

## MODELAGEM MATEMÁTICA DAS ETAPAS DE EVAPORAÇÃO, FERMENTAÇÃO E DESTILAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL NO APLICATIVO EMSO

G. C. FONSECA, F. F. FURLAN, R. C. GIORDANO, C. B. B. COSTA e A. J. G. CRUZ

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: gabrieldcf@gmail.com

**RESUMO** – Este trabalho teve como objetivo implementar no simulador de processos EMSO as etapas de evaporação, fermentação contínua e destilação de uma unidade autônoma de produção de etanol. A simulação foi realizada tomando-se por base o processamento de 500 toneladas por hora de cana-de-açúcar. O caldo proveniente das etapas de extração e tratamento é concentrado em um evaporador. Na sequência é resfriado e alimenta um sistema de quatro dornas conectadas em série que operam em regime permanente. Na saída da última dorna o vinho é centrifugado e enviado para destilação. O creme de levedura segue para cuba de tratamento, sendo reciclado (processo Melle-Boinot). O excesso de levedura é purgado do sistema. Na saída da centrífuga, o vinho delevedurado é enviado ao sistema de destilação. Obteve-se produção de  $34,4 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$  de etanol a 93,8% (INPM). Nas condições simulada o processo atingiu uma produtividade de  $9,0 \text{ kg}_{\text{etanol}}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

### 1. INTRODUÇÃO

A partir de 1975, com o lançamento do Programa ProÁlcool, o Brasil deu início a produção de etanol em larga escala. Na última safra a produção foi estimada em 23,49 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2013). Com a popularização dos veículos bicombustíveis, a indústria sucroalcooleira tem se tornado uma fornecedora de energia cada vez mais importante para a matriz energética brasileira, não apenas oferecendo o bioetanol em alternativa à gasolina como combustível para veículos leves, mas também como fonte complementar na geração de energia elétrica através da queima do bagaço, um subproduto do processo. O etanol produzido a partir de matérias-primas fermentescíveis é denominado de etanol de primeira geração.

Além disso, o futuro pode trazer ainda o etanol de segunda geração, sintetizado a partir de materiais lignocelulósicos. A utilização do bagaço levanta questões complexas como qual o destino mais adequado para esse subproduto: a cogeração de eletricidade ou a produção de etanol de segunda geração. Furlan *et al.* (2012) abordaram esta questão resolvendo um problema complexo de otimização de uma destilaria autônoma de etanol de primeira e segunda geração no simulador EMSO. Nesse trabalho os autores simplificaram a etapa de fermentação, representando-a por um reator estequiométrico.

O presente trabalho objetivou implementar no simulador de processos EMSO as etapas de evaporação, fermentação contínua e destilação de uma unidade autônoma de produção de

etanol. Na fermentação empregou-se modelo fenomenológico com cinética proposta por Lee *et al.*, 1983.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O simulador de processos EMSO (*Environment for Modeling Simulation and Optimisation*) vem sendo utilizado no projeto temático da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar, no qual este trabalho se insere, e que consiste em um esforço coordenado de diferentes grupos de pesquisa para desenvolver uma simulação de uma usina de etanol de primeira geração que permita comparar e otimizar diferentes rotas tecnológicas empregadas na produção de açúcar, álcool e energia elétrica (Bonomi, 2012).

O EMSO é um simulador de processos dinâmico, orientado a equações e com linguagem de modelagem com elementos de orientação a objetos como composição e herança e facilmente extensível com *plugins* para rotinas externas (Soares e Secchi, 2003). Essa funcionalidade foi utilizada por Furlan *et al* (2012) para desenvolver um interpolador multilinear para simular as colunas de destilação A-A1-D e B1-B empregadas no processo de produção de etanol hidratado. Este modelo foi utilizado neste trabalho, bem como o modelo do evaporador.

A configuração do sistema de fermentação implementado neste trabalho tomou por base aquela definida por Andrietta (1994). O autor modelou o processo de fermentação contínuo, com reciclo de células, empregando modelo cinético proposto por Lee *et al.*, 1983 (Equação 1).

