



# DINCON 2011

## 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações

### 28 de agosto a 1º de setembro de 2011



#### MODELAGEM E SIMULAÇÃO DINÂMICA DE EVAPORADORES CONTÍNUOS

*Priscila R.S.Silva*<sup>1</sup>, *Argimiro R. Secchi*<sup>2</sup>, *Evaristo C. Biscaia Jr.*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, psantoro@peq.coppe.ufrj.br

<sup>2</sup> COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, arge@peq.coppe.ufrj.br

<sup>3</sup> COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, evaristo@peq.coppe.ufrj.br

**Resumo:** Nos evaporadores múltiplo efeito (EME) o vapor de um efeito precedente é utilizado para aquecer o evaporador posterior. Vácuo é usado após o primeiro efeito de modo a aumentar a diferença total de temperatura entre o vapor de um evaporador e a temperatura de ebulição do caldo no próximo evaporador. O objetivo principal do presente trabalho é a simulação do comportamento dinâmico de evaporadores empregados na concentração do caldo de cana-de-açúcar.

**Palavras-Chave:** dinâmica, evaporador, cana-de-açúcar.

#### 1. INTRODUÇÃO

A evaporação é uma operação unitária que pode ser executada em um ou mais evaporadores. Quando é utilizada uma cadeia de evaporadores, o produto a concentrar passa em série de um evaporador a outro e o vapor produzido na evaporação em um deles é utilizado para o aquecimento do evaporador seguinte, sendo a circulação do vapor desde o efeito de maior pressão para o de menor pressão. Assim, esse encadeamento dos evaporadores é o que se conhece como sistema múltiplo efeito.

A fim de analisar sistemas de evaporadores múltiplo efeito, modelos matemáticos têm sido propostos na literatura há várias décadas. Alguns dos trabalhos foram desenvolvidos por [2], [3], entre outros. Certos estudos propõem não a modelagem dos evaporadores e sim o controle da operação dos mesmos. Outros propõem modelos dinâmicos, com balanços de energia em termos de entalpia, sendo os modelos constituídos por equações algébrico-diferenciais. Contudo, há também autores que propõem modelos no estado estacionário. Neste grupo, há trabalhos como os de [4] e [5] que utilizam correlações empíricas para a determinação da elevação do ponto de ebulição da solução a ser evaporada.

As aplicações mais frequentes dos evaporadores são para concentração de suco de frutas, assim como concentração do licor negro, proveniente da indústria de papel e celulose, sendo, portanto, raros os trabalhos que modelam a troca térmica adequadamente e com aplicação em biorrefinarias.

Assim, a contribuição do presente trabalho é aplicar o modelo de evaporadores múltiplo efeito na concentração do caldo de cana sem a necessidade de considerar uma

correlação para a elevação do ponto de ebulição. Além disso, serão propostos dois modelos: um em que se considera a inserção de uma fonte de calor no sistema, como em um *flash*, e outro modelo em que se leva em consideração a modelagem do fenômeno da transferência de calor.

#### 2. METODOLOGIA

A simulação dos modelos desenvolvidos foi realizada pelo uso do simulador de processos EMSO (*Environment for Modeling Simulation and Optimization*). A linguagem usada nesse simulador é uma linguagem objeto-orientada que permite ao usuário desenvolver modelos complexos pela composição de modelos mais simples. Uma das vantagens do EMSO é a sua característica modular em relação às equações do modelo.

Neste trabalho foi usado o EMSO e o VRTherm que é um *software* capaz de prever propriedades termodinâmicas e físicas de misturas complexas. Como o caldo da cana é formado por substâncias que não são muito frequentes na maioria dos processos químicos e petroquímicos, foi necessária uma busca das propriedades desses componentes e a sua inserção no VRTherm.

A metodologia seguida para a execução do trabalho foi:

- Busca pelas propriedades termodinâmicas dos componentes do caldo da cana;
- Ajuste, no Matlab™, das propriedades encontradas para que se adequassem aos modelos existentes no VRTherm;
- Inserção dos novos componentes no VRTherm;
- Definição do tipo de evaporador e das hipóteses simplificadoras;
- Implementação dos modelos no EMSO.

