PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS JUNTO AO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR E À PRODUÇÃO DE BIOGÁS: ESTUDO PROBABILÍSTICO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Sergio Luiz Pinto Castiñeiras-Filho, Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e Instituto de Energia da PUC-Rio, +55 (21) 995307210, [sergiocastfh@gmail.com](mailto:sergiocastfh@gmail.com)

Carlos de Lamare Bastian-Pinto, Escola de Negócios (IAG) da PUC-Rio, carlos.bastian@iag.puc-rio.br

Florian Pradelle, Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e Instituto de Energia da PUC-Rio, [pradelle@puc-rio.br](mailto:pradelle@puc-rio.br)

# Introdução

Em 2022, a cana-de-açúcar compõe 15,4% da oferta interna de energia do país, através das participações de etanol e bioeletricidade como sendo os principais produtos das usinas atualmente (EPE, 2023). Além disso, o Brasil é um dos países com políticas de descarbonização do setor de transportes mais consolidadas, diante da regulação que promove a adição de etanol anidro à gasolina (27 %v) e do biodiesel ao diesel (14 %v desde o 01 de março de 2024), e, de forma emergente, desenvolve o programa de Renovabio, que envolve a comercialização de créditos de carbono entre produtores de biocombustíveis e distribuidoras. Neste contexto, a eficiência econômica e ambiental na produtividade agrícola, bem como o desenvolvimento tecnológico (ex: etanol de 2ª geração, produção de biogás), são constantemente estimulados no país. Um desdobramento pouco investigado até então é a sinergia entre a produção de microalgas ricas em lipídeos junto aos excedentes de energia e gás de exaustão rico em CO2 (ex: cogeração de bagaço, biogás, gás de fermentação) do setor sucroalcooleiro, para a produção de biodiesel de 3ª geração. Em geral, microalgas possuem elevadas produtividades em relação às culturas agrícolas, o que traz benefícios no sentido de se reduzir a expansão da fronteira agrícola (Mota et al., 2022). Todavia, os fatores econômicos impeditivos para a promoção do cultivo de microalgas para seu processamento em biocombustíveis, se deve ao elevado custo de fontes de CO2 e a intensidade energética (térmica e elétrica) para se processar a biomassa de alta umidade. Portanto, a integração desta possibilidade de exploração de biomassa junto a outras cadeias produtivas, como a indústria do etanol, são uma das formas mais relevantes para aumentar a eficiência global e adquirir atributos ambientais para o sistema produtivo como um todo.

Assim, este trabalho realiza uma avaliação econômica desta sinergia, considerando o cultivo autotrófico de microalgas para produção de biodiesel, utilizando-se fontes biogênicas de CO2 tipicamente rejeitadas por uma destilaria de etanol de cana-de-açúcar, isto é, o gás de exaustão do sistema de cogeração (ex: queima do bagaço de cana) e do gás da fermentação de açúcares relativo à produção de etanol. Para mitigar as demandas energéticas incrementadas pela planta de biodiesel de microalgas, considera-se sistemas de biodigestão para se produzir biogás a partir de vinhaça, torta filtro (resíduos explorados atualmente pelo setor no Brasil) e restos das microalgas (biomassa residual após a extração do óleo). O biogás é queimado no âmbito industrial, atendendo às demandas térmicas, incrementando a produção de energia elétrica no sistema de cogeração, e disponibilizando CO2 para ser reaproveitado pelo cultivo de microalgas. A configuração de planta industrial proposta, inédita dentre outros conceitos explorados para esta sinergia com o setor sucroalcooleiro (Albarelli et al., 2018; Souza et al., 2015), provém de uma simulação realizada no software Aspen Hysys. A avaliação econômica é realizada considerando variabilidades da produtividade de microalgas, investimentos em capital para as expansões industriais, preço do biodiesel no mercado brasileiro, e preço de créditos de carbono.

# Método

Uma simulação da produção de etanol de cana e de biodiesel de microalgas foi conduzida no software Aspen Hysys. O sistema típico de produção de etanol compreende o processamento de 500 t/h de cana, com rendimentos em torno de 85 L etanol/t cana e 60 kWh/t cana de energia elétrica excedente, ao considerar que todo o bagaço disponível é utilizado para fins de cogeração, isto é, produção de vapor e energia elétrica. Assim, esse excedente considera uma planta autossuficiente, em termos energéticos, com o bagaço derivado da moagem. Essa planta padrão de etanol de cana-de-açúcar tem seu detalhamento reportado em Castiñeiras-Filho e Pradelle (2020). A esta seção industrial, foi acoplada a simulação do cultivo de microalgas e seu processamento em biodiesel. A planta de biodiesel de microalgas consiste na captação dos efluentes ricos em CO2 (gás de fermentação e exaustão da cogeração), direcionando-os para o cultivo autotrófico de microalgas em um sistema análogo ao de lagoas. A biomassa de microalgas é refinada através de etapas mecânicas e térmicas, que reduzem sua umidade, de modo que seu conteúdo lipídico seja extraído com solvente (hexano). Assim, a extração de óleo e a condução da reação de transesterificação, sob catálise alcalina, com metanol como sendo o álcool reagente, é realizada de maneira similar ao processamento de matérias-primas vegetais utilizados para produção de biodiesel de 1ª geração (ex: soja). Detalhes sobre as operações unitárias são reportados em Castiñeiras-Filho e Pradelle (2023). Após a extração do óleo, o resíduo de microalgas foi considerado para um sistema de digestão anaeróbia, de modo a produzir biogás. Assim, incorporou-se na simulação a produção de biogás a partir deste resíduo, além da consideração de vinhaça e torta filtro, visto que estes dois vem sendo adotados pelo setor.

