

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

PRODUÇÃO DE ETANOL 1G e 2G USANDO *S. cerevisiae* RECOMBINANTE E HIDROLISADO LIGNOCELULÓSICO BRUTO: EMISSÕES DE CO₂

Luísa Pereira Pinheiro¹, Andrew Milli Elias³, Thais Suzane Milesi^{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.milesi@ufscar.br.

Resumo

O etanol é um biocombustível considerado ser uma alternativa sustentável para substituir os combustíveis fósseis no setor de transporte mundial. Seu uso é capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa oriundos do setor de transporte no mundo. Este trabalho tem como objetivo principal realizar a avaliação das emissões de CO₂ de um processo integrado de primeira e segunda geração (1G2G) de produção etanol. O processo 1G2G avaliado utiliza para a produção de etanol 2G uma mistura de melaço com hidrolisado hemicelulósico ácido bruto do bagaço da cana-de-açúcar e levedura recombinante imobilizada em um biorreator de leito fixo operando em bateladas repetidas. A Avaliação ambiental das emissões de CO₂ foi realizada utilizando a categoria de impacto de aquecimento global por meio da metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV), usando o método CML Baseline 2000 e o software SimaPro. O processo integrado emite 21,49 gCO₂/MJ, um desempenho ambiental levemente inferior ao processo tradicional 1G de cana-de-açúcar (devido a quantidade de insumos utilizados no setor 2G) e superior ao etanol 1G do milho (devido as etapas agrícolas e transporte da cana-de-açúcar).

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Etanol. Biorrefinaria. Emissões de CO₂.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia Química.

Introdução

O consumo de energia no mundo tem aumentando com o decorrer dos anos devido ao avanço da tecnologia, processo de urbanização, desenvolvimento da sociedade e o processo de industrialização. As principais fontes de energia são os combustíveis fósseis, que representam mais de 80% do fornecimento energético mundial (IEA, 2022). A queima dos combustíveis fósseis emite gases de efeito estufa (GEE) a atmosfera, tais como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonetos e hexafluoreto de enxofre. Estes gases são considerados os principais responsáveis pelas mudanças climáticas e aquecimento global.

A necessidade de combater o crescente aquecimento global e, consequentemente, as mudanças climáticas e suas consequências, impulsionou a inovação em diversos campos, como a produção de biocombustíveis. Os biocombustíveis representam uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis e são considerados instrumentos cruciais para uma transição energética e economia circular, capazes de reduzir a emissão de GEE, aumentar a diversidade de combustíveis nas matrizes energéticas e a segurança do suprimento energético (SARANGI; NANDA; MOHANTY, 2018). Neste contexto, destaca-se as biorrefinarias, uma instalação industrial tecnológica que integra diversos processos de conversão da biomassa (fonte de energia composta por material orgânico de origem animal, vegetal e microbiano) em biocombustíveis, bioprodutos, bioquímicos, calor, energia, visando a utilização total da matéria-prima e geração mínima de resíduos (SANTOS; RUZENE; SILVA, 2017).

O etanol, um importante biocombustível utilizado para substituir os combustíveis fósseis no setor de transporte, é obtido a partir da fermentação de um substrato rico em açúcares de diferentes matérias-primas. O etanol de primeira geração (1G) é um processo consolidado com tecnologia

