

# 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## **TÍTULO DO TRABALHO:**

Avaliação Econômica da Produção de Diesel Renovável com Fornecimento Alternativo de Hidrogênio

## **AUTORES:**

Pietro M. Lunardi, Priscila M. Julio, Vinicius F. Bolson, Flávio D. Mayer\*, Fernanda de Castilhos

## **INSTITUIÇÃO:**

Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, \*e-mail do autor correspondente: [flavio.mayer@ufsm.br](mailto:flavio.mayer@ufsm.br)

## AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE DIESEL RENOVÁVEL COM FORNECIMENTO ALTERNATIVO DE HIDROGÊNIO

### Resumo

Diante do crescente aumento de demanda de energia, encontrar alternativas aos combustíveis fósseis é essencial, principalmente em função dos danos ambientais associados à sua queima. Estudos sobre o uso e o desenvolvimento de fontes de energia alternativas têm sido realizados. Pode-se citar a hidrodessoxigenação de triglicerídeos e ácidos graxos (HEFA) como uma opção para a produção de combustíveis renováveis, dentre eles diesel renovável, combustível de aviação ou produtos leves, como nafta e GLP. Esse diesel, por manter suas características, pode ser utilizado diretamente em qualquer mistura com o diesel mineral. Assim, os motores não precisam ser alterados para sua utilização e ainda há a vantagem de ser proveniente de uma fonte renovável. Para que a hidrodessoxigenação (HDO) ocorra, é necessário hidrogênio. O método convencional para produzir hidrogênio é a reforma a vapor do metano (SMR). Neste trabalho, realizou-se a análise econômica de duas rotas para produção de diesel renovável a partir de óleo de soja utilizando o Software CapCost V02, a fim de possibilitar uma análise mais ampla para a escala industrial. A primeira foi uma combinação de HDO e SMR pela via tradicional servindo como base de comparação. Já a segunda, foi uma proposta alternativa usando a HDO e o proeminente SMR eletrificado (E-SMR). O dimensionamento dos equipamentos gerou os dados necessários para o cálculo do Custo Total de Investimento (TIC). O Custo Produção (CCOP) e a Análise do Fluxo de Caixa Descontado (DCFA) foram utilizados para determinar indicadores econômicos como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de Payback Descontado (DPP). Adicionalmente, realizou-se uma avaliação de risco através de simulação de Monte-Carlo variando o Custo Total de Investimento (TIC); os Preços de Venda dos Produtos; e os Custos de Matérias-Primas. Para todos eles, o limite inferior de incerteza foi de -20% e o limite superior foi de +20%. A análise de viabilidade econômica, capaz de elucidar as nuances financeiras dos processos, mostrou que ambas as rotas são viáveis economicamente. No entanto, a análise de sensibilidade de Monte-Carlo sugeriu um risco econômico maior para a segunda rota. O consumo de óleo de soja representou a maior parte dos custos das matérias-primas, enquanto o Diesel Renovável a maior parte dos rendimentos líquidos. A venda dos subprodutos também proporcionou alguma rentabilidade para a primeira rota, o que não aconteceu na segunda rota, onde todos os subprodutos leves foram consumidos para produzir hidrogênio.

Palavras-chave: hidrodessoxigenação, análise econômica, análise de risco.

### Abstract

Given the growing energy demand, finding alternatives to fossil fuels is necessary, primarily because the environmental damage associated with their combustion. Studies on the use and development of alternative energy sources have been conducted. One option is the hydrodeoxygenation of triglycerides and fatty acids (HEFA) for the production of renewable fuels, including renewable diesel, aviation fuel, or light products such as naphtha and LPG. This diesel, which maintains its characteristics, can be used directly in any blend with mineral diesel. Thus, engines do not need modifications for its use, and the additional advantage is that it is derived from a renewable source. For hydrodeoxygenation (HDO) to occur, hydrogen is required. The conventional method to produce hydrogen is steam methane reforming (SMR). In this work, an economic analysis of two routes for the production of renewable diesel from soybean oil was conducted using the Software CapCost V02, to enable a broader analysis for industrial scale. The first route was a combination of HDO and SMR via the traditional method serving as a baseline comparison. The second route was an alternative proposal using HDO and the emerging electrified SMR (E-SMR). Equipment sizing provided the necessary data for calculating the Total Investment Cost (TIC). The Cost of Production (CCOP) and Discounted

