

Modelo Econômico como Ferramenta de Tomada de Decisões para a Produção de Biodiesel a partir de Microalgas

Economic Model as a Decision-Making Tool for Biodiesel Production from Microalgae

Bruno Alves de Oliveira,^{a,*} Flávia Talarico Saia,^b Jose Juan Barrera Alba,^b Cláudia Aparecida de Mattos^a

^a Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Mecânica, CEP 09850-901, São Bernardo do Campo-SP, Brasil.

^b Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar, Campus Baixada Santista, CEP 11070-100, Santos-SP, Brasil.

*E-mail: brunifesp@gmail.com

Recebido em: 2 de Abril de 2021

Aceito em: 23 de Abril de 2021

Publicado online: 11 de Fevereiro de 2022

Microalgae are fast-growing single-celled organisms and have been widely studied for biodiesel production. Cultivation does not require agricultural land and can be done using wastewater. After bibliographic review, it was observed that most of the economic studies on the production of microalgal biodiesel use deterministic traditional accounting and estimates large-scale production, with biorefinery processes, requiring high investments and considerable time for operation. This study conducted a probabilistic analysis for a small-scale biodiesel production scenario, applying Monte Carlo simulation techniques. At the same time, an economic model was proposed as a decision-making tool based on the detailed construction of Capex and Opex, costing each stage of the production process and multi-scenario economic simulation. To reinforce the analysis, NPV and IRR investment techniques were used, and sensitivity analysis, identifying the variables with the greatest impact on biodiesel production and, consequently, cash flow. The study demonstrated that the production of small-scale biodiesel is financially unfeasible under conditions in 2019 and that the largest economic offender in this type of project is Capex. However, the work expands the discussion on the results of simulations, addressing economic aspects still little discussed in studies on the subject, such as the financial impact of biodiesel corrections in the national quality standard (RANP 45), carbon credits and incentive and subsidy policies to facilitate the feasibility of low environmental impact projects.

Keywords: Economic modeling; Monte Carlo simulation; biofuels

1. Introdução

As microalgas são organismos unicelulares capazes de crescer mais rapidamente do que qualquer planta superior,¹ e vêm sendo amplamente estudadas para a produção de bioprodutos, como os biocombustíveis. O cultivo de microalgas não requer terra agricultável e pode ser feito utilizando água residuária rica em nutrientes.^{2,3}

A partir da biomassa das microalgas, que in natura pode servir de insumo animal (ração) e fertilizante, é possível obter biodiesel, biometano (biogás rico em metano), bio-hidrogênio, bioetanol e bioeletricidade. Além disso, as microalgas promovem parte do tratamento de águas residuárias e podem também servir para a extração de produtos de alto valor agregado, tais como vitaminas, antioxidantes e ácidos graxos poli-insaturados.⁴

A maioria dos estudos econômicos sobre a produção de biocombustíveis de microalgas apresenta uma contabilidade tradicional de custos e investimento de capital, onde os resultados entre estes estudos são divergentes e de difícil cruzamento de informações, de modo que os custos são considerados como constantes.⁵ Na realidade, todavia, os custos não são constantes e deste modo é necessário o uso de modelos estocásticos para as análises de viabilidade econômica.⁶ Outro aspecto que pode ser considerado é a larga escala (biorrefinaria), presente nos principais estudos que utilizam modelos probabilísticos relacionados aos biocombustíveis de microalgas.⁷⁻¹³ Obviamente, os grandes empreendimentos como as biorrefinarias requerem grandes investimentos de capital e considerável tempo até a operação.

O presente estudo buscou desenvolver um modelo econômico probabilístico como ferramenta de tomada de decisões para a produção de biodiesel a partir de microalgas, avaliando a pequena escala e utilizando a simulação Monte Carlo como meio de integrar a análise de risco ao processo de análise econômica.

2. Material e Métodos

2.1. Descrição do sistema

Para o desenvolvimento do modelo econômico, foi estabelecido um sistema teórico da produção do biodiesel de microalgas (Figura 1), com a utilização de métodos mais usuais em cada processo. Vale ressaltar que há uma grande variedade de métodos e tecnologias e que a combinação destas deve ser escolhida de acordo com cada projeto.