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

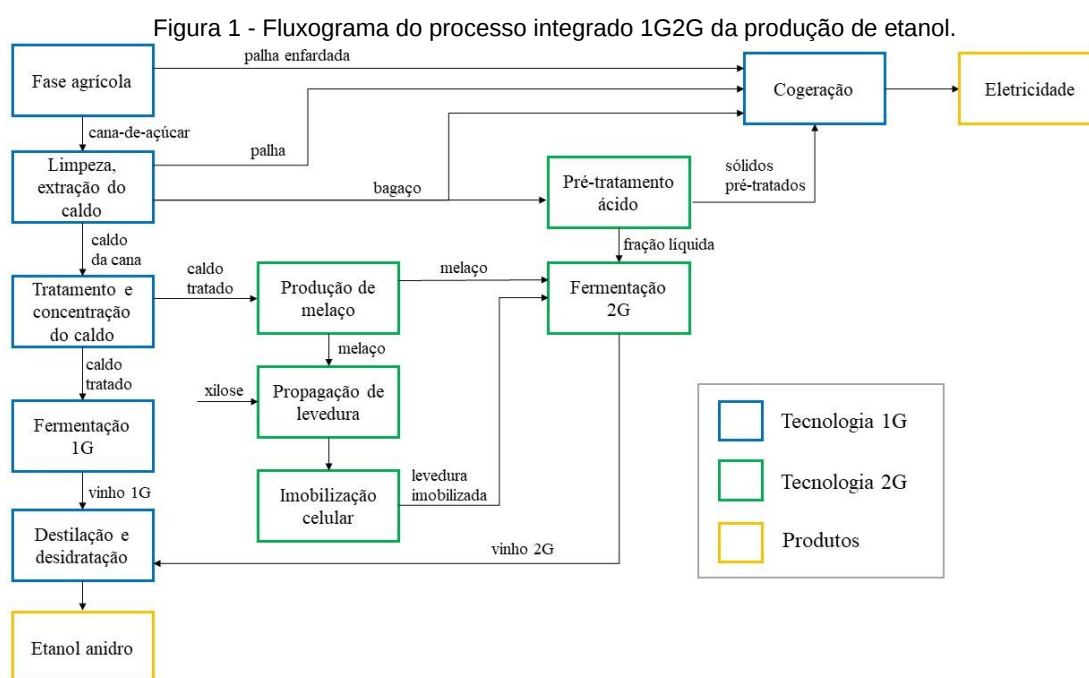
madura, sendo produzido principalmente pela cana-de-açúcar no Brasil. O etanol de segunda geração (2G) utiliza como matéria-prima os materiais lignocelulósicos (composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina), que são matérias-primas residuais dos processos agroindustriais e culturas não comestíveis. A integração das tecnologias 1G e 2G da produção de etanol é crucial para aproveitar de forma integral a biomassa e otimizar a produção deste biocombustível (PINHEIRO, 2022).

O processo de integração das tecnologias 1G e 2G baseia-se em Perez et al. (2022), que avaliaram a produção de etanol através mistura de melaço com hidrolisado hemicelulósico ácido bruto do bagaço da cana-de-açúcar usando uma levedura recombinante de alta performance (capaz de fermentar de forma eficiente a xilose, sacarose e glicose) imobilizada em esferas de alginato de cálcio em um biorreator de leito fixo operando em bateladas repetidas. Ao utilizar o melaço, matéria-prima rica em sacarose, caracterizado como um subproduto da produção da produção de açúcar, no meio hidrolisado, foi possível obter elevadas produtividades de etanol próximas de 20 g/L/h, e rendimentos de etanol entre 0,35 e 0,51 $\frac{g_{etanol}}{g_{ART}}$. Assim, o uso do melaço para a produção de etanol 2G permitiu aumentar o teor de açúcares no mosto fermentativo, minimizar os riscos de contaminação do processo fermentativo devido a rápida assimilação da glicose pela levedura e ainda diluiu os componentes tóxicos do processo fermentativo como o furfural, ácido acético, hidroximetilfurfural.

Nesse contexto, o presente trabalho visa realizar a avaliação das emissões de CO₂ da produção integrada 1G e 2G de etanol através da avaliação das emissões de GEE utilizando a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV). O *software* SimaPro e indicador ambiental aquecimento global (em inglês *Global Warming GWP100*) do método CML Baseline 2000 foram empregados. Ademais, foi realizado uma análise comparativa da produção integrada 1G e 2G com o processo convencional (1G) da cana-de-açúcar e milho, e 1G2G encontrados na literatura.

Metodologia

A categoria de impacto GWP100 calculado a partir da ACV foi utilizado para calcular a pegada de carbono do processo 1G2G. A pegada de carbono calculou todas as emissões de dióxido de carbono (CO₂) atribuídas a produção de etanol considerando as etapas agrícolas e industriais, através do *software* SimaPro, e o método CML Baseline 2000. O processo de produção de etanol integrado 1G e 2G foi simulado, considerando os dados do processo 1G de Longati et al. (2018) e de Perez et al. (2022) para o processo 2G, seguindo as etapas de produção de etanol de acordo com a Figura 1.



Fonte: Elaboração dos autores.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

