Pio Caetano Lobo

Marlos Mazzeu Silveira

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Departamento de Mecânica, 37500-000, Itajubá, MG, Brasil. E-mail: pclobo@iem.efei.br

Resumo

O vinho, produto da fermentação em uma destilaria de álcool carburante da cana de açúcar, é uma mistura de produtos químicos (principalmente o etanol) e água. A tarefa é separar os produtos desejáveis, com a pureza especificada, pelo processo energeticamente mais econômico. Este trabalho descreve a análise de disponibilidade (análise exergetica) do processo de destilação de álcool carburante da cana de açúcar, visando sua otimização energética. Dados reais de operação de uma destilaria são utilizados para realizar sua auditoria energética (fluxos de energia e exergia) e determinar rendimentos e eficácias termodinâmicas. Os parâmetros de um programa de simulação matemática do processo foram ajustados para reproduzir o desempenho da coluna real. Em seguida o programa foi utilizado para analisar a influência do uso da compressão mecânica do vapor de etanol no consumo de vapor d'água, de água de resfriamento e na eficácia exergetica.

Palavras-chave: Álcool carburante, Destilação, Disponibilidade, Exergia, Racionalização energética.

1. INTRODUÇÃO

Membranas e extração supercrítica para a separação de misturas de líquidos são os temas quentes de hoje e a pesquisa em processos de destilação está quase abandonada. Contudo, destilação continua uma tecnologia dominante nas indústrias de processo químico. Mundialmente responde por 95% de todas as separações, e em torno de 15% de todo o consumo de energia industrial (Zanetti, 1997).

A destilação objetiva a separação física de uma mistura de líquidos, cujas pressões de saturação diferem a uma dada temperatura, em frações com diferentes pontos de ebulição. No caso da produção de álcool da cana de açúcar, o processo de separação utilizado é a destilação. Uma coluna de destilação de pratos, atualmente a mais utilizada em destilarias de álcool carburante, consiste em uma série de pratos (ou bandejas). Em operação normal, uma quantidade determinada de líquido existe em cada prato, e o vapor ascendente contata, enquanto atravessa, o líquido. O vapor que sai da primeira placa, no topo da coluna, entra no condensador. Do líquido obtido, tem-se as correntes de refluxo (retorno de líquido à coluna) e destilado (produto). A razão entre a vazões de refluxo e de destilado é usualmente designada de taxa de refluxo. O líquido deixando a placa de fundo da coluna é retirado como produto de fundo.

Até alguns anos atrás, o preço pago pelo álcool carburante da cana de açúcar era compensador, mesmo sem aproveitar o bagaço da cana, portanto pouco se preocupava com o uso racional da energia do bagaço. Atualmente o preço do álcool carburante é menor e menos estável, enquanto existem produtos de bagaço economicamente atraentes como a eletricidade e o carvão vegetal ou ativado. Ademais o uso d'água dos rios para resfriamento está sendo taxado, portanto a racionalização virou necessidade. Este trabalho descreve-se um diagnóstico energético do aparelho de destilação para comparar dois processos alternativos de destilação de álcool hidratado. Um é o atualmente utilizado em destilarias, o outro uma opção que reduz os fluxos tanto d'água para os condensadores de álcool como de vapor d'água às colunas. O diagnóstico inicia com a verificação do balanço de massa, que pode indicar perdas e/ou erros de medição nas vazões mássicas das diversas correntes atravessando o volume de controle. Em seguida, o balanço de energia averigua os dados (vazões e propriedades termodinâmicas) em relação à Primeira Lei da Termodinâmica. Por fim a análise de disponibilidades (exergias) determina as perdas termodinâmicas da energia disponível (trabalho reversível) no processo. Foi observado que a eficácia do aparelho (nome dado ao conjunto de equipamentos que realiza a separação) do processo usual de destilação é de 11,04 %, enquanto a modificação proposta ao processo pode levá-la a 18,34 %.

Foi efetuado a simulação computacional do processo em um aparelho de destilação com capacidade de produção de 90.000 m³ de álcool hidratado por dia; o número teórico de pratos foi ajustado para reproduzir o desempenho do processo real, denominado Processo I. Realizou-se ainda uma segunda simulação, na qual o vapor de etanol foi comprimido para elevar sua temperatura suficientemente para que a entalpia latente da sua condensação fosse utilizada para evaporar parte da vinhaça e substituir parte do vapor e d'água de resfriamento. Este processo foi chamado de Processo II. A partir dos resultados das simulações verificou-se o balanço de massa, e realizaram-se os balanços de energia e exergia, obtendo-se assim parâmetros para a comparação entre os dois processos.

