

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

PRODUÇÃO DE ETANOL 1G e 2G USANDO *S. cerevisiae* RECOMBINANTE E HIDROLISADO LIGNOCELULÓSICO BRUTO: ANÁLISE TECNO-ECONÔMICA

Luísa Pereira Pinheiro¹, Andrew Milli Elias³, Thais Suzane Milessi^{2,4}, Andreza
Aparecida Longati².

¹Universidade do Federal de Itajubá, Avenida B.P.S, 1303, Pinheirinho – 37500-903 – Itajubá-MG, Brasil, pinheiropluisa@gmail.com.

²Universidade Federal de São Carlos/Departamento de Engenharia Química, Rodovia Washington Luís, km 235, Monjolinho – 13565-905 – São Carlos-SP, Brasil, andreza.longati@gmail.com

³Embrapa Instrumentação, Rua 15 de Novembro, 1452, Centro – 13560-970 – São Carlos-SP, Brasil, andrewmilli@gmail.com

⁴Universidade Federal de São Carlos/Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Rodovia Washington Luís, km 235, Monjolinho – 13565-905 – São Carlos-SP, Brasil, thais.milessi@ufscar.br.

Resumo

O etanol é uma importante alternativa sustentável para substituir os combustíveis fósseis, uma vez que tem potencial de promover segurança energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Este trabalho tem como objetivo realizar a análise tecno-econômica do processo integrado 1G2G de produção de etanol utilizando para a produção de etanol 2G a partir do melaço com hidrolisado hemicelulósico do bagaço da cana-de-açúcar e levedura recombinante imobilizada em um biorreator de leito fixo operando em bateladas repetidas. O processo foi implementado no EMSO e o preço mínimo de venda foi utilizado como métrica de avaliação de desempenho econômico. O processo integrado foi capaz de aumentar em 12% a produção de etanol (10,4 litros de etanol por tonelada de cana) e obteve como desempenho econômico o preço mínimo de venda de etanol de 568,2 US\$/m³ (38,18 US\$/m³ acima da média de preços de venda de etanol), um valor próximo da viabilidade econômica, uma vez que um aumento em 7% no preço de venda do etanol seria suficiente para que o processo integrado fosse viável.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Etanol, Biorrefinaria, Análise tecno-econômica.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Química.

Introdução

As crescentes preocupações mundiais sobre os impactos das mudanças climáticas, segurança energética e a transição energética, tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis nas últimas décadas. Dentre essas alternativas, os biocombustíveis surgiram como uma solução promissora, com destaque para o etanol. O etanol, biocombustível líquido obtido por meio da fermentação dos açúcares contidos em diferentes matérias-primas (de fonte sacarina, amilácea e lignocelulósica) tem grande potencial para reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transporte (como uma alternativa a gasolina e diesel), promover a segurança energética e desenvolvimento socioeconômico em vários setores (JAMBO et al., 2016).

Neste contexto, é importante ressaltar as biorrefinarias produtoras de etanol. Biorrefinaria é uma unidade industrial que integra diversos processos, tecnologias e equipamentos capazes de converter a biomassa em energia, calor, bioprodutos e biocombustíveis (como o etanol). Essa estrutura permite a utilização integral das matérias-primas, otimiza o uso dos recursos, minimiza a geração de resíduos e permite a integração de diferentes tecnologias de produção de etanol (PINHEIRO, 2022). No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal matéria para a produção de etanol de primeira geração (1G). Neste processo, é gerado bagaço, que juntamente com a palha proveniente do campo, é utilizado para geração de energia e calor. Entretanto, podem ser utilizados como matéria-prima lignocelulósica para a produção de etanol lignocelulósico (etanol de segunda geração, 2G).

