

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE EVAPORAÇÃO MULTI-EFEITO NA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

R. L. S. CANEVESI¹, C. L. DIEL², K. A. SANTOS¹, C. E. BORBA¹, F. PALÚ¹, E. A. DA SILVA¹

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Centro de Engenharia e Ciências Exatas.

² Klabin Papéis Monte Alegre. Telêmaco Borba – PR.

E-mail para contato: rafael_canevesi@hotmail.com

RESUMO – O processo de evaporação é amplamente empregado em diversos setores industriais, destacando-se o setor de papel e celulose. O emprego de modelos fenomenológicos e estatísticos consiste numa ferramenta utilizada na otimização de processos industriais. Os modelos fenomenológicos para este tipo de processo se baseiam em um conjunto de equações de balanço de massa, energia e de relações de equilíbrio, que devem ser resolvidas simultaneamente. Dessa forma, o presente trabalho tem como principal objetivo representar o processo de evaporação em regime permanente por meio de um modelo fenomenológico, empregando o método de Newton para sistemas não lineares e posteriormente empregar metodologias estatísticas para elaboração de um modelo empírico, avaliando a influência de variáveis como vazão, composição e temperatura de alimentação no consumo de vapor e na composição final. A vazão de alimentação de licor mostrou-se em ambos o caso como variável de maior influência, seguida pela composição de alimentação. Todavia, não foi possível encontrar um ponto ótimo no intervalo estudado.

1. INTRODUÇÃO

O processo de evaporação é empregado em diversas ramos da indústria, como a indústria de papel, açúcar e álcool, farmacêuticas, cloro, laticínios entre outros setores (Bhargava *et al.*, 2008). Na indústria de papel e celulose normalmente emprega-se evaporadores do tipo casco tubo, empregando sistemas de evaporação em múltiplos efeitos (Empie, 2009).

Em uma planta de evaporação de múltiplos efeitos o vapor produzido pela primeira unidade evaporadora é utilizado em uma unidade posterior, tornando dessa forma o consumo de vapor menor que a utilização de um único efeito (McCabe *et al.*, 1993).

O setor de evaporação é responsável pelo consumo de uma parte significativa de energia demandada pela indústria. Dessa forma, qualquer alteração que vise aumentar a eficiência desse processo é de grande interesse industrial (Khanam e Mohanty, 2011).

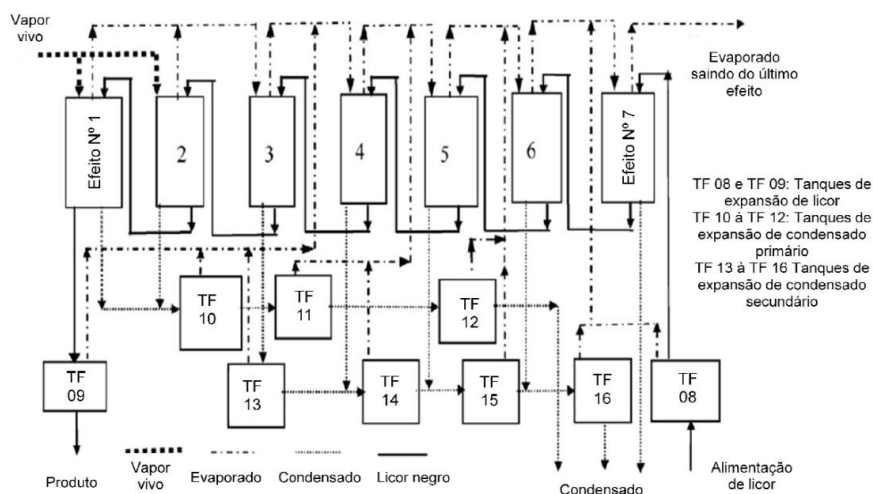
Assim, a utilização de modelos matemáticos para a obtenção de condições de operação que favoreçam a redução do consumo de energia consiste em uma alternativa largamente empregada (Bhargava *et al.*, 2008).

