

**USO DA PROTEÍNA DE SOJA NA SACARIFICAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR NO CONTEXTO DE UMA BIORREFINARIA INTEGRADA: ANÁLISE
TECNO-ECONÔMICA DO PROCESSO**

M. G. Brondi^{1,*}, A. M. Elias¹, F. F. Furlan¹, R. C. Giordano¹, C. S. Farinas²

¹ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luiz, km 235, 13565-905, São Carlos, SP, Brasil

² Embrapa Instrumentação, Rua XV de Novembro, 1452, 13560-970, São Carlos, SP, Brasil

* Autor correspondente, e-mail: mariana.brondi@gmail.com

Resumo: A conversão bioquímica de biomassas lignocelulósicas em biocombustíveis e outros bioprodutos ainda apresenta alguns desafios tecnológicos como, por exemplo, o baixo rendimento da etapa de hidrólise enzimática e o alto custo das enzimas celulolíticas. Nesse contexto, o uso de aditivos durante a sacarificação tem apresentado efeitos positivos na redução da adsorção improdutiva de celulases pela lignina, contribuindo, assim, para o aumento da conversão da celulose em açúcares fermentescíveis. Todavia, para se buscar a viabilidade tecno-econômica do processo, se faz necessário o uso de aditivos de baixo custo. Assim, este estudo avaliou impacto tecno-econômico do uso da proteína de soja como aditivo de baixo custo durante a hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar hidrotérmico no contexto de uma biorrefinaria integrada produzindo etanol de primeira e segunda geração (1G-2G), utilizando como ferramenta a Análise Tecno-Econômica Reversa. Tal análise possibilitou a obtenção de metas de desempenho a serem atingidas experimentalmente de modo a viabilizar o uso do aditivo no contexto da biorrefinaria, sendo estas: o aumento da conversão proporcionada pela proteína durante a sacarificação e a redução da carga enzimática utilizada no processo.

Palavras-chave: Proteína de Soja, Bagaço de Cana-de-Açúcar, Hidrólise Enzimática, Análise Tecno-Econômica, Adsorção Improdutiva.

**USE OF SOYBEAN PROTEIN AT SUGARCANE BAGASSE SACCHARIFICATION IN THE
CONTEXT OF AN INTEGRATED BIOREFINERY: PROCESS TECHNO-ECONOMIC
ANALYSIS**

Abstract: The biochemical conversion of lignocellulosic biomass into biofuels and other bioproducts still have some technological bottlenecks, such as the low yield of the hydrolysis step and the high cost of the cellulolytic enzymes. In this context, the use of additives during the saccharification has presented positive effects on reducing the unproductive binding of cellulases onto lignin, increasing, then, the cellulose conversion into fermentable sugars. However, in order to ensure the process techno-economic feasibility, it is necessary to use low-cost additives. Thus, this study evaluated the techno-economic impact of the use of soybean protein as a low-cost additive during the enzymatic hydrolysis of hydrothermally pre-treated sugarcane bagasse in the context of an integrated biorefinery that produces first and second-generation ethanol (1G-2G), using as a tool the Reverse Techno-Economic Analysis. This analysis allowed the definition of some performance targets to be reached experimentally in order to make the use of the additive economically feasible at the biorefinery context. The obtained targets were: increase the conversion provided by the protein during the saccharification and reduce the enzyme dosage used at the process.

Keywords: Soybean Protein, Sugarcane Bagasse, Enzymatic Hydrolysis, Techno-Economic Analysis, Unproductive Binding.

1. Introdução

A bioconversão de biomassas lignocelulósicas em biocombustíveis como, por exemplo, o etanol celulósico (2G) é uma importante alternativa para reduzir a dependência e os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis. No entanto, de modo a viabilizar a produção do etanol 2G, alguns desafios tecnológicos, tais como o baixo rendimento da sacarificação enzimática e o alto custo das enzimas celulolíticas, ainda precisam ser superados (KLEIN-MARCUSCHAMER et al., 2012; SILVA et al., 2018). Um dos fatores que contribuem para a redução do rendimento da hidrólise é a adsorção improdutiva de celulasas pela lignina (KO et al., 2015, SAINI et al., 2016). De modo a minimizar este efeito negativo, o uso de aditivos que mitigam a adsorção improdutiva tem apresentado resultados interessantes (BRONDI et al., 2019; ROCHA-MARTÍN et al., 2017), no entanto, o uso de aditivos de baixo custo e a análise tecno-econômica da adição destes no processo de produção do etanol 2G se faz necessária de modo a se tentar viabilizar economicamente o processo.

Nesse contexto, o uso da proteína de soja como aditivo se destaca devido ao seu baixo custo (KLEIN-MARCUSCHAMER et al., 2012) e em razão dos resultados positivos já reportados na literatura, onde, por exemplo, Florencio et al. (2019) aumentaram em 76% a glicose liberada durante a hidrólise do bagaço de cana hidrotérmico utilizando o coquetel enzimático Cellic CTec2[®]. No entanto, é de grande importância que se avalie o impacto tecno-econômico da adição da proteína de soja durante a sacarificação enzimática para a produção do etanol celulósico.