Perez et al. (2022) avaliaram a produção de etanol 2G a partir de melaço (subproduto da produção de açúcar) misturado com hidrolisado hemicelulósico do bagaço da cana-de-açúcar e usando a levedura recombinante *Saccharomyces cerevisiae* MDS130 de alta performance, capaz de fermentar

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

de forma eficiente a xilose, glicose e sacarose, operando em bateladas repetidas em um biorreator de leito fixo. Com este processo foi possível obter elevadas produtividades (entre 14,07 e 22,81 g/L/h) e rendimentos em etanol (entre 0,35 e 0,41 g_{etanol}/g_{ART}), desempenho aproximado do etanol 1G que é bem estabelecido em escala industrial.

A análise técnica-econômica (ATE) fornece dados do desempenho econômico do processo, fornecendo parâmetros de performance que são utilizados no estudo de implementação em escala industrial. Neste contexto, o presente trabalho realizou uma ATE da produção de etanol integrada de primeira e segunda geração (1G2G), em que o processo 2G é baseado no trabalho desenvolvido por Perez et al. (2022). O trabalho tem também como objetivo realizar uma análise comparativa do processo proposto com o processo convencional (1G) e outros 1G2G encontrados na literatura.

Metodologia

A simulação do processo 1G2G foi realizada no software EMSO, considerando os dados do processo 1G de Elias et al. (2021) e Perez et al. (2022) para o processo 2G. A biorrefinaria processa 4 milhões de toneladas de cana por safra, processando 833 toneladas de cana por hora, durante 240 dias por ano com 87% de tempo útil. A cana-de-açúcar é produzida, colhida e transportada para usina, onde passa pelo processo de limpeza, extração e tratamento do caldo. 50% da palha enfiada é recolhida do campo e utilizada como combustível da caldeira (etapa de cogeração). O caldo da cana, depois de tratado, é dividido em duas correntes. A primeira é enviada para a produção de etanol 1G, que englobam as etapas de concentração do caldo, fermentação, destilação e desidratação. A segunda corrente é direcionada para evaporadores, onde ocorre a produção do melaço que será utilizado na produção de etanol 2G (com a concentração de açúcares igual a 877,9 g/L). O bagaço produzido na etapa de extração (50% de umidade) é dividido em duas correntes. A primeira é enviada para queima como combustível em caldeira e a segunda para o pré-tratamento ácido (como fonte de material lignocelulósico para a produção de etanol 2G). As correntes de bagaço e caldo na biorrefinaria são calculadas na simulação de forma a maximizar a produção de etanol e suprir toda a demanda energética da planta. O pré-tratamento ácido do bagaço gera duas frações, uma fração líquida (rica em xilose e alguns componentes da degradação dos açúcares) e uma fração sólida (composta de celulose e lignina). A fração sólida é enviada para queima em caldeira para ser utilizada como combustível e a fração líquida é destinada para a etapa de fermentação 2G, onde será suplementado com 10% (v:v) do melaço produzido internamente. A fermentação 2G utiliza a levedura recombinante denominada *S. cerevisiae* MDS130 capaz de assimilar os açúcares C5 e C6. A levedura é propagada em um meio de cultura contendo melaço e xilose e imobilizada em esferas de alginato de cálcio. Ao final de cada processo fermentativo, as leveduras imobilizadas ficam retiradas no biorreator, enquanto o vinho delevedurado 2G segue para a etapa de destilação e desidratação juntamente como o etanol 1G.

As equações que descrevem a ATE são resolvidas concomitantemente com as equações que descrevem os sistemas estudados (balanços de massa e energia, propriedades termodinâmicas, etc.). Para determinar o desempenho econômico foi utilizado o preço mínimo de venda do etanol (PMV), que representa o menor preço de venda de um determinado produto para que este se torne viável. Para o seu cálculo, a equação do Valor Presente Líquido (VPL, Equação 1) é igualada a zero com uma taxa de desconto igual a taxa mínima de atratividade (TMA), considerada igual a 11% Longati et al. (2018).

$$VPL_{(X_1, X_2, \dots, X_i)} = -CAPEX_{(X_1, X_2, \dots, X_i)} + \sum_{j=1}^N \frac{CashFlow_{(X_1, X_2, \dots, X_i)}}{(1+r)^j} = 0 \quad (1)$$

Onde r é a taxa de desconto, N é o tempo de vida do projeto, $CashFlow$ é o fluxo de caixa, $CAPEX$ é o custo capital, $(X_1, X_2, \dots, X_i)$ são as variáveis dos processos (nas quais são usadas para dimensionar os equipamentos e seus custos, os fluxos e custos das matérias-primas, insumos).