Cash Flow Analysis (DCFA) were used to determine economic indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback Period (DPP). Additionally, a risk assessment was conducted using Monte Carlo simulation varying the Total Investment Cost (TIC); Product Selling Prices; and Raw Material Costs. For all these variables, the lower uncertainty limit was -20% and the upper limit was +20%. The economic feasibility analysis, capable of elucidating the financial nuances of the processes, showed that both routes are economically viable. However, the Monte Carlo sensitivity analysis suggested a higher economic risk for the second route. The consumption of soybean oil represented the largest portion of raw material costs, while Renewable Diesel constituted the majority of net revenues. The sale of by-products also provided some profitability for the first route, which did not occur in the second route where all light by-products are consumed to produce hydrogen.

Keywords: Hydrodeoxygenation, Economic Analysis, Risk Assessment.

## **Introdução**

Segundo relatório da UNFCCC computado para o período de 2020, constata-se que 78,57% das emissões provêm do setor energético, sendo 26,87% específicas do setor de transportes, resultando em 21,11% das emissões totais relacionadas aos meios de transporte. Corrobora-se que a principal causa da poluição atmosférica [1] é a queima de combustíveis fósseis pelo setor energético, especialmente CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

Em especial no que tange ao setor de transportes, o relatório da Agência Internacional de Energia [2] mostra que, em 2019, o consumo total de petróleo foi de 173,1 EJ em energia equivalente, representando 28,56% da energia mundial e que, entre 1973 e 2019, houve uma redução de somente 8,1% na dependência de óleos fósseis. Nesse sentido, com a população mundial estimada para ultrapassar 9 bilhões até 2050, a substituição de combustíveis fósseis torna-se mandatória [3]. Portanto, os combustíveis renováveis são uma alternativa viável. Verifica-se que, nos EUA, a biomassa disponível até 2030 pode deslocar até 30% do consumo de petróleo [4], sugerindo o potencial dos biocombustíveis na descarbonização mundial. A produção de biocombustíveis como o biodiesel tem contribuído para a redução das emissões de gases de efeito estufa [5], mas enfrenta limitações, como baixa estabilidade oxidativa e problemas com misturas superiores a 20-30% [6].

Nos últimos 10 anos, tecnologias para a produção de combustíveis renováveis "*drop-ins*" têm sido desenvolvidas. Destaca-se o hidrotratamento de óleos e gorduras renováveis [7], produzindo diesel e querosene renováveis, que podem ser usados sem adaptações na infraestrutura existente. Este processo gera subprodutos valiosos como nafta e GLP, classificados também como renováveis [8]. Entretanto, quase todas essas rotas dependem de hidrogênio, geralmente obtido via Reforma a Vapor de Metano (SMR), uma fonte de hidrogênio cinza devido às emissões de gases de efeito estufa [9]. Observa-se que a literatura tem se concentrado na hidroconversão em si, com poucos estudos de simulação e análises econômicas considerando a integração de ambos os processos.

Dessa maneira, este trabalho visa preencher essa lacuna, analisando o processo de hidrodessoxigenação (HDO) de triglicerídeos/ácidos graxos junto à produção de hidrogênio, comparando dois cenários: SMR tradicional e reforma eletrificada (E-SMR), utilizando o simulador de processos UniSim Design para síntese de processos e a aplicação CapCost V02 para análise econômica.

## **Metodologia**

Neste estudo, foi realizada uma avaliação econômica comparativa de duas rotas para produção de diesel renovável, conforme apresentado na Figura 1. A rota tradicional (SMR) requer a utilização de gás natural para a produção de hidrogênio necessário na unidade HDO (Cenário SC-A). Como

alternativa, a reforma eletrificada utiliza os hidrocarbonetos leves, provenientes da unidade HDO, requerendo energia elétrica para produção de hidrogênio (Cenário SC-B).