A planta avaliada processa 4 milhões de toneladas de cana por safra (833 t/h de cana-de-açúcar durante 240 dias por ano com 87% de tempo útil). A cana-de-açúcar é produzida, colhida e transportada para usina, passando pelo processo de limpeza a seco, extração e tratamento do caldo. A palha, recolhida do campo e enfardada, é levada a usina, onde é misturada as impurezas vegetais (da etapa de limpeza da cana) e direcionada a etapa de cogeração de energia. O caldo tratado é dividido em duas parcelas, a primeira é direcionada a etapa 1G da biorrefinaria para a produção convencional do etanol (com as etapas de concentração, fermentação, destilação e desidratação), enquanto a outra parcela é direcionada a etapa 2G para a produção de melaço (com 88 graus Brix). O bagaço, obtido na extração do caldo, é dividido em duas correntes. A primeira é enviada para a etapa de cogeração (como combustível da caldeira), e a outra corrente é encaminhada para o setor 2G da planta. O bagaço primeiramente passa pela etapa de pré-tratamento ácido (para romper a estrutura recalcitrante da biomassa e acessar os seus componentes lignocelulósico), resultando em duas frações: líquida e sólida. A líquida, representa a hemicelulose solubilizada (rica em xilose) e outros produtos da degradação da biomassa (furfural, ácido acético), sendo direcionada a etapa de fermentação 2G. A fração sólida é destinada a etapa de cogeração como outro combustível da caldeira. O mosto fermentativo 2G é formado pela fração líquida do pré-tratamento ácido suplementada com 10% (v:v) de melaço. O microrganismo utilizado no processo 2G consiste em uma levedura recombinante, *Saccharomyces cerevisiae* MDS130 propagada (em um meio de cultura composto por melaço e xilose) e imobilizada (em esferas de alginato de cálcio). Ao final de cada batelada, o meio fermentado é removido e direcionado a etapa 1G de destilação e desidratação do etanol, as leveduras imobilizadas ficam retidas no bioreator.

As frações de bagaço e de caldo na biorrefinaria são calculados na simulação, de forma a suprir toda a demanda energética da planta e maximizar a produção de etanol. A planta produz etanol e eletricidade. A unidade funcional foi definida em 1 MJ e alocação energética foram consideradas, de acordo com a norma ISO 14040 e 14044. As entradas e saídas do sistema, tanto de energia como de material, que representam o inventário do processo, foram obtidas através da simulação do processo no *software* EMSO. O inventário utilizado (Tabela 1) foi obtido do banco de dados do *software* SimaPro. As principais emissões para atmosfera foram estimadas por meio do setor de fermentação, destilação do etanol e da cogeração (com a queima dos combustíveis da caldeira, como a palha, bagaço e os sólidos pré-tratados).

Tabela 1 - Principais inventários utilizados na análise ambiental da produção de etanol.

Componente	Inventário (SimaPro)
Cana-de-açúcar	Longati et al. (2019)
Bagaço	Bagasse, from sugarcane {BR} cane sugar production with ethanol by-product Alloc Rec, S
Ácido fosfórico	Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state {GLO} market for Cut-off, U
Hidróxido de cálcio (CaOH ₂)	Longati et al. (2019)
Monoetilenoglicol (MEG)	Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U
Alginato de cálcio	Gilpin (2016)
Hidróxido de sódio	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, U
Cloreto de cálcio	Calcium chloride {RoW} market for calcium chloride Cut-off, U
Melaço	Sugar cane molasses, at processing/BR Mass, U, Agri-footprint 5 - Mass allocation
Ampicilina	Harding (2008)
Ácido sulfúrico	Sulfuric acid {RoW} market for sulfuric acid Cut-off, U
Amônia	Ammonia, anhydrous, liquid {RER} market for ammonia, anhydrous, liquid Cut-off, U

