

MODELAGEM MATEMÁTICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLO EFEITO EMPREGADOS NA CONCENTRAÇÃO DE EXTRATO DE CAFÉ

¹ Guilherme L. Schuina, ² Andréa O. S. da Costa, ² Esly F. da Costa Junior

¹ Bolsista de iniciação Científica PIBIC/CNPq/UFES, discente do curso de Engenharia de Alimentos

^{2,3} Professor UFES, Curso de Engenharia de Alimentos, Curso de Engenharia Química

^{1,2,3} UFES - Universidade Federal do Espírito Santo (CCA); Campus Alegre, Alto Universitário, s/nº - Caixa Postal 16, Guararema, Alegre, ES (28)3552-8932

e-mail: andreaosc@yahoo.com.br

RESUMO - Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo o estado do Espírito Santo o segundo maior produtor nacional. São particularmente importantes para o setor cafeeiro nacional 2 subprodutos: o café solúvel e o torrado e moído. O processamento do solúvel pode ser descrito em 8 etapas: *blend*, torração, moagem, extração, concentração, secagem, aglomeração e embalagem. O processo de concentração inicia com uma recuperação de aromas na qual os compostos voláteis são retirados. Livre de aromas, o extrato é levado a um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, o que facilita a próxima etapa que é a secagem. A concentração do extrato ocorre, geralmente, a temperaturas de 50 a 60°C com três ou quatro estágios. O extrato inicial contém aproximadamente 20% de substâncias sólidas e, ao final, possui 50% de sólidos. Neste contexto, o principal objetivo deste estudo consiste em propor um modelo matemático para um sistema de evaporadores de múltiplo efeito empregado na concentração do extrato de café utilizado para a fabricação de café solúvel. Para isto serão empregadas relações que descrevem balanços de massa e energia e relações adicionais que descrevem propriedades físico-químicas do fluido a ser concentrado.

Palavras-Chave: modelagem matemática, evaporadores de múltiplo efeito, produção de café solúvel.

INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo. Chegou ao Brasil em 1727 vindo da Guiana Francesa e se tornou um dos produtos mais importantes do país (ABICS – Associação Brasileira da indústria do café solúvel). Por mais de meio século, o café se tornou a principal cultura de exportação do país, tendo importância histórica, ao substituir a influência do ouro na economia colonial na época do império.

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de café. Segundo a Associação Brasileira da indústria de café (ABIC), em 2007 foram produzidas 33,4 milhões de sacas, sendo responsável por 30% do mercado internacional, volume equivalente à soma da produção dos outros seis maiores países produtores. O país é também o segundo mercado consumidor. Informações da ABIC mostram que, no país, foram consumidas 17 milhões sacas de café em 2007, atrás somente dos Estados Unidos. As principais regiões cafeeiras do Brasil estão concentradas no centro-sul, onde se destacam quatro estados produtores: Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo e Paraná (ABIC, 2009).

O estado do Espírito Santo se destaca principalmente na produção de café conillon. A Companhia Nacional de Abastecimento (2008) relata que o estado se encontra como o segundo maior produtor nacional de café, sendo que, para o co-

nillon, é o primeiro. De acordo com a ABIC, o país é responsável por 64,8% da produção brasileira desta variedade.

Vale ressaltar ainda a relevância do setor cafeeiro quando se analisa a geração de divisas. Desde sua chegada ao país o café foi o maior gerador de riquezas e este é o produto mais importante da história nacional. Dados do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil mostram que o país exportou 29.382.905 sacas de café, considerando o verde e o solúvel. Apesar de ser um grande exportador mundial, quando se trata de café industrializado, o Brasil está longe de alcançar países como Alemanha e Itália, maiores exportadores no setor.

Grande parte das receitas geradas pelo setor cafeeiro vem do café beneficiado. Os principais produtos de mercado do país são o café torrado e moído e o café solúvel. Dados da ABIC revelam que em 2007 o Brasil exportou 1.654.986 sacas de café solúvel, gerando uma receita de US\$ 249.218 mil.