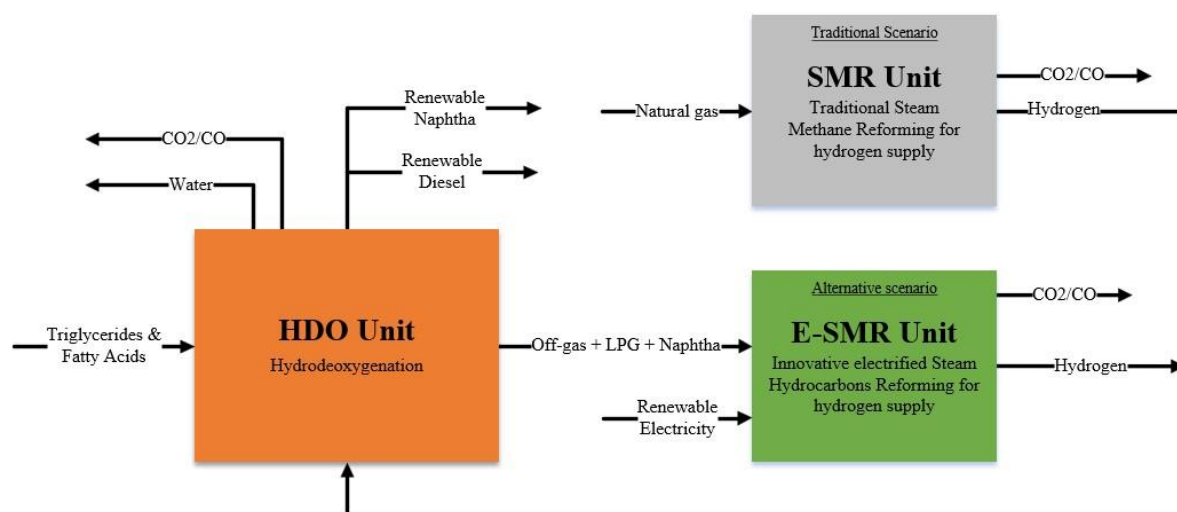


Figura 1: Diagrama das rotas investigadas para produção de diesel renovável.

A Tabela 1 apresenta as quantidades de produtos e as principais matérias-primas e insumos considerados nos dois cenários, conforme os resultados obtidos com os processos simulados.

Tabela 1: Comparação entre rendimento de produtos e consumo de matérias-primas.

| Produto/matéria-prima               | Cenário SC-A | Cenário SC-B |
|-------------------------------------|--------------|--------------|
| Óleo de soja [kg/h]                 | 38.000,00    | 38.000,00    |
| Gás natural [kg/h]                  | 3.551,45     | 0,00         |
| Dimetil disulfeto [kg/h]            | 30,40        | 30,40        |
| Água desmineralizada [kg/h]         | 22.452,00    | 25.971,50    |
| Energia elétrica [kW-h]             | 2.022,63     | 13.518,54    |
| Excedente de vapor produzido [kg/h] | 16.696,00    | 18.466,50    |
| Diesel renovável [kg/h]             | 27.066,40    | 27.066,40    |
| Nafta renovável [kg/h]              | 683,58       | 297,70       |
| GLP renovável [kg/h]                | 2.229,93     | 10,00        |

A modelagem econômica foi realizada utilizando o Software CapCost V02, de acordo com a metodologia de Análise, Síntese e Projeto de Processos Químicos de Turton [10]. Com ajuda de simulação de processo, um dimensionamento básico de equipamentos gerou os dados necessários para o cálculo do Custo Total de Investimento (TIC).

A estimativa foi regida pela prática recomendada da AACE N°18R-2011 [11], sob uma Classe 5, significando que se classifica como um estudo de viabilidade em que o custo total do investimento pode variar de -20% a +30%, correspondendo assim a uma fase de projeto conceitual. O Custo de Produção (CCOP) e a Análise de Fluxo de Caixa Descontado (DCFA) foram utilizados para determinar indicadores econômicos como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de Retorno Descontado (DPP). A Tabela 2 apresenta os custos considerados e os preços de venda de matérias-primas e produtos.

## 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Tabela 2: Preços de referência utilizados no estudo de viabilidade econômica.

| Produtos/MP                | Preço    | Referência                                            |
|----------------------------|----------|-------------------------------------------------------|
| Óleo de soja [USD/ton]     | 970,14   | Média US CBOT de 12/2023 a 08/2024.                   |
|                            | 1.796,15 | Média US Energy Gov base California 1º sem/2023 [12]. |
| Diesel renovável [USD/ton] | 1.933,91 | Média ARGUS base global de 05/2023 [13].              |
|                            | 1.865,00 | Média geral acima.                                    |
| Nafta renovável [USD/ton]  | 1.960,00 | Média ARGUS base global de 05/2023 [13].              |
| GLP Renovável [USD/ton]    | 1.927,00 | Média US Energy Gov base US fóssil GLP 06/2023 [12].  |
| Gás natural [USD/ton]      | 153,93   | Média de TradingEconomics.com base US 2º sem/2023.    |
| Eletricidade [USD/MWh]     | 85,00    | Média de STATISTA.com base US 2023 [14 - 15].         |
| DMDS [USD/kg]              | 4,74     | Base mercado china.                                   |