O CAPEX para ambos as etapas de processo 1G e 1G2G foram baseados em Longati et al. (2019) e Elias et al. (2021). Para o setor 2G, os equipamentos e seus custos foram calculados com base em Davis et al. (2018) e Humbird et al. (2002). Os custos operacionais são baseados em Peters; Timmerhaus; West (2003) e nos custos das matérias primas, insumos e produtos (PINHEIRO, 2022): 17,8 US\$/tonelada de cana, 7,71 US\$/toneladas de palha, 0,19 US\$/toneladas de água, 0,6 US\$/kg de

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

amônia, 0,4 US\$/kg de xilose, 1,64 US\$/kg de alginato de cálcio, 0,81 US\$/kg de NaOH, 0,24 US\$/kg de H_2SO_4 (com 98% de pureza), 1,50 US\$/kg de $CaCl_2$, 87,24 US\$/kg de ampicilina. O preço médio de venda do etanol e da eletricidade e taxa de câmbio, durante os meses de dezembro de 2015 a dezembro de 2020, foram adotados respectivamente em 530 US\$/m³, 62,67 US\$/MWh e 3,89 BRL/US\$. Os parâmetros técnicos utilizados na simulação da biorrefinaria integrada 1G2G de cana-de-açúcar foram baseados em Elias et al. (2021), Longati et al. (2018) e Pinheiro (2022).

A análise de sensibilidade avaliou a influência do custo dos equipamentos e suas instalações (investimento industrial), custo operacional, preço das matérias-primas e dos produtos da biorrefinaria (etanol e eletricidade) no PMV, durante uma variação de -50% e +50% destes valores.

Resultados

Os principais resultados obtidos na ATE da biorrefinaria integrada 1G2G (Tabela 1) são apresentados a seguir, assim como a comparação com os resultados da literatura (Figura 1A). A análise de sensibilidade (Figura 1B) detalha os impactos gerados pela variação de -50% e +50% nos principais insumos da biorrefinaria, no investimento industrial, custos operacionais, e nos preços de venda dos produtos da biorrefinaria (etanol e eletricidade) no PMV.