A composição do caldo da cana varia de acordo com os seguintes fatores: variedade da cana, estado de maturação, clima, idade e tipo de solo. Em relação aos sólidos solúveis, a composição dos caldos varia dentro dos limites indicados na Tabela 1.

**Tabela 1. Teor médio de sólidos solúveis nos caldos de cana-de-açúcar [1].**

Componentes do caldo	Teor (% em massa)
Áçúcares	75 a 93
- Sacarose	70 a 91
- Glicose	2 a 4
- Frutose	2 a 4
Sais	3 a 5
Ácidos inorgânicos	1,5 a 4,5
Ácidos orgânicos	1 a 3
Proteínas	0,5 a 0,6
Amido	0,001 a 0,05
Gomas	0,3 a 0,15
Ceras e graxas	0,05 a 0,15
Corantes e outros	3 a 5

Os componentes do caldo da cana que foram considerados para a simulação são: amônia, etanol, água, ácido acético, 3-metil-1-butanol, furfural, etileno glicol, ácido succínico e glicerol. Tais componentes já se encontravam disponíveis no VRTherm. Além desses componentes, a dextrose, xilose, sacarose, sólidos dissolvidos, celulose, xilana, lignina, celulase, biomassa, enzima e gipsita foram inseridos no VRTherm.

Uma grande contribuição desse trabalho consiste no tratamento termodinâmico dos componentes do caldo, através dos balanço de energia que considerou a capacidade calorífica e a pressão de vapor de cada componente do caldo.

### 3. MODELAGEM DOS EVAPORADORES

Dois tipos de evaporadores foram estudados, apresentando modelos dinâmicos e concentrados, não apresentando variação espacial das variáveis. Além disso, ambos os modelos são constituídos por equações algébrico-diferenciais de índice diferencial igual a um.

As propriedades do caldo da cana interferiram na modelagem e na simulação. Como o caldo é constituído também por sólidos, foram feitos balanços de massa separados para os componentes líquidos e/ou dissolvidos e para os componentes sólidos. Assim, na saída dos evaporadores há duas correntes: uma é vapor e a outra é líquida com a presença de sólidos dissolvidos ou dispersos.

O equilíbrio termodinâmico ocorre apenas entre as fases vapor e líquida para cada componente. A fase vapor foi considerada ideal.

As equações comuns a ambos os modelos estão detalhadas abaixo.

- Balanço de massa por componente líquido e sólido dissolvido:

$$\frac{dn}{dt} = F_0 \cdot (1 - u_0) \cdot z_0 - F \cdot (1 - u) \cdot x - V \cdot y \quad (1)$$

- Balanço de massa por componente sólido não dissolvido:

$$\frac{dns}{dt} = F_0 \cdot u_0 \cdot w_0 - F \cdot u \cdot w \quad (2)$$

- Balanço de energia:

$$\frac{dE}{dt} = F_0 \cdot (1 - u_0) \cdot h_{L0} + F_0 \cdot u_0 \cdot h_{S0} - F \cdot (1 - u) \cdot h_L - V \cdot h_V - F \cdot u \cdot h_S + Q \quad (3)$$

- Restrições algébricas:

$$n = NL \cdot x + NV \cdot y \quad (4)$$

$$ns = NS \cdot w \quad (5)$$

$$E = NL \cdot h_L + NV \cdot h_V + NS \cdot h_S - P \cdot V_{evap} \quad (6)$$

- Equações adicionais:

$$u = \frac{NS}{NL + NS} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{NV}{NL + NV + NS} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{V}{F} \quad (9)$$

$$\sum_i x_i = \sum_i y_i = 1 \quad (10)$$

$$\sum_i w_i = 1 \quad (11)$$

$$\Delta P = P_0 - P \quad (12)$$

$$V = NL \cdot v_L + NV \cdot v_V + NS \cdot v_S \quad (13)$$

- Equilíbrio químico:

$$\phi_i^L(T, P, x_i) \cdot x_i = \phi_i^V(T, P, y_i) \cdot y_i \quad (14)$$

- Equilíbrio Térmico:

$$T_V = T_L \quad (15)$$

- Equilíbrio Mecânico:

