



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JOSÉ RUTÊNIO DO AMARAL NETO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
HIDROTRATADO (HVO) COM BASE EM HIDROGÊNIO VERDE**

RECIFE

2025

JOSÉ RUTÊNIO DO AMARAL NETO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
HIDROTRATADO (HVO) COM BASE EM HIDROGÊNIO VERDE**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Recife, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes

RECIFE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Amaral Neto, José Rutênio do.

Avaliação do ciclo de vida da produção de óleo vegetal hidrotratado (HVO) com base em hidrogênio verde / José Rutênio do Amaral Neto. - Recife, 2025.
39 : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Hidrogênio Verde. 2. Eletrólise Aquosa. 3. Análise do Ciclo de Vida. 4. HVO. I. Costa Gomes, Felipe Pedro da. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

JOSÉ RUTÊNIO DO AMARAL NETO

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓLEO VEGETAL
HIDROTRATADO (HVO) COM BASE EM HIDROGÊNIO VERDE**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Recife, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 11 / 04 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profaº. Dra. Mayara Ferreira Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Santiago Arias Henao (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Aos meus pais e irmã, dos quais sem suas presenças, minha vida seria um eterno vazio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais pela paciência e esforços a sempre me guiarem pelo caminho do estudo, mesmo que me mantivesse afastado fisicamente de nosso lar.

Aos meus colegas de turma, especialmente a Tiago Regis e Vinicius Antonio, que fizeram desta jornada de aprendizado na UFPE mais prazerosa de ser cumprida.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes, pelo apoio durante minha vida acadêmica.

“Nada é permanente, exceto a mudança.”

(Heráclito)

RESUMO

A produção de hidrogênio verde por eletrólise aquosa tem se demonstrado como uma alternativa viável e sustentável para a transição energética global, sendo especialmente relevante em regiões com elevado potencial de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, como no estado de Pernambuco. O Porto de Suape se destaca por sua abundante disponibilidade de energia solar e eólica, tornando-se um local estratégico para a implementação de plantas industriais de produção de hidrogênio verde. A eletrólise aquosa tem como resultado a fragmentação da molécula de água com a liberação de hidrogênio e oxigênio em suas formas moleculares. Além da possibilidade do uso direto do hidrogênio verde como combustível, há também a produção de diversos outros compostos químicos de origem sustentável. O *Hydrogenated Vegetable Oil (HVO)*, ou óleo vegetal hidrotratado, demonstra-se como uma alternativa ao diesel comum para alimentação de motores de combustão interna, o que pode ajudar a reduzir a dependência direta de petróleo na região. Nesse contexto, esse presente trabalho tem como finalidade a Análise do Ciclo de Vida (ACV) da produção de *HVO*, considerando a produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água com o intuito de avaliar seu real impacto ambiental na região metropolitana de Recife, em comparação ao processo convencional de obtenção de hidrogênio. Também foi realizada uma comparação da geração de eletricidade de fontes energéticas consolidadas com a geração elétrica utilizando o hidrogênio produzido. A análise tem como base o uso do *software openLCA*, juntamente com o banco de dados da *Environmental Footprints*. Os resultados indicam que a produção de *HVO* a partir de hidrogênio verde reduz as emissões de gases de efeito estufa, bem como o consumo de matérias-primas. Com isso, demonstra-se a viabilidade e sustentabilidade do processo.

Palavras-chave: hidrogênio verde; eletrólise aquosa; análise de ciclo de vida; *HVO*

ABSTRACT

The production of green hydrogen through aqueous electrolysis has emerged as a viable and sustainable alternative to support the global energy transition. This approach is particularly relevant in regions with high potential for electricity generation from renewable sources, such as the state of Pernambuco. The Port of Suape stands out due to its abundant availability of solar and wind energy, positioning it as a strategic location for the establishment of industrial-scale green hydrogen production facilities. Aqueous electrolysis promotes the dissociation of water molecules, resulting in the release of hydrogen and oxygen in their molecular forms. Beyond the direct application of green hydrogen as a fuel, this process also enables the sustainable production of a variety of chemical compounds. Among them, Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) presents itself as a promising alternative to conventional diesel for fueling internal combustion engines, contributing to the reduction of petroleum dependency in the region. In this context, the present study aims to conduct a Life Cycle Assessment (LCA) of HVO production, taking into account green hydrogen generated via water electrolysis, in order to evaluate its environmental impacts within the metropolitan area of Recife. This analysis is further complemented by a comparative assessment of electricity generation from conventional energy sources versus electricity generation utilizing the hydrogen produced. The study is conducted using the openLCA software, in conjunction with the Environmental Footprints database. The incoming results from this study indicates that HVO production from green hydrogen reduces the emission of greenhouse gases and consumption of raw materials. This demonstrates the viability and sustainability of the process.