O projeto foi considerado *greenfield*, incluindo a compra de todo o ISBL, qualquer equipamento externo, aquisição de terrenos e trabalhos de preparação. A vida operacional da planta foi de 20 anos. O período estimado de construção foi de 2 anos, começando como 60% do desembolso no final do primeiro ano e os 40% restantes, no final do segundo ano. Baseado no mercado estadunidense, considerou-se valores médios para a taxa de imposto de renda (ITR) [16] e a taxa de juros (IR) [17] de 26% e 6% respectivamente.

Adicionalmente, foi realizada uma avaliação de risco utilizando a simulação de Monte-Carlo para analisar possíveis variações nos indicadores econômicos obtidos e investigar os riscos relacionados a essas possíveis flutuações financeiras. Em uma análise de Monte-Carlo, a primeira etapa consiste em identificar todos os parâmetros para os quais as incertezas requerem quantificação. Nesta pesquisa, foi selecionado o Custo Total de Investimento (TIC); os Preços de Venda dos Produtos; e Custos de Matéria-Prima. Para estes, de acordo com a recomendação [18], foi aplicado um limite inferior incerto ao limite superior de -20% a +20%. Já os outros parâmetros, como o Capital de Giro (WC); a Alíquota do Imposto de Renda (ITR); e a variação do Valor Residual (VS) foram fixados. Cerca de 1000 simulações foram realizadas para os indicadores VPL, TIR e DPP.

## Resultados e Discussão

A Tabela 3 mostra a estimativa de investimento em equipamentos e custos operacionais para os cenários de análise.

Tabela 3: Estimativa de investimento em equipamentos e custos operacionais.

| Item                                 | Cenário SC-A | Cenário SC-B | Comparação |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------|
| Investimento em equipamentos [US\$]  | 85.040.000   | 92.190.000   | +7.8%      |
| Investimento total [US\$]            | 100.640.000  | 110.370.00   | +8.8%      |
| Custo com utilidades [US\$/ano]      | 1.745.912    | 9.964.137    | +85.5      |
| Custo com matérias-primas [US\$/ano] | 315.594.495  | 311.167.537  | -1.4%      |
| Receitas [US\$/ano]                  | 472.687.611  | 430.556.771  | -9.8%      |
| Capital de giro [US\$/ano]           | 40.200.000   | 40.500.000   | +0.7%      |
| Custo com mão-de-obra [US\$/ano]     | 1.271.290    | 1.271.290    | ~0.00%     |
| Valor residual [US\$]                | 8.504.000    | 9.219.000    | +7.8%      |

Pode-se notar que o custo total dos equipamentos para o caso SC-B é ligeiramente superior ao caso SC-A. Isto é atribuído ao reformador E-SMR que requer equipamentos de suporte como

transformadores e sistemas elétricos. Já o reformador tradicional possui um sistema de aquecimento mais simples, composto principalmente por queimadores, pré-aquecedor de ar e sopradores de ar. Como pode ser observado, os resultados para o custo das utilidades são muito superiores aos do cenário tradicional, como consequência da aplicação de aquecimento elétrico.

A Tabela 4 apresenta, para cada matéria-prima/produto, as despesas brutas e receitas líquidas respectivamente. Como pode ser observado, o consumo de óleo de soja representa a maior parte dos custos das matérias-primas, enquanto o diesel renovável representa a maior parte da receita líquida. No SC-A, a venda dos subprodutos também proporciona alguma rentabilidade não disponível no cenário SC-B, onde todas as correntes leves são consumidas para produzir hidrogênio.