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \left( \frac{C_S}{C_S + K_S} \right) \cdot \left( 1 - \frac{C_P}{C_P^*} \right)^n \cdot \left( 1 - \frac{C_X}{C_X^*} \right)^m \quad (1)$$

Foram implementados os balanços de massa no estado estacionário para célula, substrato e produto. A Tabela 1 apresenta os valores dos principais parâmetros utilizados nas simulações.

**Tabela 1 – Valores dos parâmetros empregados na simulação**

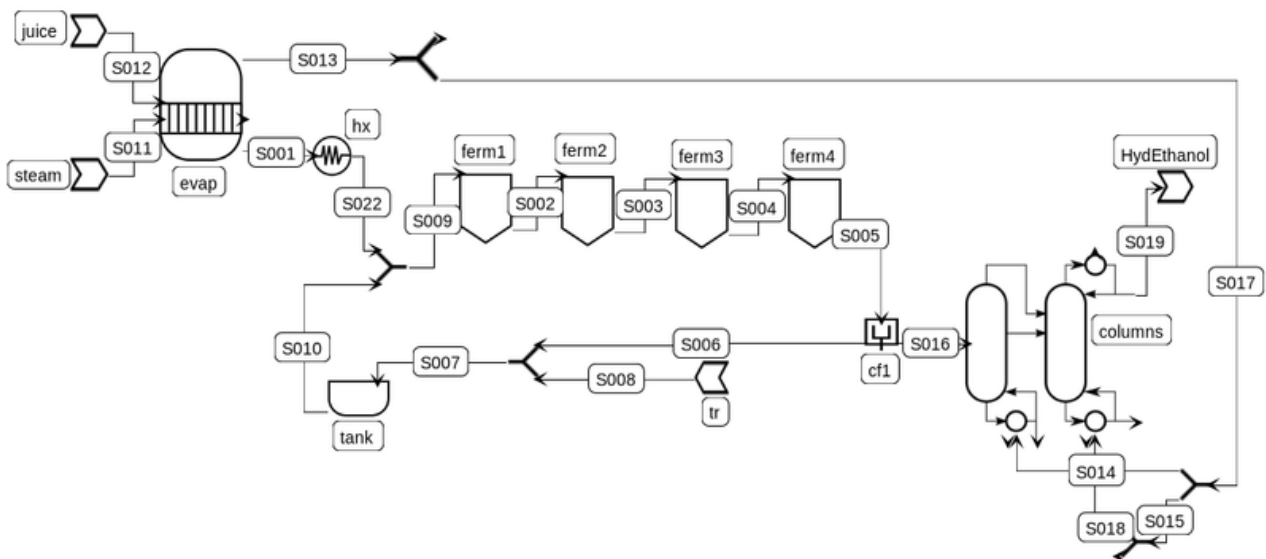
| $\mu_{\max}$ (h <sup>-1</sup> ) | $C_P^*$ (g·L <sup>-1</sup> ) | $C_X^*$ (g·L <sup>-1</sup> ) | $n$ (-) | $m$ (-) | $K_S$ (g·L <sup>-1</sup> ) | $Y_{P/S}$ (g <sub>P</sub> ·g <sub>S</sub> <sup>-1</sup> ) | $Y_{X/S}$ (g <sub>X</sub> ·g <sub>S</sub> <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|---------|----------------------------|---|---|
| 0,41                            | 103,0                        | 100,0                        | 3       | 1       | 1,6                        | 0,445   | 0,033   |

As condições operacionais da simulação foram definidas para uma destilaria autônoma processando 500 toneladas por hora de cana-de-açúcar. Os dados da corrente de entrada são descritos por Furlan *et al.* (2012). Para os fermentadores optou-se por reproduzir a configuração proposta por Andrietta (1994), que consistia de quatro fermentadores contínuos em série cujos volumes individuais em relação ao volume total são respectivamente de 21%, 27%, 31% e 21%. Esses valores objetivaram maximizar a produtividade de etanol. Estes dados são mostrados na Tabela 2.

A simulação implementada em forma de fluxograma no simulador EMSO está ilustrada na Figura 1.