Keywords: green hydrogen; water electrolysis; life cycle analysis, HVO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Processo de Reforma de Vapor	18
Figura 2 -	Reforma Auto Térmica	19
Figura 3 -	Gaseificação do Carvão	20
Figura 4 -	Processo de Craqueamento Térmico do Metano	21
Figura 5 -	Eletrolisador aquoso alcalino	22
Figura 6 -	Eletrolisador Aquoso de Membrana Permeável à Prótons	22
Figura 7 -	Eletrolisador Aquoso de Membrana Permeável à Ânions	23
Figura 8 -	Célula Eletrolítica de Óxido Sólido	24
Figura 9 -	Fluxograma de produção de HVO	25
Figura 10 -	. Fronteira do primeiro sistema	28
Figura 11 -	Fronteira do segundo sistema com reforma de vapor	28
Figura 12 -	Fronteira do segundo sistema com eletrólise	29
Figura 13 -	Blocos de fronteira do primeiro sistema	30
Figura 14 -	Blocos de fronteira da produção de HVO por hidrogênio cinza	31
Figura 15 -	Blocos de fronteira do HVO por hidrogênio verde	31
Figura 16 -	Impactos ambientais do refino de óleo de palma	33
Figura 17 -	Emissões dos processos de produção do hidrogênio	34
Figura 18 -	Consumo de recursos fósseis dos processos de produção de H ₂	34
Figura 19 -	Consumo minerais e metais dos processos de produção de H ₂	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resultados das vias de produção de hidrogênio	43
Tabela 2 -	Resultados das vias de produção de HVO	46

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AEMWE	Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Ânions
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
AWE	Eletrolisador aquoso de Água Alcalina
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H2V	Hidrogênio Verde
HVO	Óleo Vegetal Hidrotratado
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
PEMWE	Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Prótons
SOEC	Célula Eletrolítica de Óxido Sólido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Produção Convencional de Hidrogênio	18
2.1.1	Reforma de Vapor	18
2.1.2	Reforma Auto Térmica	19
2.1.3	Gaseificação do Carvão	19
2.1.4	Craqueamento Térmico	20
2.2	Produção de Hidrogênio por Eletrólise Aquosa	21
2.2.1	Eletrolisador aquoso de Água Alcalina (<i>AWE</i>)	21
2.2.2	Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Prótons (<i>PEMWE</i>)	22
2.2.3	Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Ânions (<i>AEMWE</i>)	23
2.2.4	Célula Eletrolítica de Óxido Sólido (<i>SOEC</i>)	23
2.3	Óleo Vegetal Hidrotratado (<i>HVO</i>)	24
2.4	Avaliação do Ciclo de Vida (<i>ACV</i>)	25
2.4.1	Definição de Escopo e Objetivo	25
2.4.2	Inventário do Ciclo de Vida (<i>ICV</i>)	26
2.4.3	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (<i>AICV</i>)	26
2.4.4	Interpretação do Ciclo de Vida	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	<i>Software</i>	27
3.2	Base de Dados	27
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida (<i>ACV</i>)	27
3.3.1	Definição de Objetivo e Escopo	27
3.3.2	Inventário de Ciclo de Vida	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Produção de Hidrogênio	32
4.2	Produção de <i>HVO</i>	33