Uma alternativa interessante para se realizar a análise tecno-econômica do processo foi desenvolvida por Furlan et al. (2016) e recentemente aplicada por Longati et al. (2018) no contexto de uma biorrefinaria integrada que produz etanol de primeira e segunda-geração (1G-2G). Denominada Análise Tecno-Econômica Reversa, ela consiste em, ao invés de avaliar a viabilidade econômica de uma condição de processo específica, especifica-se um desempenho econômico mínimo para o processo (por exemplo, Valor Presente Líquido (VPL) = 0) e então janelas de condições de operação viáveis são obtidas e podem ser utilizadas na definição de metas de desempenho a serem buscadas experimentalmente para as principais variáveis de processo (FURLAN et al., 2016; LONGATI et al., 2018).

Assim, utilizando a Análise Tecno-Econômica Reversa, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da adição da proteína de soja durante a hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar hidrotérmico no contexto de uma biorrefinaria integrada de etanol 1G-2G. Com esta análise, foram obtidas metas de desempenho a serem atingidas experimentalmente de modo a viabilizar economicamente o uso da proteína de soja na produção do etanol de segunda geração.

2. Materiais e Métodos

2.1. Análise Tecno-Econômica

A análise tecno-econômica da adição da proteína de soja no processo de produção do etanol de segunda geração foi realizada baseando-se na simulação da biorrefinaria integrada de etanol 1G-2G desenvolvida por Longati et al. (2018) no simulador de processos EMSO (SOARES e SECCHI, 2003). A biomassa utilizada foi o bagaço de cana-de-açúcar submetido a um pré-tratamento hidrotérmico antes da etapa de hidrólise. Informações sobre o desenvolvimento da análise, a implementação da biorrefinaria e as premissas econômicas adotadas podem ser obtidas em Furlan et al. (2016) e Longati et al. (2018). Com base nessa simulação, adicionou-se uma corrente extra de proteína de soja já a 50 °C, a qual foi misturada com a corrente de bagaço pré-tratado e enzimas na entrada do reator de hidrólise. O tempo de sacarificação foi fixado em 24 horas e após o processo, a proteína juntamente com o bagaço não hidrolisado seguiram para as caldeiras da biorrefinaria, onde houve a queima deste material e a subsequente geração de energia elétrica para a indústria.

A Análise Tecno-Econômica Reversa foi utilizada para determinar e avaliar as metas de desempenho necessárias para tornar o uso da proteína de soja no contexto da biorrefinaria economicamente viável. Para tanto, o índice econômico adotado foi o Valor Presente Líquido (VPL) do processo igual a zero, avaliando-se o efeito das variáveis carga de sólidos, carga

enzimática, conversão da celulose e concentração de proteína de soja para manter essa performance econômica adotada.

3. Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta as curvas isoeconômicas (regiões de performance econômica constante, onde o VPL do processo é zero) onde pode-se avaliar o efeito das variáveis carga enzimática, carga de sólidos e concentração de proteína de soja, na mínima conversão da celulose presente no bagaço necessária para que o processo passe a ser economicamente viável. Assim, para uma carga de bagaço de 15%, 14,4 FPU/g celulose (aproximadamente 7,5 FPU/g bagaço) e 12% de proteína de soja (PS), a sacarificação deve apresentar uma conversão mínima da celulose de 80% para que se tenha a viabilidade econômica do processo (VPL = 0), ou seja, nestas condições, conversões maiores que 80% implicam em viabilidade..

Florencio et al. (2019), realizando a hidrólise com 15% sólidos, 12% PS, durante 24 h com uma carga enzimática de 10 FPU/g bagaço e obtiveram 32% de conversão da celulose presente no material lignocelulósico. Assim, comparando os dados experimentais reportados com o que se obteve na simulação, definem-se algumas metas de desempenho a serem atingidas experimentalmente, de modo a viabilizar a produção do etanol 2G utilizando a proteína de soja como aditivo para mitigar a adsorção improdutivo de celulasas durante a etapa de sacarificação enzimática, sendo estas: o aumento da conversão da celulose em açúcares durante a hidrólise, a redução da carga enzimática e a redução do custo do aditivo para a biorrefinaria.

