

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA BIORREFINARIA FLEXÍVEL

F. F. FURLAN¹, R. J. TORON FILHO¹, F. H. P. B. PINTO¹, C. B. B. COSTA¹, A. J. G. CRUZ¹, R. L. C. GIORDANO¹ e R. C. GIORDANO¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: furlan@ufscar.br

RESUMO – O bagaço de cana-de-açúcar deixou de ser um resíduo da produção de açúcar e etanol e se tornou um subproduto de grande interesse. Dentre os possíveis usos para essa matéria-prima está a queima em caldeiras visando à produção de energia elétrica e seu uso na produção de etanol de segunda geração. Fica, então, a questão de qual a opção que permite melhores retornos econômicos. Ademais, a sazonalidade nos preços do etanol e da energia elétrica indica a necessidade de uma usina flexível, que permita absorver, mesmo que parcialmente, essas variações. Uma biorrefinaria flexível foi simulada e seu desempenho econômico comparado ao de destilarias autônomas dedicadas à produção de excedente de energia elétrica e de etanol 2G. Os resultados mostram que, para o cenário de preços atual, a flexibilidade não apresenta grande importância, pois a produção de etanol 2G é economicamente superior à produção de energia elétrica durante todo o ano.

1. INTRODUÇÃO

O uso do bagaço como matéria-prima para a produção de etanol 2G esbarra na questão da autossuficiência energética da planta. Além disso, o bagaço pode ser utilizado na produção de energia elétrica, que pode ser vendida para a rede. Desta forma, levanta-se a questão de qual utilização do bagaço é mais interessante economicamente. Ademais, esta questão não possui uma resposta única, dada a grande volatilidade dos preços do etanol e da energia elétrica. Entre Jan/2003 e Dez/2012 o preço do etanol pago ao produtor variou entre R\$ 536,0 m⁻³ e R\$ 1699,0 m⁻³. No mesmo período, o preço da energia elétrica no mercado *spot* (no qual são comercializados as produções excedentes às contratadas nos leilões) variou entre R\$ 6,77 MWh⁻¹ e R\$ 708,53 MWh⁻¹.

Uma biorrefinaria de cana-de-açúcar seria provavelmente flexível, para absorver as variações de mercado citadas, podendo escolher entre a produção de excedente de energia elétrica e de etanol 2G. Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho foi implementar e comparar o desempenho econômico de uma destilaria autônoma flexível com as plantas dedicadas à produção de etanol 2G e de bioeletricidade.

2. METODOLOGIA

O processo de produção de etanol 1G foi baseado em uma típica destilaria autônoma com cogeração. Foi considerada uma planta com capacidade para moer 2000000 de toneladas de cana por ano operando 210 dias por safra e com aproveitamento de tempo de 80 %. A cana considerada possui ART de 14,5 % e o rendimento da fermentação foi assumido igual a 89 %. Finalmente, considerou-se uma caldeira de 65,7 bar, com eficiência de 92 % com relação ao PCI.

A produção de etanol 2G emprega o pré-tratamento com ácido diluído (120 °C, 2 atm, H₂SO₄ 3% m/m) para hidrolisar a hemicelulose e melhorar o acesso das enzimas à celulose na etapa posterior. A xilose proveniente da hemicelulose hidrolisada é isomerizada a xilulose e fermentada pela levedura *Saccharomices cerevisiae* (Silva *et al.*, 2012), com conversão de 70%. A celulose é hidrolisada em reator agitado, com rendimento de 65 %. O licor de glicose (concentração de glicose de 8 %, m/m) é separado da fração sólida (contendo lignina e celulose não hidrolisada) e é enviado para a etapa de concentração, juntamente com o caldo, enquanto esta é enviada para a caldeira, como combustível. Além dos resíduos da hidrólise e do bagaço, 50 % da palha produzida é trazida do campo para ser queimada na caldeira (PCI de 12960 kJ/kg) e aumentar a produção de vapor. O PCI do bagaço e dos resíduos da hidrólise foram calculados a partir da composição destes, empregando os dados apresentados por Wooley e Putsche, 1996.

As simulações foram realizadas no software EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*), um simulador de processos orientado a equações, contendo sua própria linguagem de modelagem (Soares, Secchi, 2003). Além dos modelos para os principais equipamentos empregados na indústria química, já implementados no simulador, este também permite ao usuário incluir seus próprios modelos, utilizando sua linguagem de modelagem (Rodrigues *et al.*, 2010).

O preço médio no período entre Jan/2003 e Dez/2012 foi considerado para o etanol (R\$ 1067,00 m⁻³ de etanol) e para a energia elétrica negociada no mercado *spot* (R\$ 82,6 MWh⁻¹). O preço da energia elétrica negociada em leilões foi considerado igual ao negociado no último leilão por disponibilidade (R\$ 143,7 MWh⁻¹, Ago/2011). Todos os valores foram corrigidos com a inflação até Dez/2012. Quanto aos custos de produção, estes foram fixados em R\$ 910,60 m⁻³ para o etanol 1G, R\$ 799,32 m⁻³ para o etanol 2G e R\$ 80,75 MWh⁻¹ para a energia elétrica, além de R\$ 2,30 TC⁻¹ de custos gerais e administrativos. Além disso, para o cálculo do valor presente líquido (VPL) das biorrefinarias, para um período de 25 anos, utilizou-se uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 11 %.