**Tabela 2 – Dados empregados nas simulações**

|  |       |
|--|-------|
| Vazão de alimentação de caldo no evaporador ( $t \cdot h^{-1}$ )           | 514   |
| Concentração de sacarose na entrada do evaporador ( $g \cdot L^{-1}$ )     | 135   |
| Área do evaporador ( $m^2$ )   | 1.930 |
| Concentração de sacarose na entrada do 1º fermentador ( $g \cdot L^{-1}$ ) | 144,2 |
| Vazão de mosto na entrada do 1º fermentador ( $t \cdot h^{-1}$ )           | 476   |
| Volume total dos quatro fermentadores ( $m^3$ )                            | 3.800 |
| Vazão de creme de levedura (reciclo) ( $t \cdot h^{-1}$ )                  | 85,5  |



**Figura 1 – Fluxograma implementado no EMSO para simulação do processo.**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O caldo proveniente das etapas de extração e tratamento, é concentrado no evaporador de  $135 \text{ g L}^{-1}$  a  $180 \text{ g L}^{-1}$  (concentração de sacarose). Após mistura com o creme de levedura, corrente recirculada no processo, alimenta a primeira dorna a vazão de  $476 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ . Na corrente de saída a concentração de sacarose é de  $142,5 \text{ g L}^{-1}$  e a concentração de células de  $21,8 \text{ g L}^{-1}$ . Assume-se que a sacarose é convertida a glicose no interior das dornas segundo uma cinética de primeira ordem com velocidade muito mais rápida que as demais reações. Os valores das concentrações de substrato e a conversão cumulativa são mostrados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Valores das concentrações de substrato e da conversão na saída de cada dorna**

| Dorna | $C_X \text{ (g L}^{-1}\text{)}$ | $C_S \text{ (g L}^{-1}\text{)}$ | $C_P \text{ (g L}^{-1}\text{)}$ | $X_S \text{ (-)}$ |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1     | 24,4                            | 67,6                            | 42,0                            | 0,502             |
| 2     | 25,7                            | 30,8                            | 58,6                            | 0,811             |
| 3     | 25,9                            | 9,02                            | 66,8                            | 0,932             |
| 4     | 25,8                            | 1,83                            | 69,3                            | 0,986             |

Pela razão entre a concentração final de etanol e o tempo de residência do sistema, que foi de 7,7 h, determinou-se a produtividade do sistema. Obteve-se valor de  $9,0 \text{ kg}_{\text{etanol}} \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . O vinho que deixa a quarta dorna é centrifugado e enviado para o sistema de destilação. Na saída da coluna obteve-se produção total de  $34,4 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$  de etanol a 93,8% (INPM).

#### 4. CONCLUSÕES

Os modelos das etapas de evaporação, fermentação, e destilação foram todos integrados na plataforma EMSO. Com este modelo é possível realizar simulações em diferentes condições operacionais de forma a prever o comportamento da destilaria. Os modelos desenvolvidos neste trabalho serão utilizados no projeto da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar, servindo a ferramentas de otimização e controle em tempo real ou projeto de processos químicos na indústria sucroalcooleira.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Projeto Temático 2011/51902-9), à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro para realização deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

ANDRIETTA, S. R. Modelagem, simulação e controle de fermentação alcoólica contínua em escala industrial. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1994.

BONOMI, A. M. F. L. J. Simulação da biorrefinaria de cana-de-açúcar de 1ª geração na plataforma EMSO. Processo FAPESP 2011/51902-9, 2012.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira – Cana-de-açúcar. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_04\\_09\\_10\\_30\\_34\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_abril\\_2013\\_4o\\_lev.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_30_34_boletim_cana_portugues_abril_2013_4o_lev.pdf)>, 2013.

FURLAN, F. F.; COSTA, C. B. B.; FONSECA, G. C.; SOARES, R. P.; SECCHI, A. R.; CRUZ, A. J. G.; GIORDANO, R. C. Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. *Computers and Chemical Engineering*, v. 43, p. 1-9, 2012.

LEE, J. M.; POLLARD, J. F.; COULMAN, G.A. Ethanol fermentation with cell recycling: computer simulation. *Biotechnol. Bioeng.*, 25, p. 497-511, 1983.

SOARES, R. P.; SECCHI, A. R. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation. *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 14, i. C, p. 947-952, 2003. DOI: 10.1016/S1570-7946(03)80239-0.