5 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Desde o advento da eletricidade, o aumento da demanda energética mundial tem sido um dos principais desafios da humanidade. No século XVIII, a demanda por eletricidade cresceu de forma significativa, acompanhando o avanço tecnológico e a urbanização em escala global, no decorrer da primeira revolução industrial (BARCA, 2011). Já no final do século XIX, as primeiras redes elétricas começaram a ser implantadas, alimentando não somente as indústrias, mas também a vida doméstica nas cidades. Esse aumento no fornecimento de energia junto ao constante avanço da tecnologia em todos os setores da sociedade, resultam em uma necessidade crescente de energia para suportar o desenvolvimento econômico. Com base nos estudos de Wolfram, Shelef e Gertler (2012), até 2035 haverá um aumento na demanda energética dos países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) em até 14% enquanto países não pertencentes ao conglomerado possuem uma previsão de aumento na demanda de 84%. Esta evolução não só reflete os progressos tecnológicos e sociais, mas também evidencia os desafios relacionados com a produção sustentável e a eficiência energética que a humanidade deve enfrentar.

No Brasil, o aumento da demanda energética ao longo dos anos tem seguido uma trajetória similar à observada globalmente. Impulsionada pela industrialização, urbanização e modernização do país, as primeiras usinas hidrelétricas no início do século XX até a recente expansão das energias renováveis demonstram o aumento da demanda de energia de forma contínua em solo nacional. Esse crescimento demonstra os desafios de integrar fontes sustentáveis na matriz energética e de garantir a eficiência na distribuição e no consumo de energia (MIRANDA; MARTINS; LOPES, 2019).

A matriz energética brasileira é caracterizada por uma diversificação significativa de fontes, com destaque para a predominância das energias renováveis. Principalmente composta por energia hidráulica, que representa uma parcela substancial da geração de eletricidade no país, a matriz também inclui importantes contribuições de energia eólica, biomassa e solar (SANTOS; RODRIGUES; CARNIELLO, 2021). Nos últimos anos, o Brasil tem investido substancialmente na

expansão de suas fontes renováveis, buscando reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a sustentabilidade ambiental. De acordo com dados do Governo Federal (2022), o Brasil destaca-se nos países em desenvolvimento com mais de 50% da matriz energética sustentável. Este esforço é crucial para atender à crescente demanda energética do país, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e social, ao mesmo tempo que enfrenta os desafios de garantir a eficiência e a estabilidade do fornecimento de energia.

Destaca-se, também, o aumento da demanda de combustíveis em níveis nacionais e regionais no país. De acordo com o jornal Diário de Pernambuco (2024), durante um período de dez anos, ocorreu um aumento de 26% na frota de carros, 56% na frota de motocicletas e 1,2% na frota de ônibus na Região Metropolitana de Recife (RMR). Em nível nacional, o Brasil demonstra-se como dependente do transporte rodoviário de cargas.

Na busca por alternativas aos combustíveis fósseis, diversos esforços globais são realizados com o intuito de obter-se uma solução. Como exemplo, um relevante investimento para instalação de uma planta de eletrólise aquosa no Porto de Suape. De acordo com informações reportadas pelo Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros (2024), a capacidade instalada de produção inicial será de 76 mil toneladas de hidrogênio verde (H₂V), produzido por eletrólise da água.

A eletrólise aquosa surge como um processo sustentável para fornecimento de hidrogênio verde. Durante este processo, a corrente elétrica faz com que as moléculas de água se dividam nos seus átomos constituintes. Essa via produtiva pode ser conduzida em diferentes condições de pH, utilizando eletrólitos ácidos, neutros ou alcalinos, e materiais catalíticos específicos podem ser empregados para aumentar a eficiência do processo (GRIGORIEV *et al.*, 2020). Este método é considerado uma peça fundamental na transição para uma economia baseada em energias renováveis, pois permite a armazenagem de energia excedente de fontes como a solar e eólica na forma de hidrogênio (RASHID *et al.*, 2015).

Além do uso como fonte primária de energia, o H₂V pode ser utilizado como matéria-prima para a produção de outros combustíveis renováveis. O *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO), ou óleo vegetal hidrotratado, surge como uma alternativa viável para tentar minimizar os impactos diretos do consumo de combustíveis fósseis para

deslocamento urbano e de cargas na região. Esse combustível deriva de biomassa e é conhecido como o diesel renovável, destacando-se por possuir maiores eficiências de combustão e menores níveis de emissões comparado ao diesel tradicional obtido do petróleo (NUR-SULTAN; TOSHTAY; CAPRON, 2024).