2. PROCESSO I

A Figura 1 mostra um fluxograma do modelo de simulação construído para o Processo I. Algumas simplificações foram feitas neste fluxograma: na destilaria real, os vapores que saem do topo da coluna D são condensados em dois condensadores ligados em série. Já neste modelo, esta condensação está sendo realizada em apenas um condensador. Os vapores do topo da coluna B são condensados em três condensadores em série, enquanto a simulação utiliza dois condensadores para realizar esta condensação. Na figura 1 os equipamentos estão identificados por letras e as correntes por números. Os equipamentos são: A (coluna de destilação), D (coluna de concentração de cabeça), K (recuperador de calor), R (condensador), B (coluna de retificação), E (pré-aquecedor), E1 (condensador), J (resfriador). E as correntes são: 1 (vinho), 2 (vapor), 3 (vinhaça), 4 (água de resfriamento na entrada), 5 (água de resfriamento na saída), 6 (álcool hidratado), 7 (álcool de segunda), 8 (flegmaça), 9 (flegma), 10 (esgotamento em D), 11 (corrente de topo em D), 12 (refluxo em D), 13 (corrente de topo em B), 14 (refluxo em B).

2.1 Breve descrição do processo

Os principais equipamentos do processo atual são:

- Coluna A (de destilação) – Possui 24 bandejas. A temperatura na bandeja 1 (no fundo da coluna) deve estar entre 380-381 K, e na bandeja 24 (no topo) entre 370-372 K. A pressão absoluta no fundo desta coluna deve estar em torno de 145 kPa e no topo em

- Coluna B (de retificação) – possui 49 bandejas. A pressão absoluta no interior desta coluna varia entre 135,60-130,00 kPa, do fundo ao topo, respectivamente. As temperaturas devem ser as seguintes: 371-373 K na bandeja 1, 365-368 K na bandeja 4, 358-360 K na 11 e 352-354 K na 47. As bandejas 1 e 47 estão localizadas no fundo e no topo, respectivamente. Esta coluna é alimentada pelo flegma, conforme já mencionado anteriormente. A coluna também recebe a corrente de esgotamento da coluna D.

As correntes de saída da coluna B são:

Álcool Hidratado – produto final da destilação. O álcool hidratado pode ser retirado, em estado líquido, da bandeja 43, 47 ou 48. Em seguida esta corrente é resfriada indiretamente por água, no resfriador J, depois retirada do processo a 92,6-93,8 INPM e 308,15 K.

Flegmaça – corrente de resíduo da coluna B, que é reintroduzida no processo através da coluna A.

Óleo Altos e Baixos – a coluna B possui 12 tomadas (torneiras) para a retirada destes óleos, que estão localizadas nas bandejas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15 e 17. Sendo as 5 torneiras superiores para a retirada dos óleos altos e as 7 inferiores para a retirada dos óleos baixos (fúsel). Esses óleos são ricos nos produtos pesados (ou de calda), como álcool acético, etílico, propílico, isopropílico, butílico, dentre outros, (Rasovsky, 1973). O valor da vazão destes óleos é aproximadamente 1% do valor da vazão de álcool hidratado, (IPT, 1990). A retirada destes óleos não foi considerada neste trabalho, uma vez que para efeito de cálculo o vinho foi considerado como uma mistura hidroalcoólica binária: etanol - água.

Vapores Alcoólicos - saem do topo da coluna B a 92,6-93,8 INPM, com destino ao pré-aquecedor E, e ao condensador E1. Em “E” os vapores de álcool trocam calor com o vinho, e seguem para E1 onde se condensam trocando calor com a água de resfriamento. O condensado retorna à coluna B, como refluxo, entrando na bandeja 49, a fim de garantir uma corrente líquida nas bandejas de B.

