



XXII CONGRESSO
BRASILEIRO DE
ENGENHARIA QUÍMICA
23 a 26 de Setembro de 2018
Hotel Maksoud Plaza
São Paulo – SP



XVII ENCONTRO BRASILEIRO
SOBRE O ENSINO DE
ENGENHARIA QUÍMICA
27 a 28 de Setembro de 2018
USP
São Paulo – SP

AVALIAÇÃO DO ARRASTE DE ETANOL POR CO₂ EM DIFERENTES MODELOS DE REATORES PNEUMÁTICOS

MARTINS T B¹, ALMEIDA L P¹, CERRI M O² e BADINO A C¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química.

² Universidade Estadual Paulista, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia.

E-mail para contato: taise.bonfm@gmail.com

RESUMO – A remoção de etanol por arraste gasoso tem sido investigada para minimizar os efeitos inibitórios do etanol sobre a levedura durante a fermentação alcoólica. No presente estudo, foi avaliado o arraste gasoso de etanol por CO₂ em diferentes modelos de reatores pneumáticos. O reator tipo airlift de cilindros concêntricos foi o que apresentou o melhor resultado em termos de remoção de etanol quando se utilizou uma maior vazão específica de CO₂.

1. INTRODUÇÃO

O processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar se encontra bem estabelecido nas destilarias brasileiras. Entretanto, durante a fermentação alcoólica ocorre a inibição da levedura *Saccharomyces cerevisiae* pelo próprio produto de interesse, resultando em menor produção de etanol, devido à redução da viabilidade celular e, consequentemente, em menor produtividade do processo (SONEGO *et al.*, 2016).

Nesse sentido, o uso de arraste gasoso tem sido investigado para a remoção do etanol do caldo através do borbulhamento de um gás inerte, de forma a minimizar os impactos do efeito inibidor do etanol e se obter ganhos em termos de produtividade em comparação com a fermentação convencional. O desempenho do processo de arraste do etanol depende principalmente de uma transferência eficiente de massa líquido-gás dentro do biorreator. Reatores pneumáticos são conhecidos por proporcionar alta transferência de massa. A movimentação do líquido nessa classe de biorreatores não convencionais pode ocorrer de forma aleatória (reatores tipo coluna de bolhas) ou em um circuito bem definido por meio de arranjos internos construídos especialmente para este propósito (reatores tipo *airlift*) (MENDES, 2016). Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a remoção de etanol a partir de uma solução hidroalcoólica por meio de arraste gasoso em diferentes modelos de reatores pneumáticos, utilizando o CO₂ como gás de arraste.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aparato e Procedimento Experimental

Os experimentos para estudo do arraste de etanol foram conduzidos utilizando-se uma solução hidroalcoólica com concentração 80 g.L⁻¹ (10% v.v⁻¹) em reatores pneumáticos encamisados com volume útil de 2 L. Os modelos de reatores estudados incluem o coluna de

colhas (CB), o *airlift* de cilindros concêntricos (ACC) e o reator *airlift split-cylinder* (ASC). A Figura 1 mostra uma representação dos biorreatores empregados.



Figura 1 - a) Reator pneumático tipo coluna de bolhas; b) Reator *airlift* de cilindros concêntricos; c) Reator *airlift* do tipo *split-cylinder*.

Fonte: Mendes, 2016.

A fase gasosa utilizada foi o dióxido de carbono (CO₂) armazenado em cilindro comercial, sendo a vazão controlada por um fluxômetro de massa da marca AALBORG modelo GFC 37. A temperatura dos ensaios foi fixada em 34 °C e controlada por um banho termostático. O monitoramento foi feito através de um termômetro digital imerso na solução hidroalcoólica.