O café instantâneo nasceu durante a Segunda Guerra Mundial. A partir de então a sua produção foi crescendo e ganhando terreno, devido à sua excelente qualidade, aroma, solubilidade (Vallejo, 2007).

O processamento do café solúvel pode ser descrito em 8 etapas. Vallejo (2007) divide o processo em: *blend* (limpeza e recepção do grão

de café), torração, moagem, extração (extração e tratamento do extrato), concentração (recuperação do aroma e concentração), secagem, aglomeração e embalagem.

No processo de concentração, primeiro faz-se uma recuperação de aromas, utilizando um evaporador de simples efeito, no qual os compostos voláteis são retirados e condensados para que possam ser reincorporados ao café desaromatizado depois de concentrado (Clarke e Vitzthum, 2001). Na segunda etapa do processo é utilizado um sistema de evaporadores de múltiplo efeito. A evaporação ocorre, geralmente, em evaporadores filme descendente (*falling film*) ou de placas. Tal processo deve ocorrer a baixas temperaturas (50 a 60°C) para evitar danos ao extrato de café, e ter três ou quatro estágios para permitir economia de energia. O extrato inicia esta etapa com aproximadamente 20% de substâncias sólidas e ao final atinge 50% de sólidos.

Os evaporadores são muito utilizados na indústria de alimentos quando se necessita concentrar soluções. Heldman e Lund (2007) ressaltam que produtos alimentícios, encontrados na forma concentrada ou em pó, geralmente são produzidos utilizando evaporadores em alguma etapa do processo. Heldman e Lund (2007) citam o uso deste equipamento na concentração de leite e na produção de açúcar. Valentas et al. (1997) e Heldman e Lund (2007) citam tais sistemas na fabricação de suco de frutas. Jinapong et al. (2007) relatam o uso de evaporadores na cadeia produtiva do leite de soja instantâneo e Valentas et al. (1997) na indústria de massa de tomate.

O objetivo primário da evaporação é remover o solvente – normalmente a água – de uma solução para aumentar a concentração de soluto (Heldman e Lund, 2007). O processo consiste basicamente na entrada de uma solução menos densa (*light*) e na produção de uma solução mais concentrada e densa (Valentas et al., 1997). O evaporador filme descendente é o mais utilizado na indústria de alimentos (Heldman e Lund, 2007; Valentas et al., 1997). Neste evaporador o líquido é introduzido no topo e desce, por gravidade, escoando sobre a área de transferência de calor. O vapor e o líquido são separados. O líquido segue para o próximo estágio e o vapor é usualmente utilizado como fonte de energia no próximo estágio, compondo assim um sistema de múltiplo efeito. Diante do exposto é possível afirmar que a grande vantagem do emprego de sistemas de evaporadores de múltiplo efeito consiste na economia de vapor verificada empregando-se esta metodologia.

O funcionamento do evaporador envolve basicamente transferência de energia, resultando em uma solução mais concentrada do que a solução original. Uma das formas de simular o processo é empregando-se modelos matemáticos. Miranda e Simpson (2003) desenvolveram um modelo matemático para evaporadores de múltiplo

plano utilizados na concentração de massa de tomate, Cuz et al. (2008) simularam o comportamento de um evaporador utilizado na concentração de licor negro proveniente do processo Kraft de produção de celulose. Elhaq et al. (1999) propuseram um modelo e realizaram o controle do processo de evaporação utilizando múltiplo-efeito na indústria de açúcar.

OBJETIVO

O objetivo deste estudo consiste em realizar a descrição matemática de um evaporador que compõe o sistema de múltiplo efeito empregado na concentração do extrato de café.