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) se torna essencial nesses processos, afinal trata-se de uma metodologia usada para avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, uso e até a disposição final. Esta abordagem permite uma compreensão holística dos efeitos ambientais, ajudando na identificação de oportunidades para a melhoria da sustentabilidade e eficiência dos produtos e processos. Essa análise é fundamental para a tomada de decisões que visam minimizar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos (ABNT, 2009).

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para avaliar os impactos ambientais de duas rotas de produção de hidrogênio. Assim como, analisar as rotas de produção de HVO utilizando hidrogênio pela via convencional de produção e via eletrolítica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir as rotas de produção de hidrogênio pelas rotas de reforma de vapor e eletrólise aquosa assistida de usina eólica;
- Construir os sistemas de produto do processo de produção do *HVO* com base nas duas rotas de hidrogênio consideradas;
- Realizar a ACV tanto das vias de produção de hidrogênio;
- Realizar a ACV de como a fonte de hidrogênio impacta na produção do *HVO*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

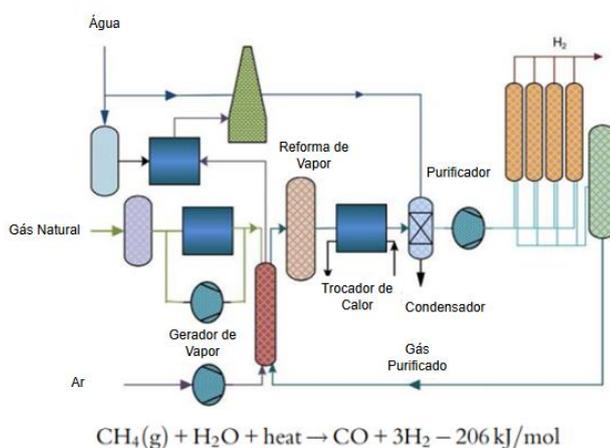
2.1 Produção Convencional de Hidrogênio

O átomo de hidrogênio é o primeiro elemento químico da tabela periódica, sendo assim, o átomo mais leve. Embora seja o elemento mais presente no universo, ele não pode ser obtido diretamente da atmosfera em sua forma molecular H_2 (NICOLETTI *et al.*, 2014). Dessa forma, diversos métodos de obtenção foram desenvolvidos e aplicados em escala industrial. Entretanto, de acordo com o relatório da *International Energy Agency* (IEA), Agência Internacional de Energia (2024), praticamente 80% do hidrogênio produzido atualmente deriva de combustíveis fósseis. Sendo esse hidrogênio conhecido como hidrogênio cinza.

2.1.1 Reforma de Vapor

O processo de reforma de vapor tem como base o tratamento de gases com alto teor de carbono juntamente com vapor de água em altas temperaturas, na presença de catalisadores (LEVALLEY; RICHARD; FAN, 2014). Uma diversidade de compostos orgânicos é utilizada como matéria prima no processo de reforma de vapor, porém as mais comumente utilizadas são: gás natural, gases liquefeitos de petróleo (GLP), metanol, gasolina e etanol. Aliás, a reforma de vapor é o meio mais utilizado para produção de hidrogênio atualmente (IEA, 2024). Na Figura 1, o fluxograma pode ser visualizado.

Figura 1. Processo de Reforma de Vapor.