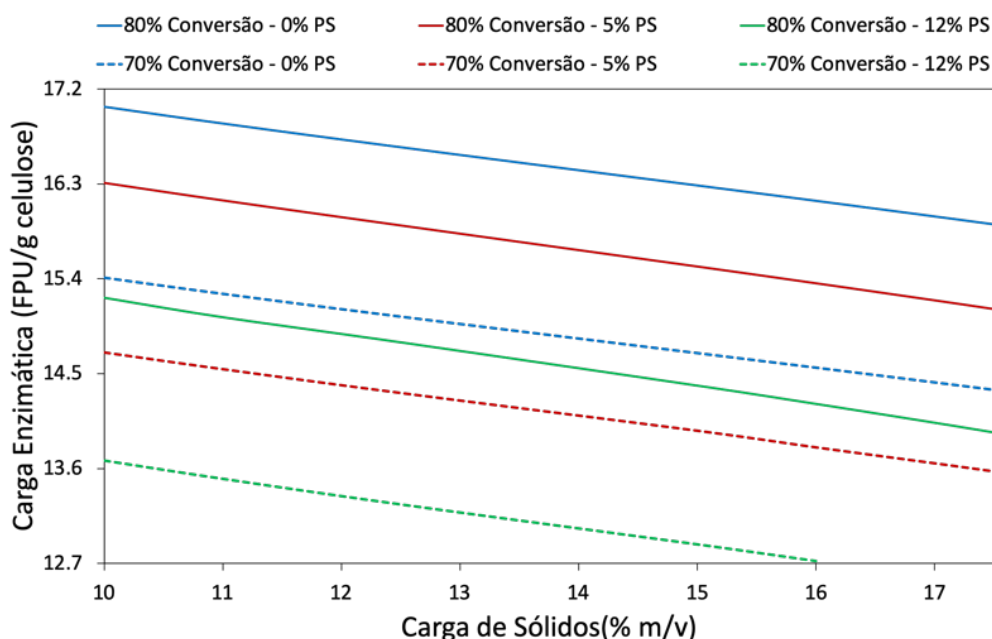


Figura 1. Curvas isoeconômicas avaliando os efeitos das variáveis carga de sólidos, carga enzimática e concentração de proteína de soja na mínima conversão necessária para que a biorrefinaria apresente Valor Presente Líquido (VPL) igual a zero. O tempo de hidrólise foi fixado em 24 horas, as concentrações de aditivo avaliadas foram 0, 5 e 12% (m/m) e as conversões foram de 70 e 80%.

4. Conclusões

A análise tecno-econômica da adição da proteína de soja durante a sacarificação enzimática do bagaço de cana-de-açúcar hidrotérmico no contexto de uma biorrefinaria integrada mostrou que, em relação aos dados experimentais disponíveis na literatura até o presente momento, algumas metas de desempenho são necessárias de modo a viabilizar o uso do aditivo, sendo estas: aumentar a conversão da celulose e reduzir a carga enzimática utilizada durante a hidrólise. Assim, se esses objetivos forem atingidos experimentalmente, o uso da proteína de soja poderá significar um

importante avanço no sentido de viabilizar economicamente a produção do etanol celulósico, por meio do aumento do rendimento da etapa de hidrólise que consiste em um dos gargalos tecnológicos do processo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (PPGEQ-UFSCar), à Embrapa Instrumentação, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado (processo 2017/13931-3) e pelo projeto temático no qual este trabalho está inserido (processo temático 2016/10636-8, BIOEN), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES, código de financiamento 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 141303/2019-0).

Referências

- BRONDI, M.G.; VASCONCELLOS, V.M.; GIORDANO, R.C.; FARINAS, C.S. Alternative Low-Cost Additives to Improve the Saccharification of Lignocellulosic Biomass 461–473, 2019.
- FLORENCIO, C.; BADINO, A.C.; FARINAS, C.S. Addition of Soybean Protein Improves Saccharification and Ethanol Production from Hydrothermally Pretreated Sugarcane Bagasse, 2019.
- FURLAN, F.F.; COSTA, C.B.B.; SECCHI, A.R.; WOODLEY, J.M.; GIORDANO, R.C. Retro-Techno-Economic Analysis: Using (Bio)Process Systems Engineering Tools to Attain Process Target Values. *Ind. Eng. Chem. Res.* 55, 9865–9872, 2016.
- GHOSE, T.K. Measurement of cellulase activities. *Pure Appl. Chem.* 59, 257-268, 1987.
- KLEIN-MARCUSCHAMER, D.; OLESKOWICZ-POPIEL, P.; SIMMONS, B.A., BLANCH, H.W. The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels. *Biotechnol. Bioeng.* 109, 1083–1087, 2012.
- KO, J.K.; XIMENES, E.; KIM, Y., LADISCH, M.R. Adsorption of enzyme onto lignins of liquid hot water pretreated hardwoods. *Biotechnol. Bioeng.* 112, 447–456, 2015.
- LONGATI, A.A.; LINO, A.R.A.; GIORDANO, R.C.; FURLAN, F.F. Defining research & development process targets through retro-techno-economic analysis: The sugarcane biorefinery case. *Bioresour. Technol.* 263, 1–9, 2018.
- ROCHA-MARTÍN, J.; MARTINEZ-BERNAL, C.; PÉREZ-COBAS, Y.; REYES-SOSA, F.M.; GARCÍA, B.D. Additives enhancing enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresour. Technol.* 244, 48–56, 2017.
- SAINI, J.K.; PATEL, A.K.; ADSUL, M.; SINGHANIA, R. R. Cellulase adsorption on lignin: A roadblock for economic hydrolysis of biomass. *Renew. Energy* 98, 29–42, 2016.
- SILVA, C.O.G.; VAZ, R.P.; FILHO, E.X.F. Bringing plant cell wall-degrading enzymes into the lignocellulosic biorefinery concept. *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, 2018.
- SOARES, R.P.; SECCHI, A. R. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimization. *Comp. Aid. Chem. Eng.* 14, 947–952, 2003.