METODOLOGIA

O modelo matemático empregado neste trabalho é proposto considerando-se balanços de massa e energia. Holland (1983) descreve um modelo para um evaporador de simples efeito, considerando que: o líquido retido no evaporador encontra-se perfeitamente misturado, a retenção de vapor no evaporador é pequena diante da massa de licor retida, a retenção de energia nas paredes do equipamento é pequena, as perdas de energia para o ambiente são pequenas.

O modelo de Holland (1983) possui como equações principais as Equações 1 a 4: Balanço de energia:

$$\frac{d[\mu \cdot h(\tau, x)]}{dt} = W \cdot h(T_f, x_f) + V_0 \cdot \lambda_0 - V \cdot H(\tau) - L \cdot h(\tau, x) \quad (1)$$

Transferência de calor:

$$U \cdot A \cdot (T_0 - \tau) - V_0 \cdot \lambda_0 = 0 \quad (2)$$

Balanço de massa do componente sólido:

$$W \cdot x_f - L \cdot x = \frac{d(\mu \cdot x)}{dt} \quad (3)$$

Balanço de massa global:

$$W - V - L = \frac{d\mu}{dt} \quad (4)$$

onde: W e a vazão de alimentação de solução a ser concentrada, h é a entalpia da solução a ser concentrada, T_f é a temperatura da alimentação da solução a ser concentrada, x_f é a concentração

da alimentação da solução a ser concentrada, V_0 é a vazão de vapor vivo alimentado ao evaporador, λ_0 é o calor latente do vapor vivo, V é a vazão de vapor gerado, H é a entalpia do vapor gerado, τ é a temperatura de evaporação da solução, L é a vazão de solução que deixa o evaporador, x é a concentração de sólidos da solução que deixa o evaporador, μ é a retenção de líquido no evaporador, U é o coeficiente global de troca térmica do evaporador, A é a área de troca térmica do evaporador, T_0 é a temperatura do vapor vivo.

Cruz et al (2008) adaptou o modelo de Holland (1983) e propôs um modelo genérico para a simulação do aumento da concentração ao longo do tempo para qualquer líquido a ser concentrado. As equações adaptadas propostas por Cruz et al (2008) são descritas pelas Equações 5 a 8: Balanço de massa Global:

$$\frac{d\mu}{dt} = W - V - L \quad (5)$$

Balanço de massa para o líquido:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{W}{\mu} \cdot (x_f - x) + \frac{V}{\mu} \cdot x \quad (6)$$

Vazão de vapor gerado que deixa o evaporador:

$$V = \frac{\left(W \cdot \left[h(T_r, x_r) - h(\tau, x) - (x - x_r) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + U \cdot A \cdot (T_0 - \tau) \right)}{\left(H(\tau) - h(\tau, x) + x \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right)} \quad (7)$$

Vazão de licor que deixa o evaporador:

$$L = \frac{-\left(W \cdot (x_f - x) + V \cdot x \right) \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial \tau}{\partial x} \right) + \rho(\tau, x) \cdot (W - V)}{\rho(\tau, x)} \quad (8)$$

Para simular o comportamento de evaporadores de múltiplo efeito empregados na indústria do café ainda se faz necessário adotar relações físico-químicas que descrevem características específicas do extrato de café. Tais relações descrevem capacidade calorífica, densidade, entalpia e elevação do ponto de ebulição.

Telis-Romero et al. (2001) propuseram a Equação 9 para o cálculo de elevação do ponto de ebulição do extrato de café

$$EPE = 0,8474 \times 10^{-2} \cdot x^{0,9895} \exp(2,570 \times 10^{-2} \cdot x) \cdot P^{0,1163} \quad (9)$$

Onde P é a pressão do extrato de café em Pa.