Este processo conceitual é composto por cinco etapas: (1) cultivo; (2) colheita e secagem; (3) pré-tratamento; (4) extração e; (5) transesterificação. Após a transesterificação, o biodiesel bruto ainda necessita de caracterização físico-química para posterior correções de enquadramento nos parâmetros estabelecidos pela norma RANP 45.¹⁴

2.2. Modelo econômico

O modelo econômico deste trabalho (Figura 2) foi desenvolvido através da construção detalhada das despesas de

capital (Capex); levantamento dos custos operacionais (Opex) para cada etapa; técnicas de simulação Monte Carlo através do *software* Oracle Crystal Ball® (versão 11.1.2.4.850 - 64 bits) utilizado no sistema operacional Microsoft Windows 10, como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica e; análise de sensibilidade, identificando as variáveis que exercem maior impacto na produção do biodiesel e conseqüentemente no fluxo de caixa.

Os dados de entrada do modelo econômico foram estimados a partir de estudos publicados.^{15,16} A microalga utilizada nestes estudos foi a *Tetraselmis* sp., que pode ser cultivada em água salobra ou salgada. A glicerina, um subproduto da reação de transesterificação, não foi incorporada ao modelo econômico devido às baixas quantidades e baixo valor de mercado.

A Tabela 1 mostra os dados referentes ao detalhamento do Capex. Estes valores foram estimados em 2019 através de consultas em treze empresas brasileiras, optando-se pelo menor orçamento. Para a colheita e secagem foram estimados os preços de um tanque de sedimentação projetado para um volume de 70 m³, que é o volume de retirada do fotobiorreator operado em semi contínuo,

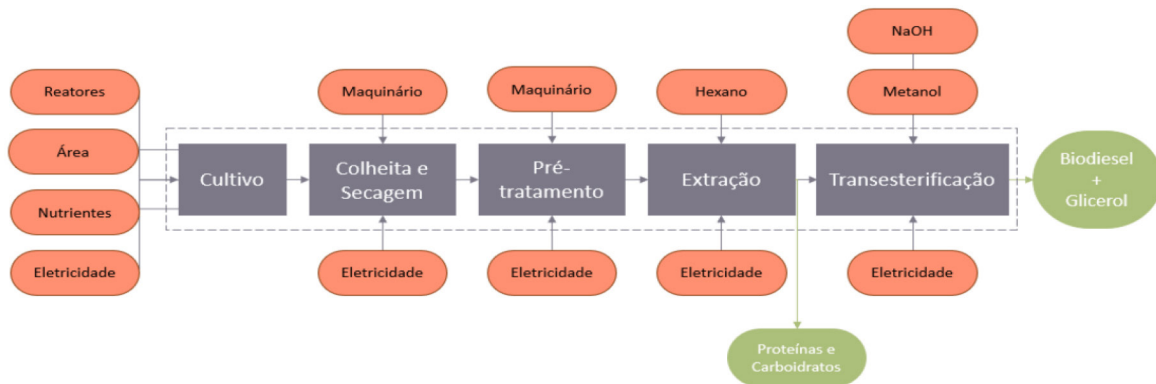


Figura 1. Sistema de produção de biodiesel de microalgas.

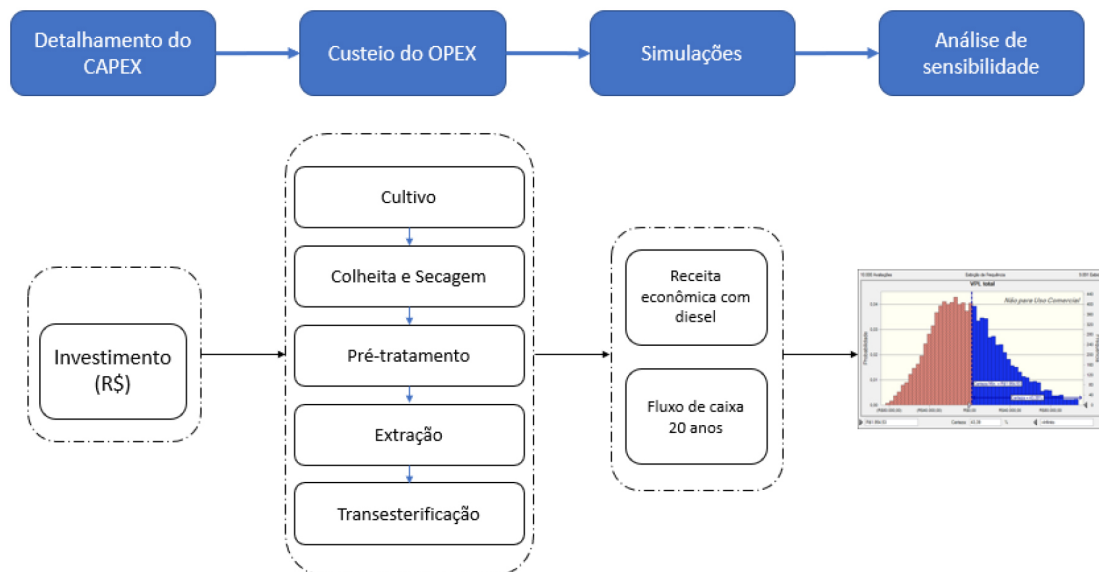


Figura 2. Modelo econômico.