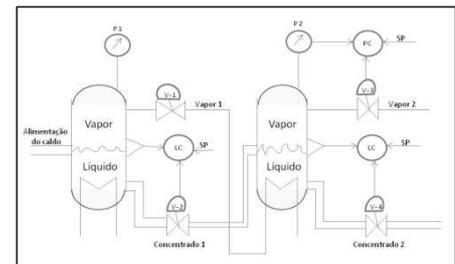
$$P_V = P_L \quad (16)$$

Outra característica de ambos os modelos é a presença de um sistema de controle *feedback*. O controle do nível foi considerado em cada evaporador e o controle de pressão foi apenas considerado no último evaporador. Ambos os controles, de nível e de pressão, foram do tipo PID, estando conjuntas as ações proporcional, integral e derivativa.

Abaixo serão mostradas as peculiaridades de cada evaporador.

#### 3.1. Evaporador do tipo flash

O aquecimento desse tipo de evaporador é feito por uma serpentina, sendo, portanto, especificado o calor fornecido ao sistema. A consideração de mistura perfeita foi feita para a modelagem desse tipo de evaporador. A Figura 1 mostra o esquema desse tipo de evaporador.



**Fig. 1. Funcionamento de um evaporador do tipo flash.**

### 3.2. Evaporador do tipo falling film

Esse tipo de evaporador apresenta um feixe de tubos verticais igualmente espaçados. Assim, vapor é inserido no interior dos tubos e o caldo da cana é alimentado na carcaça do evaporador, preenchendo os espaços entre os tubos. A Figura 2 mostra um esquema de um evaporador do tipo fluxo descendente.

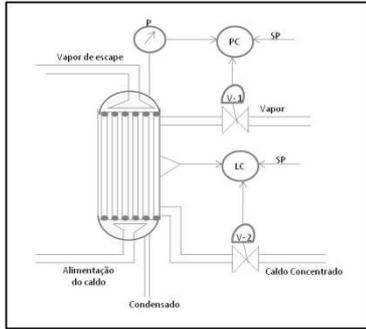


Fig. 2. Esquema do funcionamento de um evaporador do tipo fluxo descendente ou falling film.

O fenômeno da troca térmica de um evaporador do tipo filme descendente ocorre entre o vapor no interior dos tubos e o caldo da cana presente na carcaça do evaporador. Assim, o nível do caldo é importante para a determinação da área de troca térmica que é função do volume de líquido no evaporador.

O calor trocado no sistema depende do coeficiente global de transferência de calor, da área de troca térmica e da diferença entre as temperaturas do vapor e do caldo. As equações referentes à troca térmica estão descritas abaixo:

$$h_c = \frac{0,023 \cdot Re_c^{0,8} \cdot Pr_c^{0,33} \cdot k_c}{H} \quad (17)$$

$$h_w = \frac{2 \cdot k_{aço}}{(N_t \cdot D_e \cdot \ln(\frac{D_e}{D_i}))} \quad (18)$$

$$h_i = \frac{0,925 \cdot k_V}{L} \cdot \left( \frac{L^3 \cdot \rho_V^2 \cdot g \cdot \pi \cdot D_i}{\mu_V \cdot V \cdot (\sum_i \gamma_{0i} \cdot MM_i)} \right)^{1/3} \quad (19)$$

$$U = \frac{1}{\left( \frac{1}{h_w} + \frac{D_e}{h_i \cdot D_i} + \frac{D_e \cdot L_V}{D_i} + I_C + \frac{1}{h_c} \right)} \quad (20)$$

$$A_t = N_t \cdot \pi \cdot D_e \cdot H \quad (21)$$

$$Q = U \cdot A_t \cdot (T_V - T) \quad (22)$$

As propriedades do caldo da cana, como a condutividade térmica, densidade, viscosidade absoluta, capacidade calorífica e volume molar são equações algébricas dependentes da temperatura, pressão e composição. Essas propriedades foram determinadas pelo VRTherm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Evaporadores múltiplo efeito

O sistema de evaporação múltiplo efeito, nesse caso, foi formado por dois evaporadores do tipo flash. A Figura 3 mostra a variação da concentração da sacarose em cada

evaporador ao longo do tempo. É possível notar uma maior concentração da sacarose ao se introduzir o segundo efeito. Além disso, após a perturbação na pressão mais água é evaporada, contribuindo para o aumento da concentração da sacarose.