- Coluna D (de concentração de cabeça) - Esta coluna tem 6 bandejas. Recebe vapores alcoólicos da coluna A. Uma corrente de esgotamento, com graduação 50,0 INPM sai da base desta coluna, entrando na bandeja 2 da coluna B. Do topo da coluna D saem vapores alcoólicos com graduação de aproximadamente 88,0 INPM, que se condensam no condensador R, resfriado a água. Parte deste condensado é retirada do processo como álcool de segunda, rico no produtos leves ou de cabeça, como aldeídos, ésteres, dentre outros, (Rasovsky, 1973). A outra parte do condensado retorna à bandeja 6 da coluna D, como refluxo, a fim de garantir uma corrente líquida nas bandejas desta coluna.
- Recuperador de Calor K - este aparelho efetua a troca de calor indireta entre as correntes de vinhaça e vinho. A corrente de vinho, entra no processo a 308,15 K, é primeiramente pré-aquecida no pré-aquecedor E, de onde sai entre 343-348 K. Na seqüência o vinho vai para o recuperador de calor K, de onde sai a 362-365 K, entrando depois na coluna A.

Todas as correntes citadas neste item se apresentam no estado líquido, com exceção das correntes de flegma, de vapores alcoólicos no topo de “D”, e no topo de “B”, que estão no estado gasoso. Os insumos necessários ao processo são : 2,58 kg de vapor d'água e 62,71 kg de água de resfriamento por kg de álcool hidratado produzido.

Os dados informados neste ítem foram fornecidos ao programa de simulação.

2.2 Equações utilizadas nos balanços do Processo I

Cálculo das entalpias e entropias:

Para correntes de misturas de líquidos (vinho, vinhaça, álcool hidratado e álcool de segunda) decidiu-se usar uma base comum (incluindo a entalpia de reação):

Entalpia:

$$H_k = M_k \cdot [(h_k - h_{ok}) + (X_k \cdot PCIE)] \quad (1)$$

Onde: H_k = entalpia da corrente em relação à T_o (kW)

M_k = vazão mássica da corrente (kg/h)

h_k = entalpia específica da corrente (kJ/kg)

h_{ok} = entalpia específica da corrente na condição padrão de referência (kJ/kg)

X_k = graduação alcoólica INPM da corrente

PCIE = poder calorífico inferior do etanol (26,80 MJ/kg).

“k” indica corrente genérica

“o” indica condição padrão de referência: $T_o=298,15$ K e $p_o=101,32$ KPa

Entropia:

$$S_k = [X_{mk} \cdot c_{pomet} + (1-X_{mk}) \cdot c_{pomag}] \cdot \ln\left(\frac{T_k}{T_o}\right) \cdot n_k + \Delta S_{mistK} \quad (2)$$

Onde: S_k = entropia da corrente em relação à T_o (kW/K)

X_{mk} = graduação alcoólica da corrente à base molar

c_{pomet} = calor específico do etanol à pressão constante à T_o , em base molar (113,498 kJ/kmol.K)

c_{pomag} = calor específico da água à pressão constante e à T_o , em base molar (75,306 kJ/kmol.K).

T_k = temperatura da corrente (K)

n_k = vazão molar da corrente (kmol/h)

ΔS_{mistK} = entropia de mistura para a corrente (kW/K).

Entropia de Mistura:

$$\Delta S_{mistk} = -n_k \cdot R_m \cdot (X_{mk} \cdot \ln(X_{mk}) + (1 - X_{mk}) \cdot \ln(1 - X_{mk})) \quad (3)$$

Onde: R_m = constante universal dos gases, à base molar (8,315 kJ/kmol.K)

Para correntes de um único componente (vapor e água de resfriamento):

Entalpia:

$$H_k = M_k \cdot (h_k - h_{ok}) \quad (4)$$

Entropia:

$$S_k = M_k \cdot (s_k - s_{ok}) \quad (5)$$

Onde: s_k = entropia específica da corrente (kJ/kg.K)

s_{ok} = entropia específica da corrente na condição padrão de referência (kJ/kg.K)

Para todas as correntes:

Da Primeira Lei da Termodinâmica, desprezando-se as energias cinética e potencial:

$$H_{sai} - H_{ent} = W_t - Q \quad (6)$$

Onde: H_{sai} = somatória das entalpias (em relação à T_o) das correntes de saída (kW)

H_{ent} = somatória das entalpias (em relação à T_o) das correntes de entrada (kW)
 Q = calor transferido do sistema ao meio ambiente (kW)
 W_t = potência total recebida pelo sistema (kW).

Da Segunda Lei da Termodinâmica:

Exergia:

$$\Lambda_k = H_k - T_o \cdot S_k \quad (7)$$

Onde: Λ_k = exergia da corrente (kW)

Eficácia do processo (ξ_p):

$$\xi_p = \frac{\Lambda_{sai}}{\Lambda_{ent} + W_t} = \text{exergia das saídas} / \text{exergia das entradas} \quad (8)$$

Onde: Λ_{sai} = somatória das exergias das correntes de saída (kW).