A capacidade calorífica, a massa específica e a entalpia considerada para o extrato do café são descritas pelas Equações 10, 11 e 12 respectivamente (Valentas et al., 1997)

$$C_p = x \cdot (1549 + 1,96 \cdot \tau - 0,00594 \cdot \tau^2) + (1 - x) \cdot (4176 - 0,0909 \cdot \tau + 0,00547 \cdot \tau^2) \quad (10)$$

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{1559 - 0,31 \cdot \tau} + \frac{1}{997,2 + 0,00314 \cdot \tau - 0,00376 \cdot \tau^2}} \quad (11)$$

$$h(\tau, x) = (\tau - T_r) \cdot (1549 \cdot x + 4176 \cdot (1 - x)) + \left(\frac{\tau^2 - T_r^2}{2} \right) \cdot (1,96 \cdot x - 0,0909 \cdot (1 - x)) + \left(\frac{\tau^3 - T_r^3}{3} \right) \cdot (-0,00549 \cdot x + 0,00547(1 - x)) \quad (12)$$

Para resolução das equações, são necessárias as condições iniciais (valores de μ e x no tempo zero) e os valores dos parâmetros. Estes dados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições iniciais e parâmetros utilizados.

Variáveis	Valores
x_f	0.2
T_f	50°C
W	15000 kg/h
$U \cdot A$	3.5×10^8 J/(K.h)
T_r	0°C
T_0	100°C
P	20000 Pa

Com as equações descritas acima, as condições iniciais, os parâmetros do processo e com auxílio de ferramentas matemáticas foi proposto o modelo para simulação do funcionamento dos evaporadores de múltiplo efeito utilizados na indústria produtora de café solúvel.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de EDOs (Equações Diferenciais Ordinárias) resultante foi resolvido empregando-se o método de Runge Kutta implementado em um pacote computacional comercial.

Os resultados dinâmicos obtidos são apresentados abaixo (Figuras 1 a 5), considerando o extrato inicial com concentração de 0,2.

Na Figura 1 é apresentado o comportamento da massa de extrato de café retida (μ) no evaporador ao longo do tempo. Verifica-se que o estado estacionário do sistema é atingido após 4h de operação.

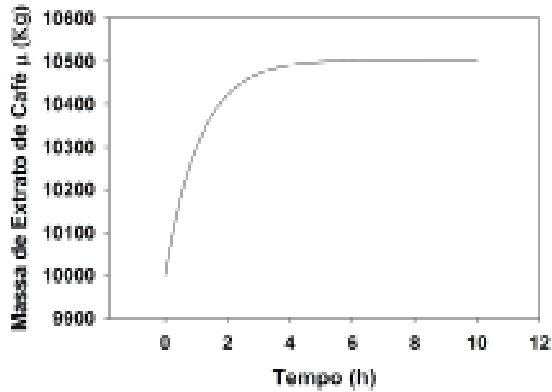


Figura 1 - Simulação da massa de extrato de café retido no evaporador (μ) ao longo do tempo.

A análise da Figura 2 evidencia que o café alimentado com 20% de sólidos sofre um acréscimo em sua concentração, deixando o sistema com cerca de 32% de substâncias sólidas, após atingir o estado estacionário. Isto representa um acréscimo de cerca de 60% em relação à concentração na qual este fluido foi alimentado ao sistema.

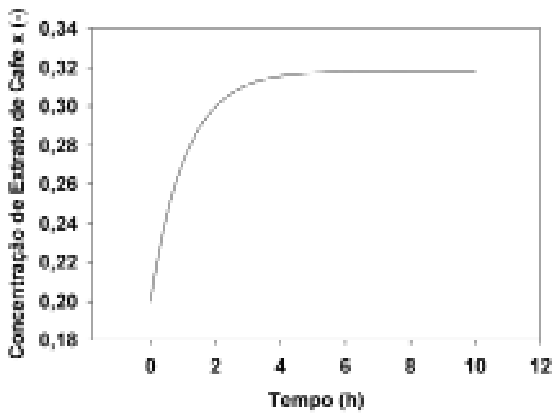


Figura 2 - Simulação da concentração do extrato de café que deixa o evaporador (x) ao longo do tempo.