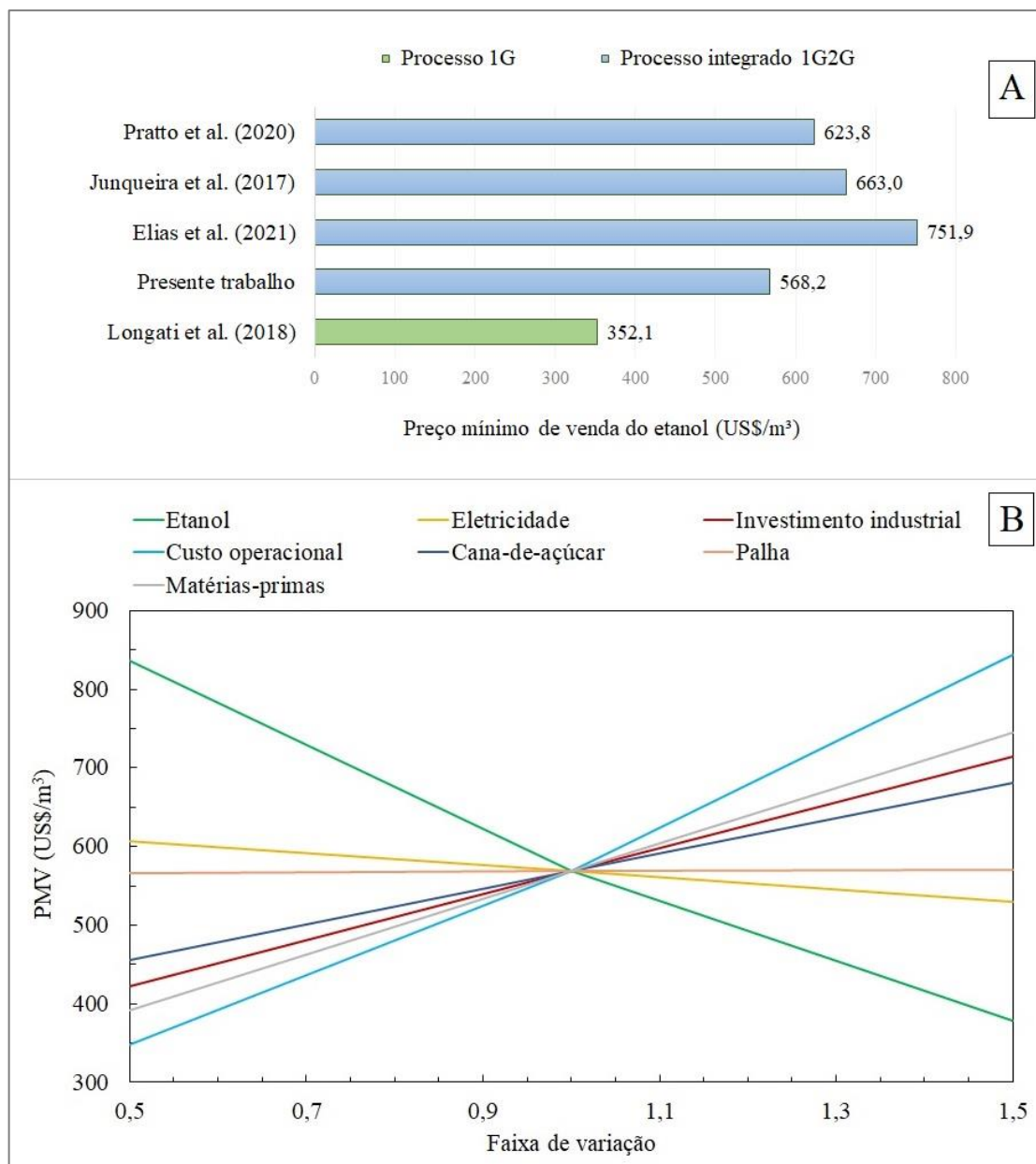
Tabela 1 - Principais resultados técnicos e econômicos da análise da biorrefinaria integrada 1G2G.

Principais resultados técnicos	
Etanol anidro (m ³ /h)	83,5
Etanol anidro específico (L/t de cana)	100,2
Eletricidade (MW)	103,8
Vapor consumido (t/h)	722,5
Principais resultados econômicos	
Preço mínimo de venda do etanol (PMV) (US\$/m ³)	586,2
Investimento industrial (10 ⁶ US\$)	
Recepção da palha da cana-de-açúcar	2,3
Recepção da cana-de-açúcar + limpeza a seco + extração do caldo + concentração do caldo	36,1
Produção de etanol 1G (fermentação + destilação e desidratação)	53,1
Cogeração (produção de vapor e eletricidade)	83,0
Pré-tratamento ácido	1,0
Fermentação 2G	15,1
Propagação e imobilização da levedura	0,5
Outros custos	2,4
Custos operacionais (10 ⁶ US\$)	
Matérias-primas	117,7
Mão de obra	20,5
Manutenção	5,5
Utilidades	5,2
Custos indiretos	14,0
Supervisão operacional	2,0
Suprimentos	0,5
Encargos laboratoriais	2,0
Despesas gerais	5,6

Fonte: Elaboração dos autores.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Figura 1 – (A) Preço mínimo de venda do processo 1G2G e comparação com do PMV com outros processos de produção de etanol encontrados na literatura; (B) Análise de sensibilidade do processo integrado 1G2G da produção de etanol variando -50% e +50% dos seus principais custos e preço dos seus produtos.



Fonte: Elaboração dos autores.