Tabela 4: Receitas líquidas e despesas.

| <b>Matérias-primas / Produto</b>        | <b>Cenário SC-A</b> | <b>Cenário SC-B</b> |
|-----------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Óleo de soja [US\$/ano]                 | 309.624.000         |                     |
| Gás natural [US\$/ano]                  | 1.194.480           |                     |
| Dimetil disulfeto [US\$/ano]            | 4.474.260           | 0,000               |
| Água desmineralizada [US\$/ano]         | 301.705             | 349.057             |
| Energia elétrica [US\$/ano]             | 2.240.993           | 14.920.343          |
| Excedente de vapor produzido [US\$/ano] | 1.346.365           | 1.489.139           |
| Diesel renovável [US\$/ano]             | 424.015.956         |                     |
| Nafta renovável [US\$/ano]              | 11.244.912          | 4.889.808           |
| GLP renovável [US\$/ano]                | 36.080.377          | 161.868             |

Por fim, os indicadores econômicos do projeto estão listados na Tabela 5, que inclui o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Período de Retorno Descontado (DPP). Os dados indicam que a configuração SC-A é mais lucrativa, apresentando uma TIR superior a 30%. O SC-B, por outro lado, pode não ser rentável, devido a um DPP superior a 8 anos e a uma TIR baixa, menor do que a taxa mínima atrativa — por volta de 12%. Portanto, uma SMR eletrificado em conjunto com uma unidade de hidrodessoxigenação só faz sentido para regiões onde há eletricidade barata — preferencialmente de fontes renováveis — ou onde não exista disponibilidade de gás natural. O Fluxo de Caixa Descontado Acumulado é apresentado na Figura 2.

Tabela 5: Indicadores de rentabilidade.

| <b>Economic Indicator</b>            | <b>Cenário SC-A</b> | <b>Cenário SC-B</b> |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Valor Presente Líquido (VPL) [MMUSD] | 388,77              | 23,08               |
| Taxa Interna de Retorno (TIR) [%]    | 33,28%              | 7,89%               |
| Período de Retorno Descontado (DPP)  | 2,0                 | 10,2                |

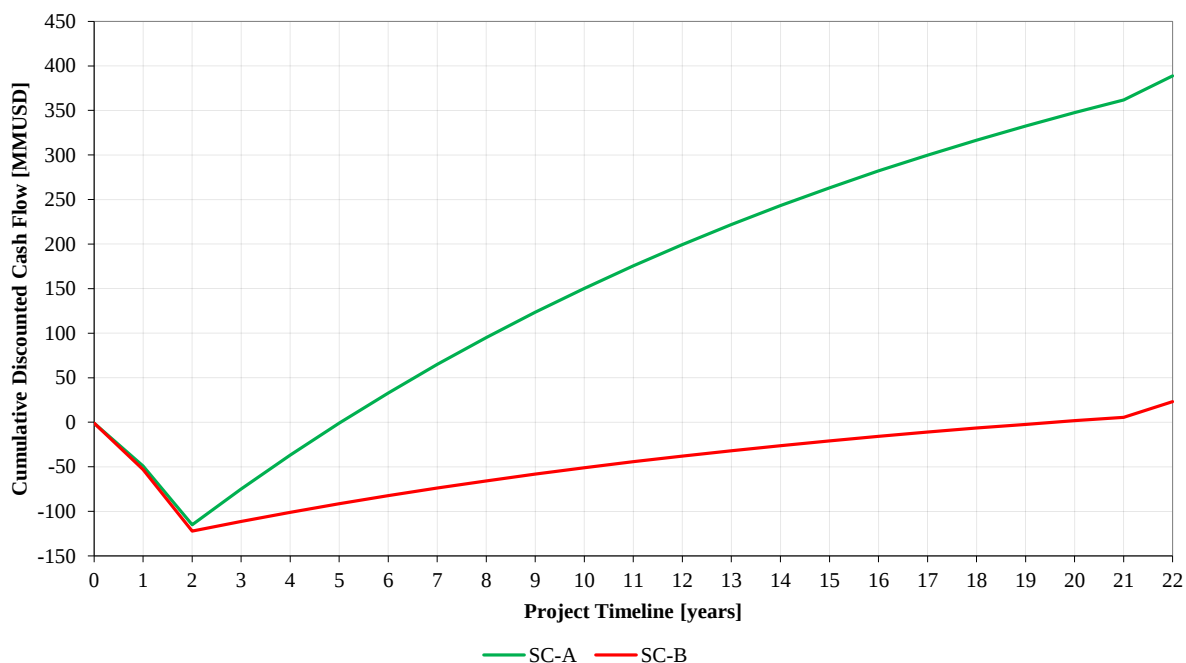


Figura 2: Fluxo de caixa acumulado.