Tal elevação da concentração do extrato no interior do evaporador causa um acréscimo da temperatura de ebulição deste fluido como já era previsto. Neste caso verifica-se uma temperatura máxima de ebulição igual à 62°C no estado estacionário. Este comportamento pode ser verificado analisando-se a Figura 3.

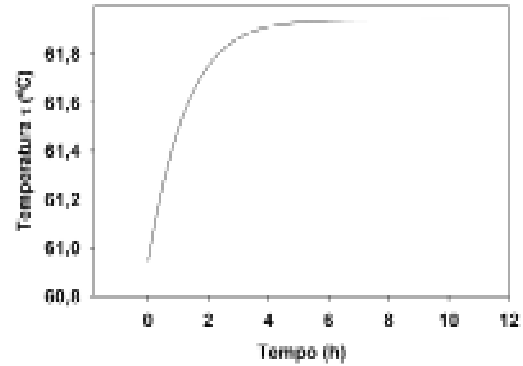


Figura 3. Simulação da temperatura de licor no interior do no evaporador (T) ao longo do tempo.

Destaca-se ainda (Figura 4), no estado estacionário, a geração de cerca de 5570 kg/h de vapor a ser usado no próximo efeito do sistema.

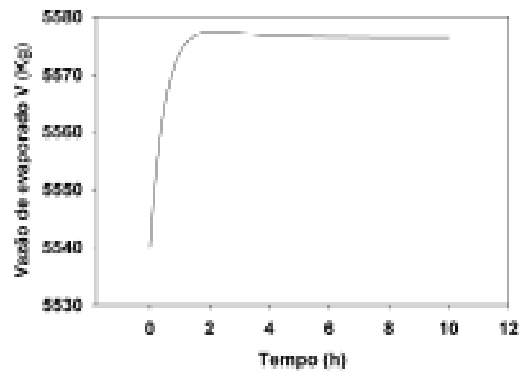


Figura 4. Simulação da vazão de vapor gerado que deixa o evaporador (V) ao longo do tempo.

Finalmente, observa-se na Figura 5 a formação de 9400 kg/h de concentrado.

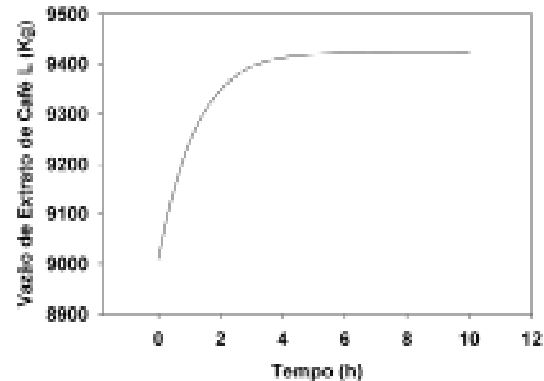


Figura 5. Simulação da vazão de extrato de café que deixa o evaporador (L) ao longo do tempo.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados acima vê-se que é possível descrever o comportamento dinâmico de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito utilizados na concentração do extrato de café, na produção de café solúvel. Sugere-se, como trabalho futuro, incorporar mais efeitos ao modelo proposto, o que tornaria a descrição do processo mais realista. Além disso, sugere-se a busca de dados operacionais reais que possibilitem a validação dos resultados obtidos. Contatos iniciais já foram realizados com indústrias produtoras de café solúvel. Estes contatos iniciais evidenciaram a preocupação do setor em resguardar dados operacionais reais que descrevem a concentração do extrato do café em sistemas de evaporadores de múltiplo efeito, neste sentido, o principal desafio identificado pelos autores consiste no estabelecimento forma de uma parceria entre estes pesquisadores e a indústria produtora de café solúvel.