Discussão

O processo integrado 1G2G proposto neste trabalho produz 83,5 m³/h (100,2 litros de etanol por tonelada de cana processada), representando um aumento de 12% na produção de etanol quando comparado com o processo tradicional 1G (LONGATI et al., 2018). Esse aumento foi possível ser realizada com o desvio de bagaço da cogeração para a produção de etanol 2G sem comprometer a autossuficiência energética da planta. Como esperado, a geração de eletricidade decresceu em torno

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

de 34% e a demanda térmica (consumo de vapor) cresceu em torno de 2,6 t/h quando comparado ao cenário 1G. O consumo de vapor aumentou devido as etapas de produção de melaço e produção de etanol 2G do processo integrado 1G2G. Embora menor quantidade de bagaço seja utilizada como combustível de caldeira, a demanda térmica da planta foi garantida pela queima dos sólidos pré-tratados gerados no processo 2G.

Do ponto de vista econômico, a biorrefinaria integrada tem um investimento industrial superior ao processo tradicional 1G em função dos equipamentos do processo 2G, com as etapas de pré-tratamento, propagação e imobilização de leveduras, concentração do melaço e fermentação 2G. Os maiores contribuintes do investimento industrial correspondem ao setor de cogeração e o processo 1G, devido ao aumento de produção de etanol e vapor consumido na biorrefinaria com a adição do setor 2G. Dentre as etapas 2G, a fermentação 2G representa o maior custo de investimento, reflexo dos cinco reatores necessários para realizar a produção de etanol 2G. Os custos envolvidos com matérias-primas e mão de obra são os principais responsáveis dos custos operacionais da biorrefinaria, representando respectivamente 68% e 12% de todo os custos de operação.

O PMV, que representa o preço do etanol que torna o VPL igual a zero a uma TMA fixada de 11%, no cenário base 1G foi estimado em 352,1 US\$/m³, valor menor que a média do preço de etanol (530 US\$/m³) considerado. Esse resultado indica, como esperado, a viabilidade econômica do cenário 1G. O processo integrado 1G2G apresentou um desempenho econômico próximo da viabilidade com o PMV estimado em 568,2 US\$/m³. Assim, um aumento em 7% na média de preços de venda do etanol seria suficiente para tornar o processo viável.

A comparação dos resultados encontrados com outros trabalhos da literatura que realizaram a ATE de diferentes configurações de processo 1G2G (Figura 1A) mostrou que o processo integrado 1G2G desenvolvido por Perez et al (2022) está mais próximo da viabilidade econômica. Elias et al. (2021) que obtiveram um PMV de 751,9 US\$/m³ (produzindo etanol a partir da sacarose e glicose do caldo de cana, e da hemicelulose e celulose do bagaço da cana), valor 32% superior ao encontrado neste trabalho. Pratto et al. (2020) avaliaram a integração da produção de etanol a partir da palha da cana em uma biorrefinaria 1G, obtendo o PMV de 623,84 US\$/m³. Junqueira et al. (2017) realizaram uma ATE da produção integrada de etanol através da fermentação dos açúcares C6 (da celulose e do caldo 1G) e dos açúcares C5, resultando em um PMV de 663 US\$/m³.

A análise de sensibilidade foi realizada para avaliar como o desempenho econômico do processo integrado é afetado pela variação de -50% e +50% dos preços da eletricidade e do etanol, investimento industrial e OPEX, e insumos do processo (Figura 1B). O preço do etanol, os custos operacionais, o investimento industrial e o preço da cana-de-açúcar foram os componentes que mais impactaram o desempenho econômico.

Conclusão

A avaliação econômica e análise de sensibilidade mostrou que a integração do setor 2G ao processo 1G (utilizando o hidrolisado hemicelulósico do bagaço misturado ao melaço) aumentou a produção de etanol em 12%. O preço mínimo de venda do etanol foi encontrado como 568,2 US\$/m³, próximo do preço de venda do etanol, uma vez que um aumento em 7% no preço de venda do etanol seria suficiente para tornar o processo viável.