Tabela 1. Despesas de capital (Capex)

Processo	Descrição	Valor (R\$)
Cultivo	Fotobiorreator Tubular (100 m ³)	80.000,00
	Sistema de bombeamento de água	1.700,00
	Sistema de injeção de CO ₂	15.000,00
	Sistema de circulação cultivo	600,00
	Sistema de iluminação	5.000,00
	Ar-condicionado	1.000,00
Colheita/Secagem	Centrífuga	12.500,00
	Tanque de sedimentação	35.000,00
	Estufa	2.500,00
	Armazenamento	1.700,00
Pré-tratamento	Materiais para a ruptura celular	1.500,00
Extração	Materiais para extração	1.400,00
	Materiais	450,00
Transesterificação	Padrão de qualidade	1.000,00
	Armazenamento	3.500,00
SUBTOTAL		162.850,00
Depreciação	10% do SUBTOTAL	16.285,00
<i>Custos indiretos</i>		
Desenvolvimento de <i>site</i>		2.279,90
Mão-de-obra		22.137,50
Trabalho e construção		10.000,00
Outros custos		16.285,00
<i>Capital não depreciável</i>		
Custo da área (ano)		4.800,00
TOTAL Capex		234.637,40

centrífuga de pequeno porte para concentrar a biomassa, uma estufa de secagem e recipiente para armazenamento, também de pequeno porte.

A Tabela 2 mostra o detalhamento Opex. A injeção de CO₂ foi estimada em (99,99% a 1,5 bar) – roto-evaporador 20 L min⁻¹, com Valor médio de 4.870,0 L dia⁻¹ (1,5 bar) equivalente a 13,20 kg dia⁻¹. O consumo de reagentes estimados em 0,06 kg dia⁻¹ de etanol e 0,56 kg dia⁻¹ de

hexano, cujos valores semelhantes foram estimados em outro estudo.¹¹ Além disso, foi estimada a utilização de dois técnicos para os dois processos: (a) Produção de lipídio e (b) Transesterificação.

A produtividade de biomassa, a produção média anual de lipídio, teor lipídico e a densidade celular após colheita foram estimados a partir dos experimentos realizados na escala de laboratório.¹⁵ Outros parâmetros operacionais,

Tabela 2. Despesas anuais de operação (Opex)

Processo	Descrição	Valor (R\$)
Produção de lipídio	Injeção de CO ₂	20.000,00
	Consumo de solvente	10.000,00
	Manutenção reator (10 anos reposição de tubos)	8.000,00
	Utilidades (refrigeração, água etc.)	15.000,00
	Trabalho e despesas gerais	12.000,00
	Manutenção, impostos e seguro	5.000,00
Transesterificação	Reagentes	1.700,00
	Utilidades (refrigeração, água etc.)	850,00
	Trabalho e despesas gerais	12.000,00
	Manutenção, impostos e seguro	4.000,00
TOTAL Opex		88.550,00

como a reciclagem de água, colheita e secagem, extração, perdas na extração, consumo de metanol, hexano e demanda de CO₂ foram estimados a partir de outro estudo.¹¹

As variáveis estocásticas incorporadas ao modelo econômico foram: (a) Preço do diesel de petróleo; (b) Rendimento lipídico e; (c) Inflação.

3. Resultados e Discussão

O fluxo de caixa foi projetado para 20 anos de projeto, com taxa de desconto de 6,5% sobre a receita e valor de venda do biodiesel igual ao do diesel de petróleo. O projeto mostrou-se inviável para implementação em 2019, com VPL negativo de R\$ 880.901,76.

Foi elaborado um outro cenário com uma microalga mais produtiva, da *Tetraselmis* sp. (70,18 L ano⁻¹) para a *Arthrospira platensis* (2.148,87 L ano⁻¹). Fazendo-se toda a simulação novamente, o VPL continuou com um valor negativo de R\$ 874.075,60. Ou seja, cultivando uma microalga das mais produtivas descritas na literatura, o projeto também não é viabilizado.