NOMENCLATURA

W	Vazão de alimentação de solução a ser concentrada
h	Entalpia da solução a ser concentrada
T_f	Temperatura da alimentação da solução a ser concentrada
x_f	Concentração da alimentação da solução a ser concentrada
V_o	Vazão de vapor vivo alimentado ao evaporador
λ_o	Calor latente do vapor vivo
V	Vazão de vapor gerado
H	Entalpia do vapor gerado
τ	Temperatura de evaporação da solução
L	Vazão de solução que deixa o evaporador
x	Concentração de sólidos da solução que deixa o evaporador
μ	Retenção de líquido no evaporador
U	Coefficiente global de troca térmica do evaporador
A	Área de troca térmica do evaporador
T_o	Temperatura do vapor vivo

ρ	Massa específica do extrato de café
EPE	Elevação do ponto de ebulição do extrato de café
P	Pressão do extrato de café
C_p	Calor específico do extrato de café a pressão constante
T_r	Temperatura de referencia

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. Disponível em: < <http://www.abic.com.br> >. Acesso em 17 de fev. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO CAFÉ SOLÚVEL. Disponível em: < <http://www.abics.com.br> >. Acesso em 17 de fev. 2009.
- Clarke, J. R., Vitzthum, G.O. (Eds.) (2001) *Coffee Recent Developments*, Editora Blackwell Scienc, pp. 257.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br> >. Acesso em 17 de fev. 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ. História: Café no mundo. Disponível em: < <http://www.cncafe.com.br/conteudo.asp?id=10> >. Acesso em 17 de fev. 2009.
- CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. Disponível em: < <http://www.cecafe.com.br> >. Acesso em 17 de fev. 2009.
- Cruz, R. M., Costa, A. O. S., Costa Jr., E. F. (2007) Modelagem e Simulação de Evaporador de licor negro de celulose. Relatório de Atividades.
- Elhaq, L. S., Giri, F. Unbehauen, H. (1999) *Modeling, identification and control os sugar evaporation – theoretical desgn and expremental evaluati-on*. Control Engineering Practice. v. 7. pp. 931-942.
- Heldman, D. R., Lund, D. B. (Eds.) (2007) *Handbook of Food Engineering*, 2^a ed., Editora CRC Press, pp. 1023.
- Holland, C.D. (1983) *Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems*. McGraw, New York, USA.
- Jinapong, N., Suphantharika, M., Jammong, P. (2008) *Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized ged agglomeration*. Journal of Food Engineering. v. 84. pp. 194-205.
- Karimi, M., Jahanmiri, A., Azarmi, M. (2007) *Inferential cascade control of multi-effect falling film evaporator*. Food Control. V. 18, pp. 1036-1042.
- Miranda, V., Simpson, R. (2004) *Modelling and simulation of an industrial multiple effect evapo-*

- rator: tomato paste*. Journal of Food Engineering. v. 66. pp. 203-210.
- Moraes, I. V. M. (2006) Dossiê Técnico, Processamento de Café - Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (USP Inovação), Apostila (Resposta Técnica elaborada a partir do conteúdo do Banco de dados "SOLICITA" do SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas) pp. 19.
- Valentas, K. J., Rotstein, E., Singh, R. P. (Eds.) (1997) *Handbook of Food Engineering Practice*, Editora CRC Press, pp. 718.
- Vallejo, S. (2007) Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (USP Inovação), Apostila (Resposta Técnica elaborada a partir do conteúdo do Banco de dados "SOLICITA" do SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas) pp. 10.
- REVISTA CAFEICULTURA. Como é o processamento do café solúvel: processamento do café solúvel Disponível em: <<http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=5937>>. Acesso em 17 de fev. 2009.
- Telis-Romero, J., Cabral, F .A .R., Kronka, Z.G., Telis, N. R. V. (2001) *Elevation on Boiling point of coffee extract* . Brazilian Journal of Chemical Engineering. v. 19.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CNPq por meio do programa PIBIC da UFES.