3. RESULTADOS

Para o estudo de caso considerado, três biorrefinarias foram analisadas: uma destilaria autônoma empregando todo o excedente de bagaço na produção de energia elétrica (Caso base), uma biorrefinaria empregando todo o bagaço na produção de etanol 2G (Bio2G) e uma biorrefinaria flexível, que pode alterar mensalmente seu foco de produção entre energia elétrica e etanol 2G (Flexível). Para a análise econômica da última, considerou-se a variação mensal média dos preços do etanol hidratado e da energia elétrica comercializada no mercado

spot (Figura 1). Os principais dados utilizados na simulação das biorrefinarias são apresentados na Tabela 2.

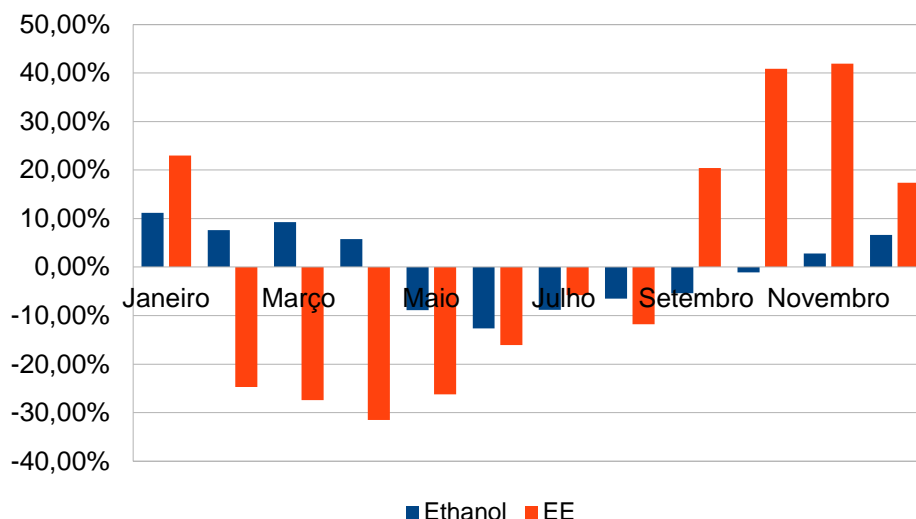


Figura 1: Variação mensal nos preços do etanol e da energia elétrica comercializada no mercado *spot*.

Tabela 2: Principais resultados da simulação dos casos estudados.

	Caso base	Bio2G
Produção de etanol (L/TC)	91,6	115,2
Consumo de vapor (kg/L)	370,5	579,1
Produção de excedente de energia elétrica (kWh/TC)	144,0	83,1

Comparada ao caso base, a Bio2G apresentou um aumento na produção de etanol de 25,7 % com 74 % do bagaço sendo desviado para a produção de etanol 2G (o que representa uma produção específica de 120,7 L/tonelada de bagaço), enquanto o excedente de energia elétrica produzido diminuiu em 42,4 %. Adicionalmente, o consumo específico de vapor aumentou em 56,3 %.

A partir das simulações dos processos, foi realizada a análise econômica para os três casos estudados. Foram considerados custos de investimento (em milhões de reais) de R\$ 344,3, R\$ 358,6 e R\$ 373,9, para o caso base, a biorrefinaria de etanol 2G e a biorrefinaria flexível, respectivamente. Os resultados mostram que a produção de etanol 2G apresenta o melhor desempenho econômico, com uma taxa interna de retorno (TIR) de 8,30 %. Em contrapartida, a biorrefinaria voltada à maximização do excedente de energia elétrica teve o pior desempenho, com um TIR de 7,64 %. Finalmente, a planta flexível obteve um TIR de 7,93 %. Porém, para a última, a flexibilidade não foi utilizada, pois a produção de etanol 2G mostrou ser a melhor opção durante todos os meses, no período considerado. Assim, o desempenho da biorrefinaria flexível foi inferior devido ao maior investimento desta. Nota-se

que nenhum caso estudado apresentou TIR maior ou igual à taxa mínima de atratividade. Entretanto, um incremento de 11,6 % no preço do etanol (aproximadamente metade do desvio padrão apresentado para esse produto no período considerado) é suficiente para tornar a biorrefinaria 2G economicamente viável.

4. CONCLUSÕES

A biorrefinaria flexível simulada no presente trabalho apresentou um desempenho econômico inferior aos outros casos estudados. Isso mostra que a capacidade de absorver as variações do mercado de energia elétrica e do etanol pela biorrefinaria flexível não é importante para os preços praticados atualmente para a energia elétrica (leilão e *spot*) e para o etanol. A inferioridade da biorrefinaria flexível se deve à pequena participação da energia elétrica na composição dos lucros desta, particularmente quando o mercado *spot* é considerado. Assim, mesmo em condições em que a produção de energia elétrica é viável a venda desta não compensa o maior investimento da flexível. É interessante notar que nenhuma biorrefinaria se mostrou economicamente viável quando os preços atuais (12/2012) são empregados. Porém, uma variação positiva de 11,6 % no preço de venda do etanol (aproximadamente metade da variação apresentada neste valor entre 01/2003 e 12/2012) é suficiente para tornar a biorrefinaria 2G viável.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o programa Fapesp BIOEN e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- RODRIGUES, R.; SOARES, R.P.; SECCHI, A.R. Teaching chemical reaction engineering using EMSO simulator. *Comput Appl Eng Educ*, v. 18, p. 607-618, 2010.
- SILVA, C.R.; ZANGIROLAMI, T.C.; RODRIGUES, J.P.; MATUGI, K. GIORDANO, R.C., GIORDANO, R.L.C. An innovative biocatalyst for production of ethanol from xylose in a continuous bioreactor. *Enzyme Microb Technol*, v. 50, p. 35-42, 2012.
- SOARES, R.P.; SECCHI, A.R. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation. *Comput Chem Eng*, v. 14, p. 947-952, 2003.
- WOOLEY, R.J.; PUTSCHE, V. Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1996.