

Análise de ciclo de vida da produção de SAF a partir da hidrogenação de CO₂ a álcoois

Simone C. Miyoshi¹, Guilherme Salvador¹, Iago S. Mesquita¹, Fabio S. Toniolo¹, Argimiro R. Secchi¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

* E-mail para correspondência: smiyoshi@peq.coppe.ufrj.br

Resumo/Abstract

RESUMO - Diante das mudanças climáticas globais e da necessidade urgente de reduzir a dependência de fontes não renováveis, a rota "Power to Jet" surge como uma tecnologia promissora para a produção de combustível sustentável de aviação (SAF). Apesar de seu potencial, a rota "Power to Jet" obtendo-se álcoois como intermediários ainda é pouco explorada na literatura científica. Este estudo tem por objetivo explorar essa rota e quantificar seus impactos ambientais pela avaliação do ciclo de vida (ACV). A avaliação foi conduzida conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044 e os impactos ambientais foram quantificados através da metodologia CML-IA Baseline. O escopo do estudo abrange desde a captura de CO₂ até o uso final. Os dados de entrada, produtos, emissões e recursos naturais foram obtidos por meio de simulações de processo. Foi considerado o uso de hidrogênio verde, produzido via eletrólise alimentada por energia eólica da região Nordeste do Brasil. Os produtos gerados incluem metanol, SAF e gasolina. Os resultados indicam que o SAF produzido por essa rota emite 3,3 g de CO₂ equivalente por MJ (excluindo a captura de CO₂), em comparação com 89,0 g de CO₂ equivalente por MJ do combustível Jet A convencional. Isso representa uma redução potencial de aproximadamente 96,3% nas emissões de CO₂, indicando o potencial desta rota.

Palavras-chave: Hidrogenação do CO₂, Análise de Ciclo de Vida, Hidrogênio Verde e SAF.

ABSTRACT – In the climate change scenario and the urgent need to reduce the use of non-renewable sources, the Power to Jet" route emerges as a technology to produce sustainable aviation fuel, SAF. However, the Power to Jet route producing alcohol as intermediates has been explored little by literature. This work aims to explore this route and to quantify the impacts of sustainable aviation fuel production by a life cycle assessment. The life cycle assessment was conducted following ISO 14040 and ISO 14044 and was assessed by CML-IA Baseline. The scope of this study from CO₂ capture to grave. The inventory of inputs, outputs, emissions, and natural resources used was based on process simulation. The hydrogen used in the process was green hydrogen produced from electrolysis and from wind energy produced in northeast Brazil. The process yields methanol, SAF and gasoline. As results, it was found that the impact of SAF excluding CO₂ capture is 3.3 g CO₂ equivalent per MJ while the conventional Jet A is 89.0 g CO₂ equivalent per MJ, that reflects a potential economy of 96.3% of CO₂ emissions in SAF utilization, that clearly indicates the potential of this route.

Keywords: CO₂ Hydrogenation, Life Cycle Assessment, Green Hydrogen and SAF.

Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a urgência em mitigar o uso de fontes fósseis impulsionam o desenvolvimento de rotas tecnológicas para produção de combustíveis renováveis como o combustível sustentável de aviação (SAF). Dentre as alternativas disponíveis para produção de SAF, destaca-se a rota "Power to Jet", que pode promover a síntese de hidrocarbonetos por meio da hidrogenação do dióxido de carbono a álcoois utilizando-se hidrogênio verde.

A análise de ciclo de vida de um processo permite a avaliação dos impactos ambientais potenciais dentro de um escopo definido, permitindo-se comparar os impactos ambientais de produtos e subprodutos obtidos por diferentes processos.

Na literatura não foi encontrada a análise de ciclo de vida da produção de SAF pela rota "Power to Jet", por meio da produção intermediária de álcoois. Desta forma, este

trabalho tem como objetivo quantificar os impactos ambientais desta rota através da análise de ciclo de vida.

Metodologia

A avaliação do impacto do ciclo de vida foi elaborada de acordo com as diretrizes da ISO 14040 e ISO 14044. A quantificação do inventário foi obtida através de simulação de processos considerando-se uma planta simulada de 100kt por ano de SAF.

A simulação foi realizada no simulador Aspen Plus®. As condições de reação, rendimentos e seletividade foram obtidos de: [1], [2], [3] e [4]. O consumo de utilidades da planta foi minimizado a partir de integração energética. As gerações de utilidades, vapor e água de resfriamento também foram simuladas no Aspen Plus®. Foi utilizado o hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água pelo uso de energia eólica da região nordeste.

O escopo da análise de ciclo de vida é definido após a captura do dióxido de carbono até o uso dos produtos (combustão). O impacto da captura do dióxido de carbono não foi considerado.

Para estimativa da emissão relativa à combustão dos produtos e do gás natural foram utilizados os fatores de emissão disponíveis em CA-Greet4.0 [5]. O inventário das entradas com exceção do hidrogênio verde foi obtido a partir da base de dados EcoInvent 28, cutoff. Já o inventário da produção do hidrogênio verde foi adaptado de [6]. A metodologia de avaliação de impactos utilizada foi a CML-IA Baseline [7], sendo utilizado o software OpenLCA.