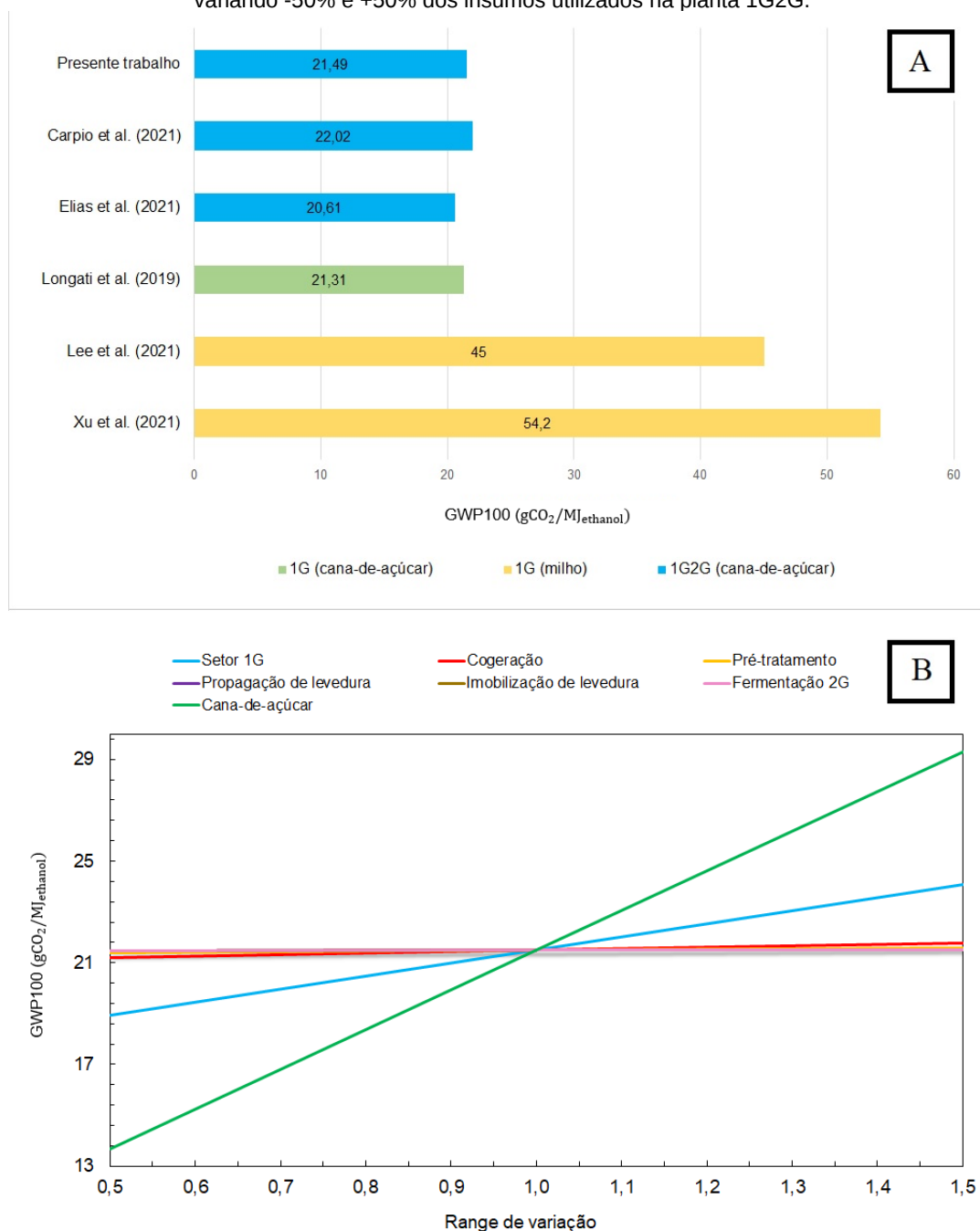
Fonte: Elaboração dos autores.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Resultados

A estimativa das emissões de CO₂ considerando uma abordagem do berço ao portão está apresentada na Figura 2A, que também dispõe de resultados de emissões de CO₂ da literatura para outros biocombustíveis. A Figura 2B avalia como a variação de -50% e +50% dos insumos e matérias-primas utilizados em cada um dos setores da biorrefinaria impacta o indicador ambiental GWP100.

Figura 2 – A) Emissões de CO₂ do processo 1G2G e comparação com as emissões de CO₂ com outros processos de produção de etanol encontrados na literatura; (B) análise de sensibilidade do processo integrado variando -50% e +50% dos insumos utilizados na planta 1G2G.



Fonte: Elaboração dos autores.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Discussão

A planta 1G2G, em que utiliza o melaço para suplementar a produção de etanol 1G2G, emite 21,49 gCO₂/MJ, valor levemente superior às emissões de etanol 1G encontrados como 21,31 gCO₂/MJ por Longati et al. (2019). Isso é explicado pela maior quantidade de insumos utilizados no processo industrial 2G, nas etapas de pré-tratamento ácido do bagaço (com o uso do ácido sulfúrico), propagação e fermentação 2G (com o uso de nutrientes e insumos para o suporte do biocatalisador). Um resultado similar foi demonstrado por Carpio et al. (2021), que ao produzir etanol a partir da celulose da biomassa necessitou de uma grande quantidade de enzimas para realizar a hidrólise da celulose e aumentar a produção de etanol 2G, resultando em um aumento no indicador ambiental GWP100 quando comparado com o processo 1G de cana-de-açúcar. Por outro lado, Elias et al. (2021) apesar de utilizarem um processo integrado 1G2G de produção de etanol, composto por pré-tratamento hidrotérmico, hidrólise da celulose e fermentação da fração C5, obteve melhores resultados ambientais (emissão de 20.61 gCO₂/MJ) que os demais processos dispostos na Figura 2A.