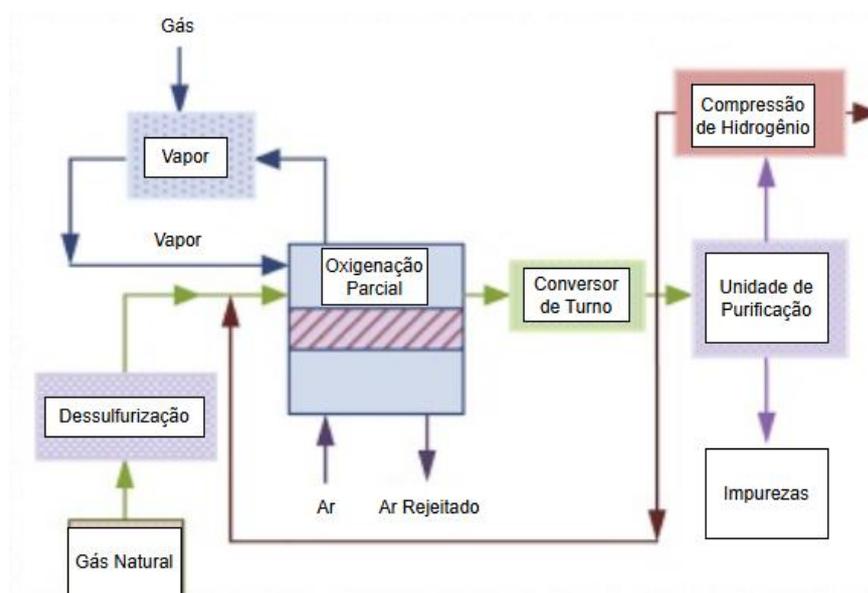


Fonte: Adaptado Kayfeci, Keçebas e Bayat, 2019.

2.1.2 Reforma Auto Térmica

A reforma auto térmica é um processo termoquímico complexo que combina a oxidação parcial e o processo de reforma de vapor, na presença de um agente catalisador das correntes gasosas em um mesmo termo reator. O processo de oxidação parcial ocorre em altas temperaturas com uma quantidade reduzida de oxigênio. Por se tratar de um processo de combustão, há a liberação de energia dentro do reator que favorece o processo de reforma de vapor (endotérmica) que ocorre concomitantemente no mesmo espaço (NEZHAD *et al.*, 2009). Uma visão geral desse processo está descrita na Figura 2.

Figura 2. Reforma Auto Térmica.

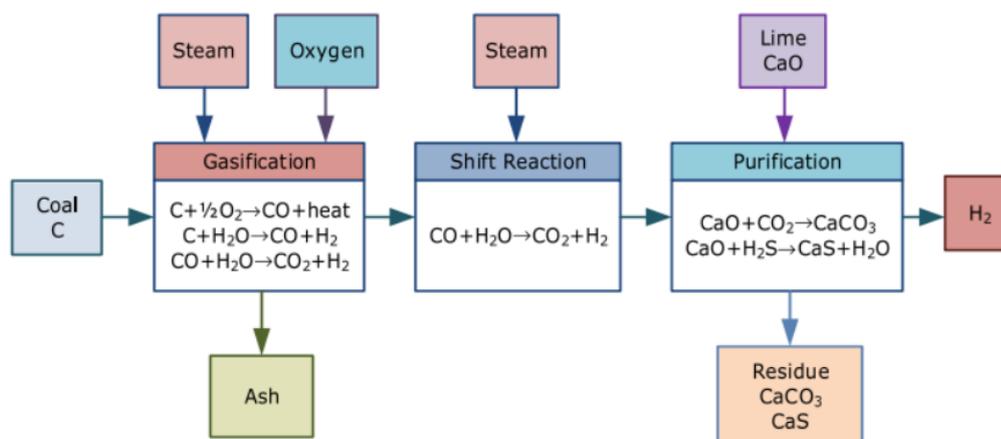


Fonte: Adaptado Kayfeci, Keçebas e Bayat, 2019.

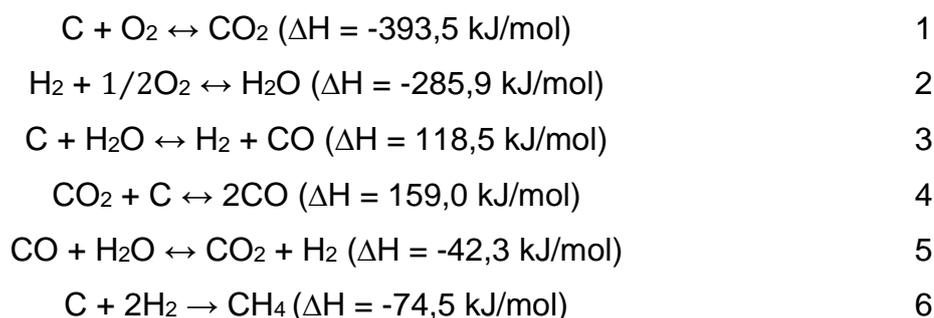
2.1.3 Gaseificação do Carvão

A gaseificação do carvão foi o primeiro processo industrial estabelecido para produção de hidrogênio em sua forma molecular. Esse processo consiste em uma cadeia de reações do carvão em sua forma sólida com uma corrente de ar, com oxigênio controlado, em temperaturas superiores a 900°C (KAYFECI; KEÇEBAS; BAYAT, 2019). Na Figura 3, é possível visualizar o processo geral em cada etapa, e, nas Equações 1 a 6 estão descritas cada reação que ocorre na gaseificação.