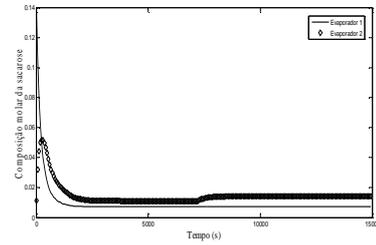


Figura 3. Variação da concentração molar da sacarose com o tempo.

Com a diminuição da pressão há diminuição da temperatura no interior do evaporador, promovendo a ebulição da água a uma temperatura menor. Assim, com a diminuição da temperatura e da pressão no segundo efeito, consegue-se maior concentração do caldo. As Figuras 4 e 5 mostram o comportamento da temperatura e da pressão em cada um dos efeitos.

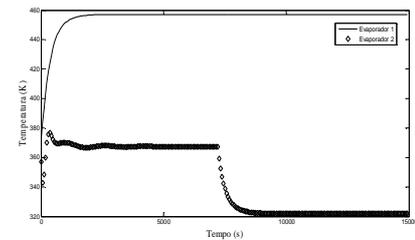


Figura 4. Variação da temperatura do caldo com o tempo em cada um dos efeitos.

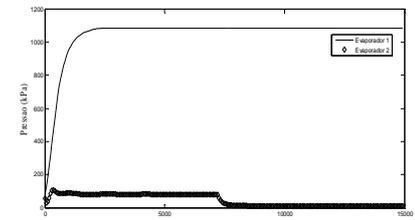


Figura 5. Variação da pressão em cada um dos efeitos com o tempo.

A fração vaporizada e o volume molar das fases também são afetados pela pressão. Nesse sistema de evaporadores também foi feita uma perturbação na pressão. Nas Figuras 6 e 7 são mostrados os efeitos da perturbação na pressão nas variáveis acima citadas.

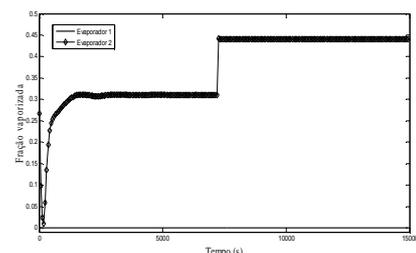


Figura 6. Fração vaporizada em cada um dos efeitos.

A Figura 6 mostra que a fração vaporizada no primeiro efeito é bem menor que no segundo, ou seja, como o segundo efeito apresenta uma menor pressão, mais vapor é formado no evaporador. Assim, é esperado que o volume molar da fase vapor aumentasse de um efeito a outro, especialmente após a queda de pressão imposta pela perturbação, como é mostrado na Figura 7.

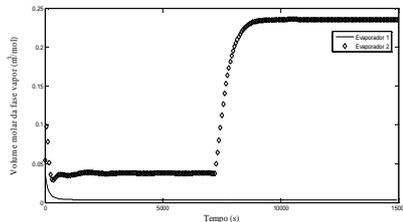


Figura 7. Volume molar da fase vapor em cada evaporador.

#### 4.2. Comparação entre os evaporadores único efeito

A Figura 8 mostra o resultado da variação da concentração de sacarose, uma vez que é um dos principais constituintes do caldo da cana. No gráfico é mostrada essa variação para os dois tipos de evaporadores considerados.

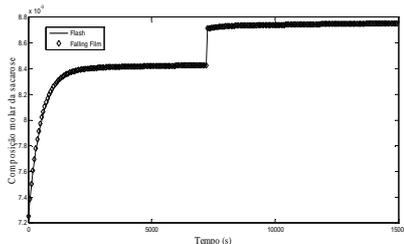


Figura 8. Variação da concentração molar da sacarose com o tempo.