Λ_{ent} = somatória das exergias das correntes de entrada (kW).

Irreversibilidades (I):

$$I = \Lambda_{ent} + W_t - \Lambda_{sai} \quad (9)$$

Eficácia do aparelho (ξ_a):

$$\xi_a = \frac{\ddot{E}_{ah} + \ddot{E}_{a2} - \ddot{E}_{vin}}{\ddot{E}_{vap} + W_t} \quad (10)$$

Onde: o numerador da eq. (10) representa o trabalho reversível de separação.

o denominador da eq. (10) representa o trabalho reversível gasto para realizar o processo.

Λ_{ah} = exergia da corrente de álcool hidratado (kW)

Λ_{a2} = exergia da corrente de álcool de segunda (kW)

Λ_{vin} = exergia da corrente de vinho (kW)

Λ_{vap} = exergia da corrente de vapor (kW).

2.3 Balanços do Processo I

A tabela 1 demonstra os valores obtidos através da análise do Processo I. O volume de controle está delimitado pela linha tracejada na figura 1.

Tabela 1. Balanços do Processo I

Corrente	M (kg/h)	T (K)	X (%)	H (kW)	$T_o \cdot S$ (kW)	Λ (kW)
Correntes de Entrada						
Vinho	44.762,82	308,15	6,610	22.532,67	700,85	21.831,82
Vapor	7.683,32	393,15	- o -	5.562,38	4.377,49	1.184,89
Água Resf.	186.752,27	303,15	- o -	1.084,04	1.070,30	13,74
TOTAIS	239.198,41	- o -	- o -	29.179,09	6.148,64	23.030,45
Correntes de Saídas						
Vinhaça	49.280,42	367,62	0,012	4.023,90	3.574,25	449,65
Água Resf.	186.752,27	312,65	- o -	3.142,38	3.065,51	76,87
Álcool Hid.	3.005,80	308,15	93,512	20.946,60	42,12	20.904,48
Álcool 2ª	159,92	358,58	88,897	1.066,21	8,04	1.058,17
TOTAIS	239.198,41	- o -	- o -	29.179,09	6.689,92	22.489,17

Outros valores:

$W_t = 0 \text{ kW}$

$Q = 0 \text{ kW}$ (não foi considerado o calor transferido entre o sistema e o meio ambiente)

$\xi_p = 97,65 \%$

$I = 541,28 \text{ kW}$

$\xi_a = 11,04 \%$

3. PROCESSO II

O Processo II é uma modificação do Processo I, visando a melhoria da eficácia. A Figura 2 mostra o fluxograma do Processo II.