Conforme a metodologia de encadeamento técnico descrita acima, a avaliação econômica considerou três expansões principais sobre a planta padrão de produção de etanol: a expansão do sistema de cogeração para comportar o uso da energia do biogás, o sistema de digestão anaeróbia, e a planta de biodiesel de microalgas. Assim, construiu-se um fluxo de caixa incremental pertinente à biorrefinaria proposta, sobre o qual se calculou o valor presente líquido e a taxa interna de retorno como indicadores principais. De modo a se realizar uma avaliação estocásticas da viabilidade técnico-econômica da biorrefinaria, o Método de Monte Carlo foi aplicado, considerando funções de densidade de probabilidade para os seguintes parâmetros de entrada: fator de escala exponencial (Turton, 2018) para o cultivo de microalgas, CAPEX total da expansão, produtividade das microalgas, preço do biodiesel (ANP, 2023), e preço dos créditos de carbono. Desta forma, conclui-se a avaliação do VPL e TIR da biorrefinaria de maneira probabilística.

# Resultados

Espera-se diagnosticar a viabilidade econômica da biorrefinaria sendo proposta, considerando que as demandas energéticas são totalmente preenchidas pelo sistema de cogeração, com o uso de bagaço e de biogás derivados dos resíduos. Assim, entende-se que a simulação mantém a autossuficiência energética da planta de etanol, ao passo que é capaz de agregar biodiesel em seu portfólio de produtos. Diante da disponibilidade de CO2 (derivado de correntes que seriam despejados no ambiente) e de energia de baixo custo, a avaliação econômica permite avaliar o quanto os componentes de investimento em capital oneram a viabilidade da biorrefinaria, frente às receitas de vendas de biodiesel e eletricidade excedente. A análise de um cenário base determinístico pode demonstrar o quanto o setor poderia estar propenso a acatar este tipo de tecnologia, considerando um custo de oportunidade típico em torno de 10%a.a. De forma complementar, a consideração de créditos de carbono permite avaliar o quanto a biorrefinaria depende do desenvolvimento deste tipo de mercado. Como resultados complementares à análise econômica, o grau de mitigação de emissões de gases de efeito estufa dos biocombustíveis são também apresentados. Por fim, a probabilidade de sucesso econômico da biorrefinaria será avaliada conforme as variabilidades e incertezas referentes à produtividade esperada para as microalgas, grau de ganho de economia de escala do sistema de cultivo, aos investimentos em capital como um todo, e aos preços do biodiesel e CO2 evitado.

**Conclusões**

A avaliação econômica da biorrefinaria demonstra os contextos necessários para que a tecnologia de cultivo de microalgas e seu processamento em biodiesel possa ser considerada viável pelo setor sucroalcooleiro no Brasil. Os resultados encontrados devem indicar que tipos de estímulos podem ser direcionados por políticas públicas, de modo a fomentar a descarbonização do setor de transporte e o desenvolvimento tecnológico acerca da exploração de bioenergia. Trabalhos futuros podem contemplar a avaliação econômica da biorrefinaria quando considerados outros aspectos, tais como outros usos finais ao biogás (ex: biometano), incorporação da palha de cana-de-açúcar como insumo industrial, e a alocação do bagaço entre o sistema de cogeração ou produção de etanol de 2ª geração.

# Referências

Albarelli, J.Q., et al. **Comparison of extraction techniques for product diversification in a supercritical water gasification-based sugarcane-wet microalgae biorefinery: Thermoeconomic and environmental analysis.** Journal of Cleaner Production 201, 697-705. 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618324818>

ANP. **Biodiesel**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>.

Castiñeiras-Filho, S. L. P., Pradelle, F. **Modeling of microalgal biodiesel production integrated to a sugarcane ethanol plant: Energy and exergy efficiencies and environmental impacts due to trade-offs in the usage of bagasse in the Brazilian context.** Journal of Cleaner Production 395, 136461. 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623006194>

EPE. **Balanço Energético Nacional 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>

Mota, G.F. et al. **Biodiesel production from microalgae using lipase-based catalysts: Current challenges and prospects.** Algal Research 62, 102616. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102616>.

Souza, S. P., et al. **Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery.** Energy 81, 373-381. 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214014224>

Turton, R., et al. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes (International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences)**. Pearson. 2018