Os modelos matemáticos empregados para esse processos consistem em sistemas de equações não lineares levando em conta as condições de alimentação, vapor e estrutura. Na literatura existem diversos modelos matemáticos para conjuntos de evaporação, como os propostos por Agarwal *et al.* (2004), Miranda e Simpsom (2005) e Bhargava *et al.* (2008).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo fenomenológico para o processo de evaporação multiefeito, posteriormente empregando análises estatísticas (delineamento composto central rotacional e análise de superfície de resposta) visando considerar a influência das variáveis do processo nas respostas do modelo.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático foi desenvolvido para o sistema de evaporação apresentado na Figura 1, onde o fluxo de licor é contracorrente, existindo alimentação de vapor vivo no primeiro e segundo efeito. Os fluxos de licor e condensado são submetidos a expansão flash para a geração de uma quantidade de vapor adicional.



Fonte: Adaptado de Bhargava *et al.* (2008)

Figura 1 – Fluxograma do processo estudado por Bhargava *et al.* (2008).

O modelo matemático obtido tem como resposta todas as temperaturas e pressões de operação dos efeitos e unidades de flash, temperaturas, vazões, composições dos fluxos de licor, bem como todas as temperaturas e vazões dos fluxos de condensado e vapor. Para a resolução do sistema se faz necessário conhecer sete variáveis, que para neste caso consistem na temperatura do último evaporador, vazão, composição e temperatura de alimentação, razão entre as alimentações de vapor

vivo, temperaturas do vapor vivo.

2.1. Modelo Matemático Genérico para um Evaporador

O balanço de massa global para o i-ésimo evaporador é representado matematicamente pela Equação (01)

$$LE_i - LS_i - VS_i = 0 \quad (01)$$

Já o balanço material para o componente sólido pode ser representado pela Equação (02).

$$XE_i LE_i - XS_i LS_i = 0 \quad (02)$$

O balanço de energia é representado pela Equação (03).

$$LE_i hLE_i - LS_i hLS_i - VS_i HVS_i + Q' = 0 \quad (03)$$

Onde Q, consiste no calor recebido através da troca térmica, sendo representado matematicamente pela Equação (04).

$$Q' = A_i U_i \Delta T \quad (04)$$

O balanço material para as correntes de vapor no evaporador é apresentado na Equação (05).

$$VE_i - CS_i = 0 \quad (05)$$

Já o balanço de energia para as correntes de vapor consiste na Equação (06).

$$VE_i HVE_i - CS_i hCS_i - Q' = 0 \quad (06)$$

Nas equações (3) e (6), as entalpias de vapor são calculadas admitindo comportamento de gás ideal.

2.2. Modelo Matemático Genérico para uma Unidade Flash

O balanço de massa global para a i-ésima unidade flash é semelhante a o aplicado aos evaporadores, representado pela Equação (01).

Nas unidades de flash de licor (TF08 e TF09) obtém-se também o balanço de massa para o componente sólido, de forma análoga aos evaporadores pela Equação (2).

Já o balanço de energia para cada unidade flash é representado pela equação (07).

$$LE_i hLE_i - LS_i hLS_i - VS_i HVS_i = 0 \quad (07)$$

Para as unidades flash de condensado (TF10-TF16) considera-se que o valor da composição (XE_i e XS_i) como igual a zero.

2.3. Elevação do Ponto de Ebulição (EPE)

Para o cálculo da elevação do ponto de ebulição emprega-se a relação funcional proposta por Ray *et al.* (1992), representada pela Equação (08).

$$EPE = C_1(C_2 - X) \quad (08)$$

Onde X consiste na fração de sólidos C_1 e C_2 , parâmetros retirados de Bhargava *et al.* (2008).

2.4. Capacidade Calorífica do Licor (C_p)

Para o cálculo das entalpias dos fluxos de licor faz-se necessário o conhecimento do valor da capacidade calorífica do mesmo, todavia, ele apresenta dependência funcional com relação ao teor de sólidos do licor. Bhargava *et al.* (2008) emprega uma correlação, representada matematicamente pela Equação (09).

$$Cp_L = 4,187(1 - 0,54x) \quad (09)$$

Onde x consiste na fração de sólidos em dispersão na corrente.