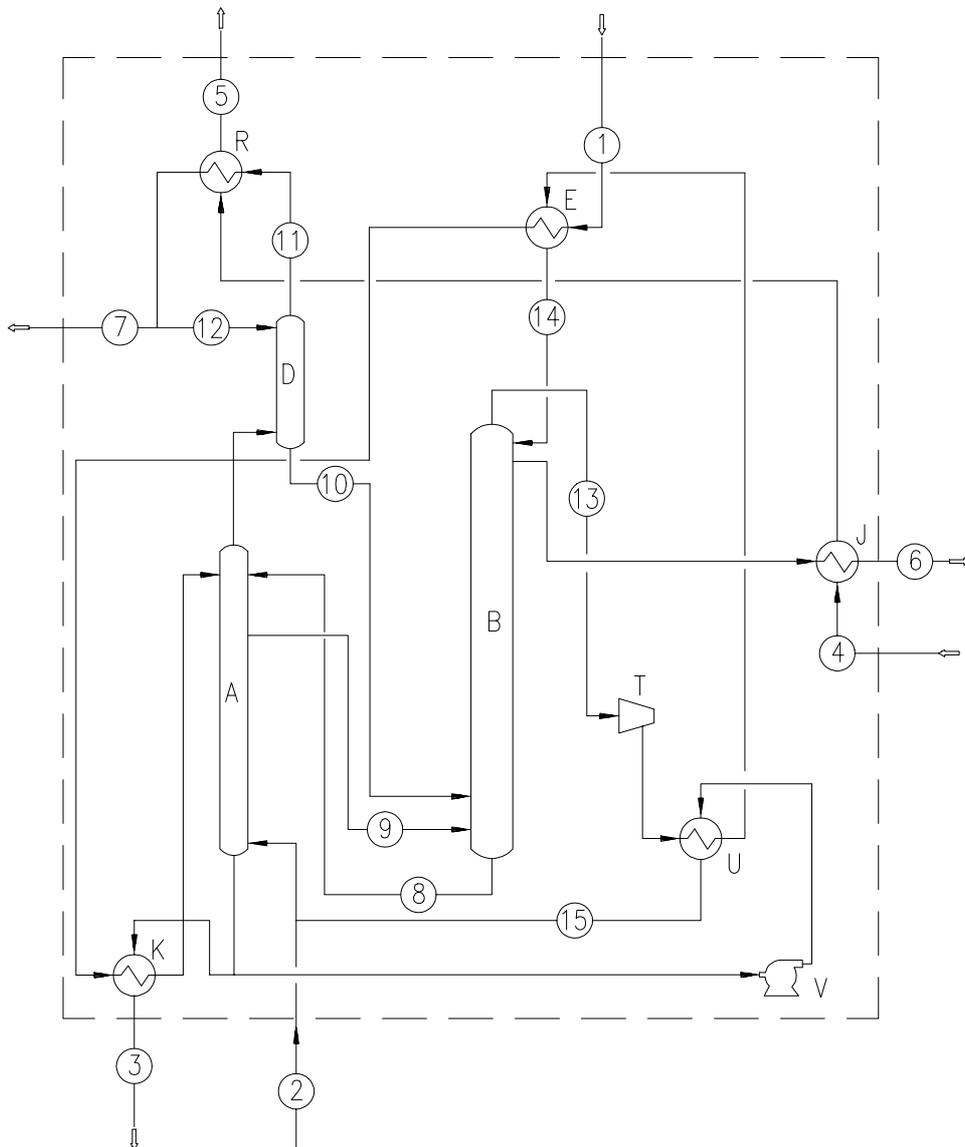


Figura 2. Fluxograma do Aparelho de Destilação do Processo II

Seus equipamentos são: A (coluna de destilação), D (coluna de concentração de cabeça), K (recuperador de calor), R (condensador), B (coluna de retificação), E (pré-aquecedor), J (resfriador), T (compressor), U (condensador) e V (bomba). As correntes são: 1 (vinho), 2

(vapor), 3 (vinhaça), 4 (água de resfriamento na entrada), 5 (água de resfriamento na saída), 6 (álcool hidratado), 7 (álcool de segunda), 8 (flegmaça), 9 (flegma), 10 (esgotamento em D), 11 (corrente de topo em D), 12 (refluxo em D), 13 (corrente de topo em B), 14 (refluxo em B), 15 (vinhaça para compressão).

A corrente de topo da coluna B (corrente nr. 13), com $M=13.364,02$ kg/h, $X=93,8$, 358 K, 130 kPa e título 1, é direcionada ao compressor T. Após a compressão a corrente com propriedades: 421 K, 400 kPa (vapor super-aquecido) se dirige ao condensador U, onde fornece calor à corrente de vinhaça, evaporando a mesma. Na saída do condensador U, a corrente 13 com temperatura de 390 K, com título 0,99 , segue ao pré-aquecedor E, onde pré-aquece o vinho, elevando a temperatura deste de 308.15 K para 317 K. Por fim retorna à coluna B como refluxo (corrente 14), na condição de líquido saturado. Uma ramificação da corrente de vinhaça, chamada de vinhaça para evaporação (corrente 15), com $X=0,01$, 384 K, 145 kPa e vazão de 5450,00 kg/h, passa pela bomba V, tendo sua pressão elevada para 155 kPa. Depois vai ao condensador U, onde é evaporada pela troca de calor com a corrente 13. A corrente 15 sai do condensador U com 393,15 K e 155 kPa (vapor super-aquecido), se une à corrente de vapor d'água, também à 393,15 K e 155 kPa, para formarem uma única corrente que é injetada na base da coluna A. As potências da bomba V e do compressor T são $2,025 \times 10^{-2}$ kW e 382,47 kW respectivamente. Os resultados obtidos através desta melhoria estão na Tabela 2.

3.1 Balanços do Processo II

Para realizar os balanços de energia e exergia do processo II, foram utilizadas as equações listadas nos ítem 2.2. A tabela 2 demonstra os valores obtidos através da análise do Processo II. O volume de controle usado está delimitado pela linha tracejada na figura 2.