Foram realizados 6 experimentos de remoção de etanol por arraste gasoso variando a vazão específica de CO₂ (ϕ) e o modelo do reator pneumático: E1 (CB e $\phi=1,0$ vvm), E2 (CB e $\phi=2,0$ vvm), E3 (ACC e $\phi=1,0$ vvm), E4 (ACC e $\phi=2,0$ vvm), E5 (ASC e $\phi=1,0$ vvm) e E6 (ASC e $\phi=2,0$ vvm). Cada ensaio de arraste gasoso teve duração de 6 h, sendo que o volume da fase líquida foi medido a cada 1 hora. Amostras de 2 mL foram retiradas para a determinação da concentração de etanol no líquido (C_E), a qual foi realizada por espectroscopia de infravermelho médio com transformada de Fourier (FT-MIR).

2.3. Tratamento de Dados

A remoção de etanol foi avaliada a partir dos parâmetros fator de arraste de etanol (F_{AE}), fator de arraste de água (F_{AW}), constante de velocidade de arraste de etanol (k_E) e constante de velocidade de arraste de água (k_W). Os fatores de arraste F_{AE} e F_{AW} foram calculados através das Equações 1 e 2:

$$F_{AE} = \frac{C_{E0} \cdot V_0 - C_{EF} \cdot V_F}{C_{E0} \cdot V_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$F_{AW} = \frac{C_{W0} \cdot V_0 - C_{WF} \cdot V_F}{C_{W0} \cdot V_0} \cdot 100 \quad (2)$$

onde C_E é a concentração de etanol na solução (g.L^{-1}), C_W é a concentração de água na solução (g.L^{-1}) e V é o volume da solução hidroalcoólica (L). Os subscritos “0” e “F” se referem aos tempos inicial e final, respectivamente.

O modelo matemático empregado para descrever a remoção de etanol e água por arraste gasoso foi proposto por Rodrigues *et al.* (2018) e é descrito pelas Equações 3, 4 e 5.

$$\frac{dC_E}{dt} = -\left(k_E + \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt}\right) \cdot C_E \quad (3)$$

$$\frac{dC_W}{dt} = -\left(k_W + \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt}\right) \cdot C_W = -\left(k_W + \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt}\right) \cdot (\rho_s - \rho_E) \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{\rho_s} \cdot (k_E \cdot C_E + k_W \cdot C_W) \quad (5)$$

Os parâmetros k_E e k_W foram determinados utilizando o método de regressão não-linear de Nelder e Mead, juntamente com o algoritmo de Runge-Kutta para solução numérica das equações diferenciais que representam o modelo (Equações 3 a 5).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 2 encontram-se os valores das concentrações de etanol (C_E) e água (C_W) no decorrer do experimento, determinadas para os ensaios de arraste gasoso nos modelos de reatores pneumáticos estudados.

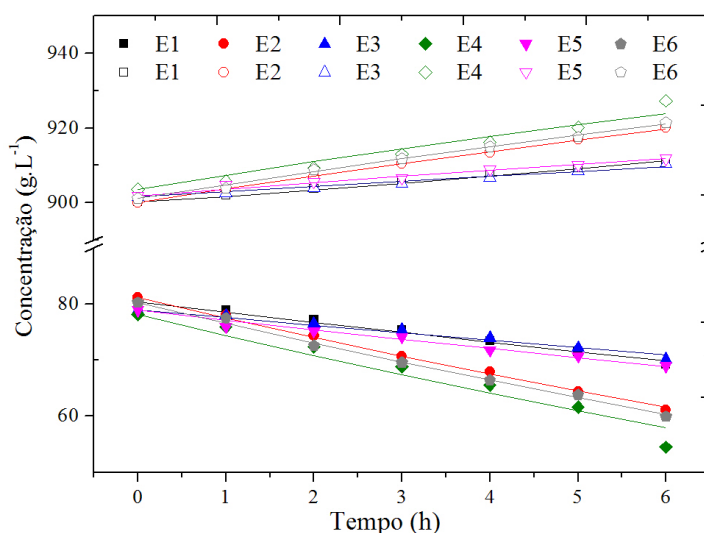


Figura 2- Dados simulados (linhas) e Dados experimentais para C_E (símbolo fechado) e C_W (símbolo aberto) durante os ensaios de arraste por CO_2 .