A presença de mais efeitos favorecerá uma maior concentração do caldo.

Além dos componentes líquidos e sólidos dissolvidos, há também os componentes sólidos que contribuem para a concentração do caldo da cana, como a biomassa.

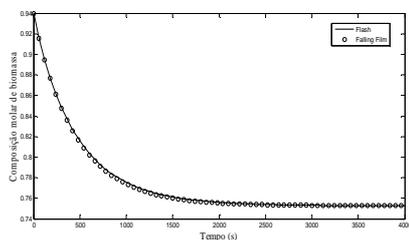


Figura 9. Variação da concentração molar de biomassa com o tempo.

O evaporador tipo *flash* recebe calor a uma potência especificada. Já o modelo para o evaporador do tipo fluxo descendente realiza o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, assim como da área de troca térmica que depende do nível de caldo no evaporador. Dessa forma, a potência fornecida só é a mesma para os dois evaporadores ao se atingir o estado estacionário. Em regime transiente, há

diferença entre as taxas de calor fornecidas. A Figura 10 mostra essa diferença.

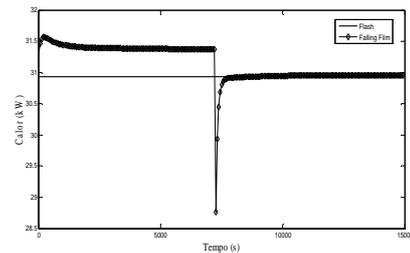


Figura 10. Variação da energia fornecida ao caldo a ser evaporado com o tempo.

## 5. CONCLUSÃO

O comportamento dos evaporadores múltiplo efeito foi o esperado para a variação da pressão, da temperatura e fração molar. Como a pressão do segundo efeito é menor que a do primeiro, a água presente no caldo inicia a ebulição a uma temperatura menor. Assim, mais vapor é gerado, sendo possível constatar pelo comportamento da fração vaporizada. A fração molar da sacarose na saída do segundo evaporador, temperatura e pressão da corrente de saída do segundo efeito da mesma forma que a fração vaporizada sofreram mudanças após a perturbação no *Set Point* da pressão.

A comparação realizada entre os evaporadores único efeito se mostrou satisfatória, pois ambas as simulações geraram os mesmos resultados. Contudo, a taxa de calor ( $Q$ ) em cada um dos evaporadores somente apresentaram os mesmos valores no estado estacionário. No regime transiente, as taxas são diferentes, pois no evaporador tipo *flash* a taxa é especificada. Já no evaporador tipo *falling film* a taxa de calor depende do nível do caldo e das temperaturas do vapor e do caldo da cana. A modelagem do fenômeno da transferência de calor é mais vantajosa, pois basta especificar as variáveis temperatura e pressão do vapor de aquecimento que são variáveis mais fáceis de mensurar do que a potência.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado e aos meus orientadores por suas sugestões e pelo incentivo.

## REFERÊNCIAS

- [1] M.O.S. Dias, *Simulação do processo de produção de etanol visando à integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço*. Dissertação de M.Sc., PPG/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
- [2] QUAACK, P.; WIJCK, M.P.C.M., et al. "Comparison of Process Identification and Physical Modelling for Falling-Film Evaporators", *Food Control*, v.5, n. 2, pp. 73-82, 1994.
- [3] ALY, N.H.; MARWAN, M.A. "Dynamic Response of Multi-Effect Evaporators", *Desalination*, v.114, pp. 189-196, 1997.
- [4] EL-DESSOUKY, H.; ALATIQUI, I., et al. "Steady-State Analysis of the Multiple Effect Evaporation Desalination Process", *Chem. Eng. Technol.*, v.21, n.5, pp. 437-451, 1998.
- [5] BHARGAVA, R.; KHANAM, S., et al. "Simulation of Flat Falling Film Evaporator System for Concentration of Black Liquor", *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, pp. 3213-3223, 2008.