2.5. Coeficiente Global de Troca Térmica (U)

O coeficiente global de troca térmica ($\text{kJm}^2\text{K}^{-1}$) consiste em uma função de diversos fatores, que, dentre os mais importantes, pode-se citar três: composição, gradiente de temperatura e vazão. Dessa forma, Bhargava *et al.* (2008) propôs uma correlação empírica para o cálculo do coeficiente U , representada matematicamente pela Equação (10).

$$U = 2 \left(0,6 \left(\frac{\Delta T}{40} \right)^{-0,37} \left(\frac{x}{0,6} \right)^{-1,23} \left(\frac{F}{25} \right)^{0,07} \right) \quad (10)$$

Os valores da composição e vazão empregados na Equação (10) consistem na média aritmética entre a entrada e saída de licor do evaporador.

2.6. Pressão de Vapor

Para o cálculo da pressão de operação dos evaporadores, bem como unidades flash emprega-se a equação de Antoine, utilizando-se parâmetros retirados de Smith *et al.* (2007).

2.7. Resolução do Sistema não Linear

O Método de Newton consiste no método mais amplamente estudado e conhecido para resolução de sistemas de equação não lineares. No caso de uma equação não linear a uma variável, o método de Newton consiste em se tomar um modelo local linear da função $f(x)$ em torno de x_k , e este modelo é a reta tangente à função em x_k .

Para um sistema de equações não lineares, tem-se conhecida a aproximação dada pela equação 11.

$$f_i(x) = f_i(x_k) + \nabla f_i(x_k)^T (x - x_k) \quad (11)$$

E portanto, sendo $F(x)$ o vetor de funções que compõe o sistema de equações, resultando na seguinte equação matricial:

$$F(x) = F(x_k) + J(x_k)(x - x_k) \quad (12)$$

Considerando que $(x - x_k)$ como sendo S_k obtém-se a seguinte equação:

$$J(x_k)S_k = -F(x_k) \quad (13)$$

Onde $J(x)$ consiste na matriz jacobiana e $F(x)$ o vetor com as funções que compõem o sistema de equações não lineares, ambas avaliadas em x_k , e s_k consistem no incremento para cada variável para a próxima interação. Para a utilização do método se faz necessária a fixação de duas tolerâncias, a primeira para satisfazer as condições presentes no vetor $F(x)$, e a segunda para o tamanho mínimo do passo s_k .

2.8. Análise Estatística

Submeteu-se o modelo a metodologia de delineamento composto central rotacional (DCCR), com o intuito de identificar a influência das variáveis referente a corrente de alimentação de licor no sistema de evaporação multi-efeito, bem como a obtenção de um modelo estatístico. Os fatores, bem como os níveis estudados são apresentados na Tabela 2.

Fator	(-1,68)	(-1)	(+1)	(+1,68)
Alimentação de Licor (kg s^{-1})	11.67	13.27	17.95	19.55
Composição de Alimentação (%)	9.82	10.62	12.98	13.78
Temperatura de Alimentação ($^{\circ}\text{C}$)	59.3	61.5	67.9	70.1

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

O modelo matemático obtido foi testado com as variáveis utilizadas como entrada por Bhargava *et al.* (2008), comparando os resultados obtidos com os apresentados pelo autor. Pode-se visualizar na Figura 2 que os resultados obtidos diferem em algumas variáveis em virtude de considerações diferenciadas com relação ao equilíbrio de cada evaporador. Também se observa que a composição de saída apresenta pouca diferença entre os resultados obtidos por ambos os trabalhos.

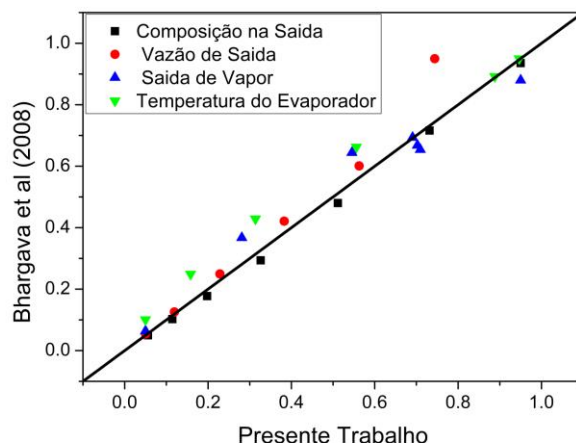


Figura 2 – Gráfico de comparação entre os resultados normalizados obtidos pelo presente trabalho e por Bhargava *et al.* (2008).