Resultados e Discussão

A análise de ciclo de vida da produção do hidrogênio verde estima o impacto em 527 g de CO₂ eq. por quilo de hidrogênio verde produzido a partir da eletrólise da água utilizando-se a energia eólica da região nordeste. Deste impacto, estima-se que 93% correspondam à produção de energia eólica. Utilizando-se o mesmo inventário, estima-se o impacto de 1143 g de CO₂ equivalente por quilo de hidrogênio verde produzido por eletrólise e energia eólica na China-HB. Essa diferença pode ser atribuída às condições de vento mais favoráveis à produção de energia eólica no Nordeste, Brasil.

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise de ciclo de vida da produção de SAF, para a rota “Power to Jet” através da metodologia CML-IA Baseline [7]. Pela Tabela 1 verifica-se que a pegada de carbono do SAF, através da hidrogenação do CO₂, excluindo-se a captura de carbono é de 3,3 g CO₂ eq. por MJ. Comparando-se ao Jet convencional, que emite 89 g de CO₂ eq. por MJ, o SAF possui um potencial de redução de 96,3% da pegada de carbono do SAF.

Categoria de impacto	Quantidade	Unidade de Referência
Depleção Abiótica	3,2 · 10 ⁻⁴	g Sb eq.
Depleção Abiótica (combustíveis fósseis)	2,03 · 10 ²	kJ
Acidificação	1,45 · 10 ⁻¹	g SO ₂ eq.
Eutrofização	4,38 · 10 ⁻²	g PO ₄ --- eq.
Ecotoxicidade em água doce	2,67 · 10 ¹	g 1,4-DB eq.
Aquecimento Global (GWP100a)	3,30	g CO ₂ eq.
Toxicidade humana	2,33 · 10 ¹	g 1,4-DB eq.
Ecotoxicidade Marinha	2,23 · 10 ⁻⁴	g 1,4-DB eq.
Depleção da camada de ozônio (ODP)	6,39 · 10 ⁻⁷	g CFC-11 eq.
Oxidação Fotoquímica	3,06 · 10 ⁻²	g C ₂ H ₄ eq.
Ecotoxicidade terrestre	3,30 · 10 ⁻²	g 1,4-DB eq.

Tabela 1. Resultados da análise de ciclo de vida para a produção de SAF a partir do CO₂. Unidade Funcional: 1 MJ de SAF e subprodutos.

Através da Figura 1 é possível verificar a contribuição individual de cada fator de emissão. Observa-se que a

produção de hidrogênio verde possui a principal contribuição no resultado das categorias em geral.

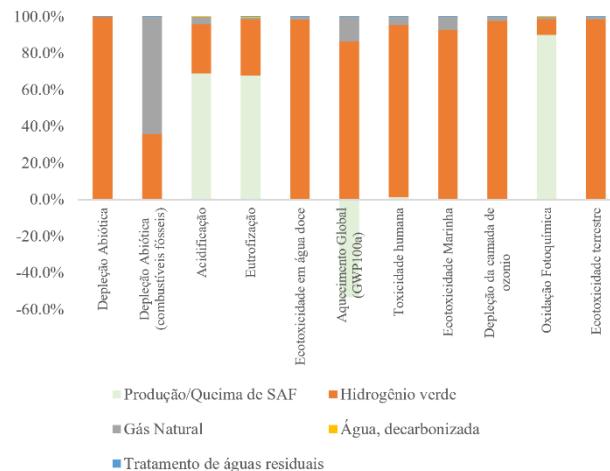


Figura 1. Contribuição de cada entrada na análise de ciclo de vida da produção de SAF.

Conclusões

O impacto estimado pela análise de ciclo de vida desta rota é de 3,3 g de CO₂ equivalente por MJ não considerando-se o impacto da captura do CO₂. Isso representa 96,3% de potencial de redução de emissões de carbono do SAF em relação ao JET. Desta forma, a produção de SAF possui um potencial de redução significativa da pegada de carbono da aviação.

Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à Petrogal Brasil (*Joint Venture Galp | Sinopec*) e à EMBRAPPII-COPPE pelo financiamento e apoio técnico neste projeto, e à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pela promoção da pesquisa, do desenvolvimento e da inovação no Brasil.

Referências

1. S. Li et al., *Catal Letters*, **2012**, 143, 345–355.
2. D. Masih; S. Rohani; J.N. Kondo, T. Tatsumi, *Micropor. and Mesopor. Mat.*, **2019**, 282, 91-99.
3. M. Betz; C. Fuchs; T.A. Zevaco; U. Arnold; J. Sauer, *Biomass and Bioenerg.*, **2022**, 166, 106595.
4. P.R. Gruber, et al. US patent 20120259146 A1, **2012**.
5. W. Michael et al., **2025**. Disponível em: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2025/02/193611.pdf>
6. E. Cetinkaya; I. Dincer; G.F. Naterer, *Int. J. Hydrogen Energ.* **2012**, 37, 2071-2080.
7. J.B. Guinée. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to ISO standards*, Ed.; Springer, **2002**; Vol. 7.