## Conclusões

Este trabalho investigou a hidrodessoxigenação de triglicerídeos e ácidos graxos (HEFA) para produção de combustíveis renováveis, destacando alternativas para fornecimento de hidrogênio. Projetou-se uma biorrefinaria de médio porte para processar 6220 barris/dia de óleo de soja, obtendo rendimentos de 71,23%-m/m para diesel renovável, 1,80%-m/m para nafta e 5,87%-m/m para GLP. A reforma a vapor do metano eletrificada (E-SMR) foi tecnicamente viável, usando eletricidade para aquecer o reformador e subprodutos da hidrodessoxigenação como matéria-prima, permitindo instalação em áreas sem gás natural. O H<sub>2</sub> cinza, produzido a partir do gás natural, mostrou-se mais lucrativo pela simplicidade, enquanto cenários com hidrogênio renovável foram menos rentáveis devido ao alto consumo de energia elétrica. A análise econômica indicou viabilidade para ambos os sistemas, mas com maior risco para o segundo cenário.

## Referências Bibliográficas

- [1] L. Jeffry, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, M. Mofijur, M. Mubashir, and P. L. Show, "Greenhouse gases utilization: A review," *Fuel*, vol. 301, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121017.
- [2] IEA, "Statistics report Key World Energy Statistics 2021," 2021.
- [3] H. M. Saleh and A. I. Hassan, "Green Conversion of Carbon Dioxide and Sustainable Fuel Synthesis," *Fire*, vol. 6, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/fire6030128.
- [4] S. R. Hughes and N. Qureshi, "Biomass for Biorefining: Resources, Allocation, Utilization, and Policies. Resources, Allocation, Utilization, and Policies.," in *Biorefineries: Integrated Biochemical Processes for Liquid Biofuels*, Elsevier Inc., 2014, pp. 37–58. doi: 10.1016/B978-0-444-59498-3.00002-6.
- [5] R. Estevez *et al.*, "Biodiesel Is Dead: Long Life to Advanced Biofuels—A Comprehensive Critical Review," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/en15093173.

- [6] A. Masudi, O. Muraza, N. W. C. Jusoh, and U. Ubaidillah, "Improvements in the stability of biodiesel fuels: recent progress and challenges," Feb. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11356-022-25048-4.
- [7] G. C. Umenweke, R. B. Pace, E. Santillan-Jimenez, and J. A. Okolie, "TECHNO-ECONOMIC AND LIFE-CYCLE ANALYSES OF SUSTAINABLE AVIATION FUEL PRODUCTION VIA INTEGRATED CATALYTIC DEOXYGENATION AND HYDROTHERMAL GASIFICATION," *Chemical Engineering Journal*, vol. 452, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2022.139215.
- [8] S. L. Douvartzides, N. D. Charisiou, K. N. Papageridis, and M. A. Goula, "Green diesel: Biomass feedstocks, production technologies, catalytic research, fuel properties and performance in compression ignition internal combustion engines," Feb. 28, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en12050809.
- [9] T. Lepage, M. Kammoun, Q. Schmetz, and A. Richel, "Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment," *Biomass Bioenergy*, vol. 144, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105920.
- [10] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, and D. Bhattacharyya, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. 2018.
- [11] AACE International, "COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES," 2011.
- [12] US Department of Energy, "CLEAN CITIES ALTERNATIVE FUEL PRICE REPORT," 2023.
- [13] Argus, "DAILY INTERNATIONAL MARKET PRICES AND COMMENTARY," London, May 2023. [Online]. Available: <https://www.argusmedia.com/en/methodology/>
- [14] Statista, "ELECTRICITY PRICE FOR THE INDUSTRIAL SECTOR IN THE UNITED STATES 2023." Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1395805/monthly-electricity-price-industrial-sector-united-states/#:~:text=This%20figure%20amounted%20to%207.91,per%20kilowatt%2Dhour%20in%202022.>
- [15] Statista, "ELECTRICITY PRICE FOR THE INDUSTRIAL SECTOR IN THE UNITED STATES 2022." Accessed: Jan. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/190680/us-industrial-consumer-price-estimates-for-retail-electricity-since-1970/>
- [16] OECD, "Corporate Tax Statistics 2023," OECD, Nov. 2023. doi: 10.1787/flf07219-en.
- [17] Trading Economics, "United States Interest Rate." Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/united-states/interest-rate>
- [18] M. E. Tabat *et al.*, "PROCESS DESIGN, EXERGY, AND ECONOMIC ASSESSMENT OF A CONCEPTUAL MOBILE AUTOTHERMAL METHANE PYROLYSIS UNIT FOR ONSITE HYDROGEN PRODUCTION," *Energy Convers Manag*, vol. 278, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116707.