Tabela 2. Balanços do Processo II

Corrente	M (kg/h)	T (K)	X (%)	H (kW)	To.S (kW)	Λ (kW)
Correntes de Entrada						
Vinho	44.762,82	308,15	6,610	22.532,67	700,85	21.831,82
Vapor	2.233,30	393,15	- o -	1.616,81	1.272,40	344,41
Água Resf.	51.000,00	303,15	- o -	296,04	292,29	3,75
TOTAIS	97.996,12	- o -	- o -	24.445,52	2.265,54	22.179,98
Correntes de Saídas						
Vinhaça	43.830,40	337,14	0,013	2.025,20	1.865,73	159,47
Água Resf.	51.000,00	311,45	- o -	787,57	769,15	18,42
Álcool Hid.	3.005,80	308,15	93,523	20.949,02	42,09	20.906,93
Álcool 2 ^a	159,92	358,67	88,897	1.066,22	8,05	1.058,17
TOTAIS	97.996,12	- o -	- o -	24.828,01	2.685,02	22.142,99

Outros Valores:

$$W_t = W_{\text{bomba}} + W_{\text{comp}} \quad (11)$$

Onde: $W_{\text{bomba}} = 2,025 \times 10^{-2}$ kW (potência consumida pela bomba V).

$W_{\text{comp}} = 382,47$ kW (potência consumida pelo compressor T).

$$W_t = 382,49 \text{ kW}$$

$Q = 0$ kW (não foi considerado o calor transferido entre o sistema e o meio ambiente)

$$\xi_p = 98,14 \%$$

$$I = 419,48 \text{ kW}$$

$$\xi_a = 18,34 \%$$

4. CONCLUSÃO

A simulação indicou que refervendo o produto de fundo da coluna com a condensação de vapor comprimido de álcool, pode-se reduzir por mais de 70% tanto o fluxo d'água nos condensadores quanto a vazão de vapor d'água injetada no aparelho de destilação. A redução efetiva na vazão de vapor fornecido tem um preço, dado que a potência do compressor seria fornecida pelo turbo-gerador que exigiria mais vapor a alta pressão, ou uma turbina de maior rendimento, ou fornecimento de energia elétrica. A vantagem energética é quantificada pela análise na base de energia disponível (em trabalho reversível). O trabalho reversível de separação para o Processo I seria de 130,83 kW e para o Processo II de 133,29 kW. Já o trabalho reversível gasto para realizar o processo seria de 1.184,89 kW para o primeiro caso, e 726,90 kW para o segundo caso. Desta forma, conforme a equação (10), as eficácias do aparelho seriam 11,04 % para o processo original e 18,34 % para o processo otimizado.

5. AGRADECIMENTOS

O primeiro autor recebe bolsa de pesquisa do CNPq e o segundo recebe bolsa da CAPES. Parte dos recursos para instrumentos e computação vieram do CNPq e da CAPES. Dados foram fornecidos pela Usina Monte Alegre (Monte Belo-MG) e Destilaria Japungu (Lucena-BP)

6. REFERÊNCIAS

- Barros, G.D.T., 1997, "Análise Termodinâmica (Com Determinação das Energias Disponíveis) Em Uma Destilaria de Álcool", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, P.B., Brasil, 96 p.
- Brasil, N.I., "Introdução à Engenharia Química", Ed. Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 361p.
- Coulson, J.M. and Richardson, J.F., 1976, "Chemical Engineering", Ed. Pergamon Press, Oxford, UK, 790p.
- Faria, S.H.B., 1996, "Estudo Energético de Colunas de Destilação Através de Análise Exergética", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, S.P., Brasil, 196p
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990, "Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Álcool - Manual de Recomendações", São Paulo, S.P., Brasil, 796p.
- Kotas, T.J., 1985, "The Energy Method of Thermal Plant Analysis", Ed. Butterworths, London, UK, 296p.
- Moran, M.J and Shapiro, H.N., 1996, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 859p.
- Perry, R.H. and Chilton, C.H., 1980, "Manual de Engenharia Química", Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil.
- Rasovsky, E.M., 1973, "Destilarias". Coleção Canavieira n. 12, Divulgação do M.I.C., Rio de Janeiro, Brasil, 384p.
- Van Wylen, G.J. and Sonntag, R.E., 1993, "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", Ed. Edgard Blucher, São Paulo, Brasil, 318p.
- Zanetti, R., 1997, "Chemical Engineering", Volume 104, Número 6, p 5.