Quando comparado as emissões do etanol 1G2G com as emissões do etanol de milho, o desempenho ambiental do cenário foi 2,1 vezes melhor que o cenário 1G de Lee et al. (2021) (23,51 gCO₂/MJ_{etanol} a menos) e 2,52 vezes (32,71 gCO₂/MJ_{etanol} a menos) para Xu et al. (2022) devido a etapa agrícola e transporte, e de processamento da matéria-prima. A produção da cana-de-açúcar necessita de uma menor quantidade de produtos químicos (herbicidas) e fertilizantes no campo, consome menos combustíveis fósseis ao ser transportada a biorrefinaria. Além disso, seu processamento na biorrefinaria é mais simples, uma vez que não precisa de uma etapa de hidrólise do amido a açúcares fermentescíveis como acontece no processo de etanol de milho.

A análise de sensibilidade da biorrefinaria 1G2G destacou a cana-de-açúcar como a matéria-prima que mais influência o indicador GWP100, seguida pelos insumos utilizados no setor 1G (Figura 2B). A cana-de-açúcar está atrelada a etapa de produção e colheita da cana, e transporte a usina. Enquanto o setor 1G, engloba todas as emissões das etapas desde o processamento da cana na usina até a destilação do etanol, que utilizam diversos produtos como ácido fosfórico, cal, ácido sulfúrico para a produção de etanol, o que contribui para o aumento deste indicador ambiental.

Conclusão

O processo integrado emite 21,49 gCO₂/MJ, um desempenho ambiental levemente inferior ao processo tradicional 1G de cana-de-açúcar que emite 21,3 gCO₂/MJ. O aumento das emissões são em função da maior quantidade de insumos utilizados para a produção de etanol 2G. Quando comparada as emissões do processo integrado com o etanol 1G do milho, o desempenho ambiental é consideravelmente superior, principalmente devido as emissões das etapas agrícola e de transporte, e de processamento da matéria-prima. Assim, embora o processo integrado 1G2G seja promissor e aproveite de forma integral a biomassa (principalmente a parte subutilizada da biomassa, como a fração hemicelulósica), para se tornar viável ambientalmente, ele necessita de processos mais eficientes com insumos menos poluentes ou utilizados em menores quantidades.

Referências

ELIAS, Andrew Milli; LONGATI, Andreza Aparecida; DE CAMPOS GIORDANO, Roberto; FURLAN, Felipe Fernando. Retro-techno-economic-environmental analysis improves the operation efficiency of 1G-2G bioethanol and bioelectricity facilities. **Applied Energy**, [S. l.], v. 282, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116133.

GILPIN, Geoffrey Sean. **The environmental life cycle assessment of selected 1 st through 3 rd generation biofuels within the context of sustainable development**. 2016. Tese (Doutorado em Filosofia) - Norwegian University of Life Sciences, Faculty of Environmental Science and Technology, [S. l.], 2016.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

HARDING, Kevin. **A Generic Approach to Environmental Assessment of Microbial Bioprocesses through Life Cycle Assessment (LCA)**. 2008. Tese (Doutorado em Filosofia) - University of Cape Town, Cape Town, 2008.

IEA. **Energy Statistics Data Browser**. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. Acesso em: 9 dez. 2022.

LEE, Uisung; KWON, Hoyoung; WU, May; WANG, Michael. Retrospective analysis of the U.S. corn ethanol industry for 2005–2019: implications for greenhouse gas emission reductions. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 1318–1331, 2021. DOI: 10.1002/bbb.2225.

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 Vinsasse 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.

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.

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.

RODRÍGUEZ CARPIO, Roymel; DE CARVALHO MIYOSHI, Simone; ELIAS, Andrew Milli; FURLAN, Felipe Fernando; DE CAMPOS GIORDANO, Roberto; SECCHI, Argimiro Resende. Multi-objective optimization of a 1G-2G biorefinery: A tool towards economic and environmental viability. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 284, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125431.

SANTOS, Clara Virgínia Marques; RUZENE, Denise Santos; SILVA, Daniel Pereira. Aspectos para implantação de uma biorrefinaria como alternativa para melhorar a matriz energética. **Anais do IX Simpórtio de Engenharia de Produção de Sergipe**, [S. l.], p. 654–666, 2017. DOI: ISSN 2447-0635. SARANGI, Prakash Kumar; NANDA, Sonil; MOHANTY, Pravakar. **Recent advancements in biofuels and bioenergy utilization**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1007/978-981-13-1307-3.

XU, Hui; LEE, Uisung; WANG, Michael. Life-cycle greenhouse gas emissions reduction potential for corn ethanol refining in the USA. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 671–681, 2022. DOI: 10.1002/bbb.2348.

Agradecimentos

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