O planejamento experimental DCCR foi empregado para avaliar a influência dos fatores nas variáveis: Composição de Saída e Consumo de Vapor, sendo os resultados obtidos apresentado na figura 3 na forma de gráficos de Pareto.

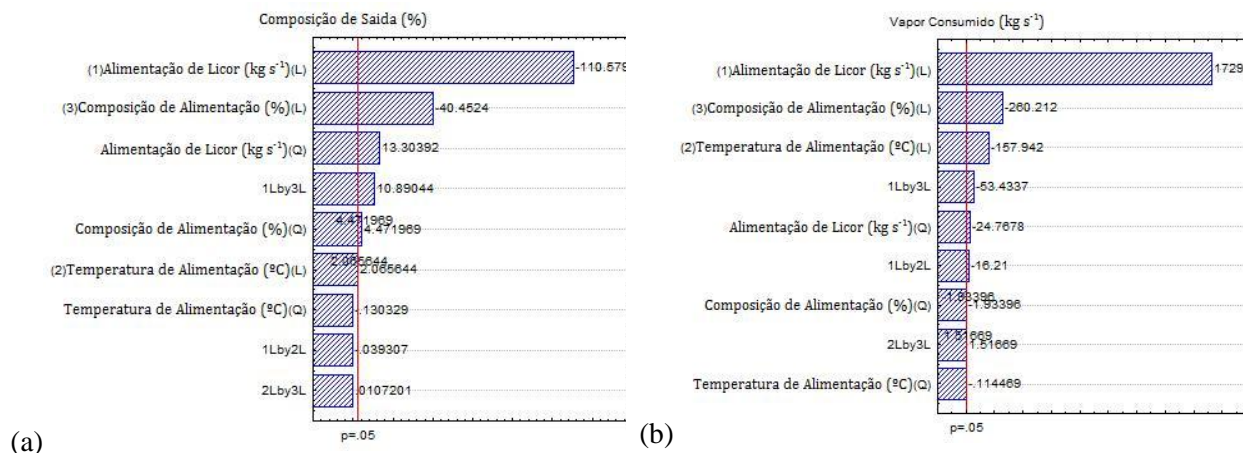


Figura 3 – Gráfico de Pareto: (a) para a Composição de Saída; (b) para Vapor Consumido.

Observa-se na Figura 3 que para a composição de saída o fator que apresenta maior significância consiste na Vazão de Alimentação. Também mostrou significância estatística a composição de alimentação e a sua interação com a vazão de alimentação. O fator temperatura da alimentação não mostrou influência na composição de saída para o nível de significância de 5%. Desta forma, representa-se o comportamento da composição final do licor a partir da superfície de resposta apresentada na Figura 4, em função dos dois fatores que se mostraram significantes.

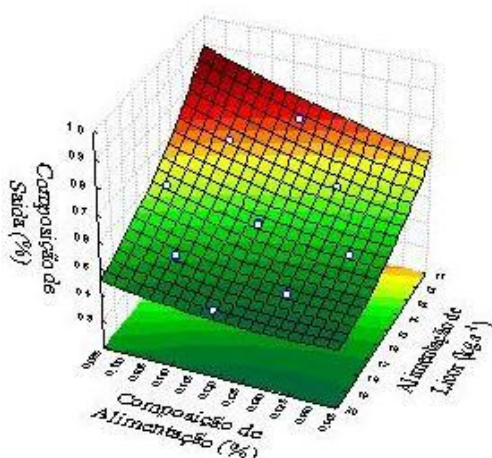
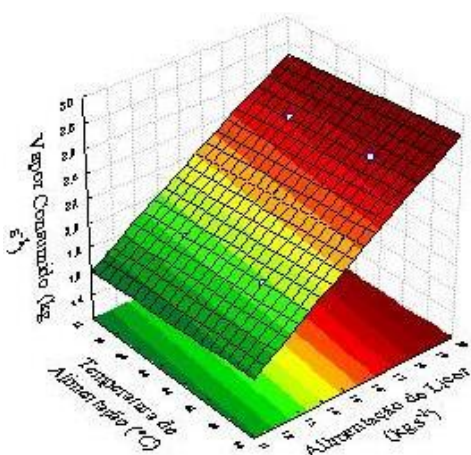