Para validar o modelo de risco e ampliar o entendimento sobre a viabilidade econômica do processo de produção do biodiesel neste estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade, elevando-se virtualmente em 200 vezes o valor de produtividade em óleo, que é o valor quando as receitas superam as despesas. Os resultados das simulações desta análise de sensibilidade estão representados na Figura 3.

A Figura 3 representa a distribuição de probabilidade para o Valor Presente Líquido (VPL). O simulador que gera esta curva de distribuição de probabilidade do VPL fez 10.000 interações, combinando em cada uma delas os valores de cada variável estocástica, dando como resultado um valor de VPL e a sua chance de ocorrência. Por exemplo, ele calcula o VPL com um preço de diesel de petróleo combinado a um valor de produtividade e inflação.

Como estes três valores variam com o tempo, pode-se realizar inúmeras combinações com diferentes resultados para o VPL. Através desta curva pode-se estimar um valor de VPL atrelado a um percentual de certeza com uma certeza de 50,29%, o VPL é R\$ 177.414,47. Ou seja, existe uma chance de 50% de ocorrência deste valor de VPL, cabendo aos gestores decidirem qual é um valor aceitável para o projeto.

Para que o projeto se tornasse viável seria necessário um valor de produtividade 200 vezes maior do que a obtida em escala de laboratório.¹⁵ Isso mostra que o alto investimento de capital, especialmente o custo do fotobiorreator tubular, é muito elevado em relação às receitas obtidas ao longo dos 20 anos de operação da planta.

O modelo inclui ainda as despesas com o pré-tratamento da biomassa para a extração lipídica, o que é recomendado para a produção em larga escala, aumentando a eficiência de extração,¹⁷ e ainda as despesas com as análises e enquadramento do biodiesel na norma RANP 45, o que eleva ainda mais o Capex e Opex, sendo este procedimento desconsiderado nas principais publicações.

A melhoria de algumas políticas nacionais, como o RenovaBio, pode facilitar a implementação de projetos ambientalmente amigáveis. Todavia, por enquanto, os biocombustíveis de microalgas ainda não são considerados como alternativa pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, apesar do seu potencial já bastante conhecido no meio acadêmico, especialmente por se tratar de combustíveis livres de carbono em sua produção. Portanto, o aprofundamento da discussão em torno dos créditos de carbono é interessante.

4. Conclusão

As microalgas são promissoras fontes renováveis de combustíveis. A avaliação econômica da viabilidade de um projeto de pequeno porte produziu resultados diferentes dos

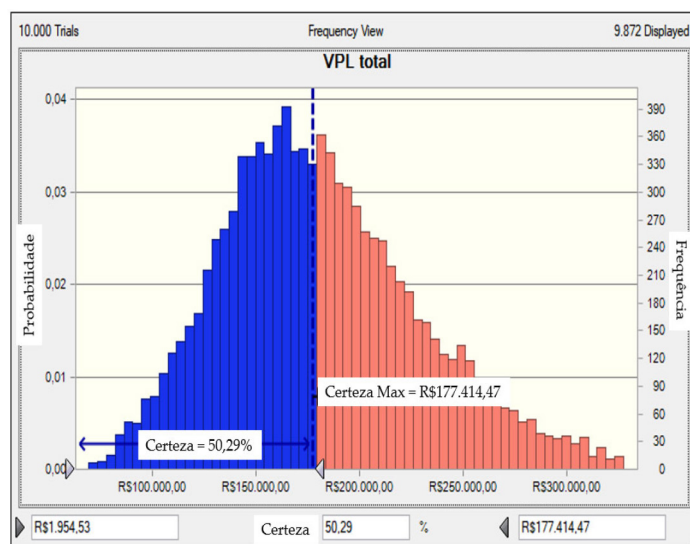


Figura 3. Análise de sensibilidade do modelo econômico.

trabalhos com base em larga escala, o que deve ser discutido em estudos futuros.

A produtividade das algas é importante, porém aumentá-la em 200 vezes, de modo a viabilizar a produção, não é factível. O maior ofensor econômico é o Capex, mostrando que outras tecnologias e integração de processos como o Biodiesel-Biogás podem reduzi-lo. A produção de outros bioprodutos pode também ser interessante, haja vista o baixo valor de venda do biodiesel e da glicerina. Uma alternativa seria a utilização de investimentos de fundo perdido advindos de tributação sobre fontes não renováveis.