Referências

DAVIS, Ryan; GRUNDL, Nicholas; TAO, Ling; BIDDY, Mary J.; TAN, Eric C. D.; BECKHAM, Gregg T.; HUMBERT, David; THOMPSON, David N.; RONI, Mohammad S. **Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbon Fuels and Coproducts: 2018 Biochemical Design Case Update: Biochemical Deconstruction and Conversion of Biomass to Fuels and Products via Integrated Biorefinery Pathways**. [s.l: s.n.]. Disponível em: www.nrel.gov/publications.

ELIAS, Andrew Milli; LONGATI, Andreza Aparecida; DE CAMPOS GIORDANO, Roberto; FURLAN, Felipe Fernando. Retro-techno-economic-environmental analysis improves the operation efficiency of

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

1G-2G bioethanol and bioelectricity facilities. **Applied Energy**, [S. l.], v. 282, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116133.

HUMBIRD, D. et al. **Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>.

JAMBO, Siti Azmah; ABDULLA, Rahmath; MOHD AZHAR, Siti Hajar; MARBAWI, Hartinie; GANSAU, Jualang Azlan; RAVINDRA, Pogaku. **A review on third generation bioethanol feedstock. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.064.

JUNQUEIRA, Tassia L.; CHAGAS, Mateus F.; GOUVEIA, Vera L. R.; REZENDE, Mylene C. A. F.; WATANABE, Marcos D. B.; JESUS, Charles D. F.; CAVALETT, Otavio; MILANEZ, Artur Y.; BONOMI, Antonio. Techno-economic analysis and climate change impacts of sugarcane biorefineries considering different time horizons. **Biotechnology for Biofuels**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–12, 2017. DOI: 10.1186/s13068-017-0722-3.

LONGATI, Andreza A.; LINO, Anderson R. A.; GIORDANO, Roberto C.; FURLAN, Felipe F.; CRUZ, Antonio J. G. Defining research and development process targets through retro-techno-economic analysis: The sugarcane biorefinery case. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 263, p. 1–9, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.102.

LONGATI, Andreza A.; LINO, Anderson R. A.; GIORDANO, Roberto C.; FURLAN, Felipe F.; CRUZ, Antonio J. G. Biogas Production from Anaerobic Digestion of Vinasse in Sugarcane Biorefinery: A Techno-economic and Environmental Analysis. **Waste and Biomass Valorization**, [S. l.], v. 11, n. 9, p. 4573–4591, 2019. DOI: 10.1007/s12649-019-00811-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00811-w>.

PEREZ, Caroline L.; PEREIRA, Laís P. R. da C.; MILESSI, Thais S.; SANDRI, Juliana P.; DEMEKE, Mekonnen; FOULQUIÉ-MORENO, Maria R.; THEVELEIN, Johan M.; ZANGIROLAMI, Teresa C. Towards a practical industrial 2G ethanol production process based on immobilized recombinant *S. cerevisiae*: Medium and strain selection for robust integrated fixed-bed reactor operation. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 185, p. 363–375, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.044. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014812101764X>.

PETERS, Max S.; TIMMERHAUS, Klaus D.; WEST, Ronald E. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5th. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

PINHEIRO, Luísa Pereira. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da produção integrada de bioetanol 1G e 2G em biorrefinaria de cana utilizando levedura recombinante**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.

PRATTO, Bruna; DOS SANTOS-ROCHA, Martha Suzana Rodrigues; LONGATI, Andreza Aparecida; DE SOUSA JÚNIOR, Ruy; CRUZ, Antonio José Gonçalves. Experimental optimization and techno-economic analysis of bioethanol production by simultaneous saccharification and fermentation process using sugarcane straw. **Bioresource Technology**, [S. l.], v. 297, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122494.

Agradecimentos

CAPES, UNIFEI, ANP/PRH (Processo: 045619), CNPq, FAPESP (Processos #2019/15851-2, #2020/15450-5, #2022/10900-8 e #2016/10636-8).