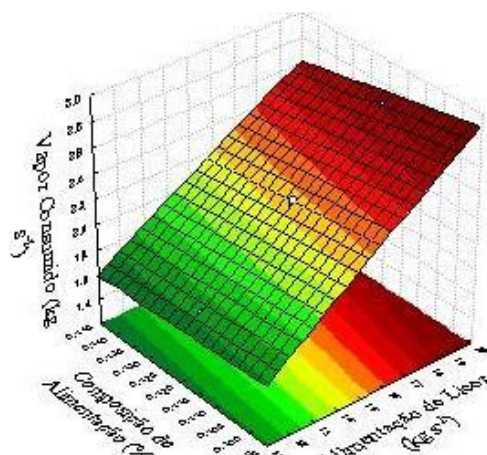
Figura 4 – Superfície de resposta para a variável composição de Saída em função da composição e Vazão de alimentação.

Por meio da Figura 4 nota-se que a composição de saída sofre significativa influência positiva com a redução da vazão de alimentação de licor, enquanto que a redução da porcentagem de sólidos na alimentação apresenta influência inferior no aumento da composição de saída.

Observando a Figura 3 (b) nota-se que para a variável Consumo de Saída todos os fatores se mostraram significativos na forma linear, e somente a vazão de alimentação se mostrou significativo na forma quadrática. Observa-se também que entre as interações somente a composição entre a Temperatura de Alimentação e a composição de alimentação não se mostraram influentes no nível de significância estudado.



(a)



(b)

Figura 5 – Superfície de resposta para a variável Consumo de Vapor em função: (a) Temperatura e Vazão de Alimentação; Composição e Vazão de Alimentação.

A partir da Figura 5 (a) e (b) nota-se que a Vazão de alimentação influencia fortemente no consumo de vapor do processo, enquanto que a Temperatura de Alimentação e Composição de Alimentação influenciam com menor intensidade na mesma variável.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho conseguiu reproduzir com boa eficiência os resultados obtidos por Bhargava *et al.* (2008). A Metodologia de planejamento experimental DCCR mostrou que entre os fatores analisados somente a vazão e a composição de alimentação influenciam na composição de saída. Já para o consumo de vapor todos os fatores, ao menos em sua forma linear se mostraram significativos. Todavia, não foi possível a obtenção de um ponto ótimo para o processo em função do intervalo estudado não apresentar pontos máximos ou mínimos, como mostrado nas superfícies de respostas.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a Klabin Papéis Monte Alegre pelo financiamento do projeto.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, V. K., ALAM, M. S.; GUPTA, S. C.; Mathematical model for existing multiple effect evaporator systems. *Chem. Eng. World*, v.39, p.76–78, 2004.
- BHARGAVA, R.; KHANAM, S.; MOHANTY, B.; RAY, A. K., Simulation of flat falling film evaporator system for concentration of black liquor, *Comput. Chem. Eng.*, v.32, p. 3213-3223, 2008.
- EMPIE, H. J.; Fundamentals of the “kraft” Recovery Process, Atlanta: Tappi Press, 2009.
- KHANAM, S.; MOHANTY, B.; Development of a new model for multiple effect evaporator system, *Comput. Chem. Eng.*, v.35, p.1983–1993, 2011.
- MCCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, P.; Unit Operations of Chemical Engineering, ed. New York, McGraw-Hill, 1993.
- MIRANDA, V. e SIMPSON, R.; Modelling and simulation of an industrial multiple effect evaporator: Tomato concentrate, *J. Food Eng.*, v.66, p.203–210, 2005.
- RAY, A. K.; RAO, N. J.; BANSAL, M. C.; MOHANTY, B.; Design data and correlations of waste liquor/black liquor from pulp mills. *IPPTA Journal*, v. 4, p.1–21, 1992.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M.; Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química, LTC, 2007.