O trabalho contribui com o desenvolvimento de um modelo probabilístico como ferramenta de gestão e avaliação de riscos, auxiliando na tomada de decisão, não somente na produção de biodiesel a partir de microalgas, mas como também em outros projetos com outros produtos. O modelo econômico é de fácil atendimento e possibilita identificar os principais ofensores econômicos do sistema produtivo.

Deseja-se ainda que sejam ampliadas as discussões sobre políticas públicas de incentivos a projetos ambientalmente amigáveis, sobre a evolução do RenovaBio e sobre os Créditos de Carbono.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI e à Universidade Federal de São Paulo

Referências Bibliográficas

- Brennan, L.; Owende, P.; Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2010**, *14*, 557. [CrossRef]
- Chisti, Y.; Constraints to commercialization of algal fuels. *Journal of Biotechnology* **2013**, *167*, 201. [CrossRef] [PubMed]
- Nagabala, V.; Sivasankari, G.; Srinivasan, S. V.; Suthanthararajan, R.; Ravindranath, E.; Nutrient removal from synthetic and secondary treated sewage and tannery wastewater through phytoremediation. *Environmental Technology* **2017**, *33*(30), 1. [CrossRef]
- Enamala, M. K.; Enamala, S.; Chavali, M.; Donepudi, J.; Yadavalli, R.; Kolapalli, B.; Aradhyula, T. V.; Velpuri, J.; Kuppam, C.; Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2018**, *94*, 49. [CrossRef]
- Santibañez-Aguilar, J. E.; Morales-Rodriguez, R.; González-Campos, J. B.; Ponce-Ortega, J. M.; Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *136*, 224. [CrossRef]
- Xia, Y.; Tang, Z. C.; A novel perspective for techno-economic assessments and effects of parameters on techno-economic assessments for biodiesel production under economic and technical uncertainties. *RSC Advances* **2017**, *7*, 9402. [CrossRef]
- Richardson, J. W.; Johnson, M. D.; Outlaw, J. L.; Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Research* **2012**, *1*, 93. [CrossRef]
- Soratana, K.; Barr, W. J.; Landis, A. E.; Effects of co-products on the life-cycle impacts of microalgal biodiesel. *Bioresource Technology* **2014**, *159*, 157. [CrossRef] [PubMed]
- Souza, S. P.; Gopal, A. R.; Seabra, J. E. A.; Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. *Energy* **2015**, *81*, 373. [CrossRef]
- Cheali, P.; Posada, J. A.; Gernaey, K. V.; Sin, G.; Economic risk analysis and critical comparison of optimal biorefinery concepts. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* **2016**, *10*, 435. [CrossRef]
- Batan, L. Y.; Graff, G. D.; Bradley, T. H.; Techno-economic and Monte Carlo probabilistic analysis of microalgae biofuel production system. *Bioresource Technology* **2016**, *219*, 45. [CrossRef] [PubMed]
- Chu, P. L.; Vanderghem, C.; MacLean, H. L.; Saville, B. A.; Financial analysis and risk assessment of hydroprocessed renewable jet fuel production from camelina, carinata and used cooking oil. *Applied Energy* **2017**, *198*, 401. [CrossRef]
- Ou-Yang, C.; Chen, H. W.; Ho, C. H.; Chou, J. C.; Yuan, Y. T.; Ho, C. L.; Hsueh, H. T.; Chen, S. T.; Liao, P. C.; Chao, L. K.; Value chain analysis of algal bioenergy and carbon capture integrated with a biotechnology innovation. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *180*, 349. [CrossRef]
- Sítio da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RANP 45 - 2014. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/?path=legislacao-anp/resol-anp/2014/agosto&item=ranp-45-2014>>. Acesso em: 25 junho 2021.
- Oliveira, B. A.; *Dissertação de Mestrado*, Centro Universitário FEI, 2020. [Link]
- Pereira, H.; Páramo, J.; Silva, J.; Marques, A.; Barros, A.; Maurício, D.; Santos, T.; Schulze, P.; Barros, R.; Gouveia, L.; Barreira, L.; Varela, J.; Scale-up and large-scale production of *Tetraselmis* sp. CTP4 (Chlorophyta) for CO₂ mitigation: From an agar plate to 100-m³ industrial photobioreactors. *Scientific Reports* **2018**, *8*, 1. [CrossRef] [PubMed]
- Dickinson, S.; Mientus, M.; Frey, D.; A review of biodiesel production from microalgae. *Clean Technologies and Environmental Policy*. **2017**, *19*, 637. [CrossRef]