Observando-se a Figura 2, verifica-se que o arraste do etanol prevaleceu sobre o arraste da água, uma vez que houve uma redução da concentração de etanol e um pequeno aumento da concentração de água ao longo dos ensaios. Esses resultados comprovam o potencial do arraste gasoso por CO_2 para controlar o efeito de inibição do etanol sobre a



XXII CONGRESSO
BRASILEIRO DE
ENGENHARIA QUÍMICA
23 a 26 de Setembro de 2018
Hotel Maksoud Plaza
São Paulo – SP



XVII ENCONTRO BRASILEIRO
SOBRE O ENSINO DE
ENGENHARIA QUÍMICA
27 a 28 de Setembro de 2018
USP
São Paulo – SP

levedura durante a fermentação alcoólica.

A Tabela 1 apresenta os valores de F_{AE} , F_{AW} , k_E e k_W obtidos durante os experimentos de arraste de etanol a partir de uma solução hidroalcoólica.

Tabela 1 – Parâmetros obtidos para os ensaios de remoção do etanol por arraste gasoso

Experimento	ϕ (vvm)	Modelo do reator	k_E (h^{-1})	k_W (h^{-1})	F_{AE} (%)	F_{AW} (%)
1	1,0	CB	0,0324	0,00712	18,00	3,68
2	2,0	CB	0,0581	0,00858	32,31	5,09
3	1,0	ACC	0,0248	0,00548	14,75	3,11
4	2,0	ACC	0,0630	0,00954	35,50	5,23
5	1,0	ASC	0,0295	0,00500	16,17	3,00
6	2,0	ASC	0,0590	0,00794	30,25	4,56

Dos resultados da Tabela 1, observar que para uma vazão específica de CO_2 de 1 vvm, o biorreator tipo coluna de bolhas (CB) foi o que permitiu a obtenção de maiores valores de k_E e F_{AE} . Por outro lado, quando se empregou uma vazão de 2 vvm, o melhor arraste gasoso do etanol foi promovido pelo reator *airlift* de cilindros concêntricos (ACC). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a vazão de 1 vvm não foi capaz de levar a dispersão gás-líquido a um escoamento descendente, suficiente para aumentar a retenção gasosa e, conseqüentemente, aumentar a transferência de massa. Assim, o uso de uma vazão maior, no caso do reator ACC, possibilitou o aumento da retenção gasosa na região de descida, o que se refletiu nos maiores valores de k_E e F_{AE} obtidos.

4. CONCLUSÕES

A vazão específica de CO_2 teve um efeito significativo no desempenho dos reatores pneumáticos estudados. Para a menor vazão de CO_2 , o modelo coluna de bolhas foi o que proporcionou o melhor resultado. Com o acréscimo da vazão, o biorreator *airlift* de cilindros concêntricos exibiu melhor performance em termos de arraste de etanol.

6. REFERÊNCIAS

- MENDES C E. Avaliação das condições hidrodinâmicas, de transferência de oxigênio e de cisalhamento em diferentes modelos e escalas de reatores pneumáticos. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 245 p., 2016.
- RODRIGUES K C S, SONEGO J L S, CRUZ A J G, BERNARDO A, BADINO A C. Modeling and simulation of continuous extractive fermentation with CO_2 stripping for bioethanol production. *Chem. Eng. Res. Des.*, v. 132, p. 77–88, abr. 2018.
- SONEGO J L S, LEMOS D A, PINTO C E M, CRUZ A J G, BADINO A C. Extractive Fed-Batch Ethanol Fermentation with CO_2 Stripping in a Bubble Column Bioreactor: Experiment and Modeling. *Energy and Fuels*, v. 30, n. 1, p. 748–757, 2016.