Figura 3. Gaseificação do Carvão.



Fonte: Adaptado Kayfeci, Keçebas e Bayat, 2019.

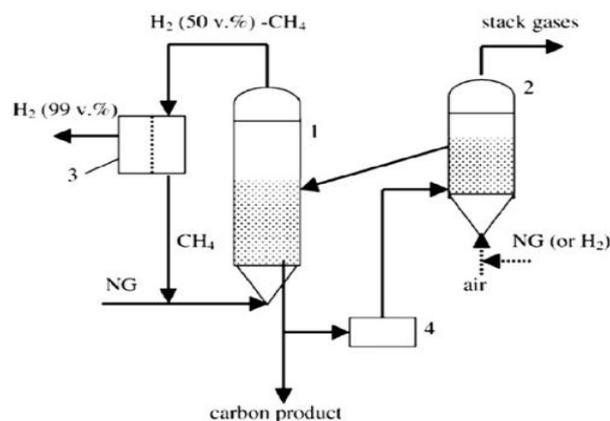


2.1.4 Craqueamento Térmico

O craqueamento térmico é uma técnica de processamento em que o material orgânico com alto teor de hidrocarbonetos é aquecido na presença de um catalisador e na ausência de oxigênio (MASOUMI *et al.*, 2006). Um exemplo da reação do craqueamento térmico do metano, o qual é comumente oriundo do gás natural, pode ser visto na Equação 7, bem como a visão geral do processo na Figura 4.



Figura 4. Processo de Craqueamento Térmico do Metano.



Fonte: Amin; Croiset; Epling, 2011.

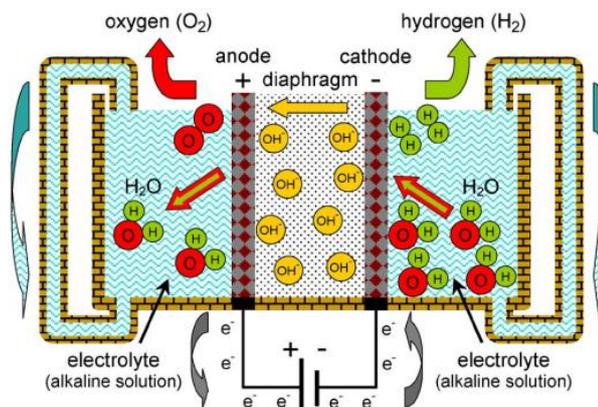
2.2 Produção de Hidrogênio por Eletrólise Aquosa

O processo eletrolítico, de forma geral, trata-se da aplicação de corrente elétrica em um sistema químico com o intuito de gerar algum componente químico específico. No caso da eletrólise aquosa, a corrente elétrica é aplicada ao sistema com o intuito de fragmentar a molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Entretanto, existem alguns tipos de tecnologia em eletrolisadores aplicados industrialmente para essa finalidade (CHATENET *et al.*, 2022).

2.2.1 Eletrolisador aquoso de Água Alcalina (AWE)

A eletrólise aquosa de água alcalina é conhecida por sua confiabilidade e segurança no processo. Como pode ser visto na Figura 5, esse método de obtenção de hidrogênio verde depende da aplicação de hidróxido de potássio (KOH) em concentrações acima de 30% na água para que os níveis de eficiência sejam viáveis. Uma membrana seletiva a gás é aplicada entre ambos os lados do eletrolisador, permitindo apenas a passagem do grupamento hidroxila para o ânodo (URSUA *et al.*, 2012).

Figura 5. Eletrolisador aquoso alcalino.

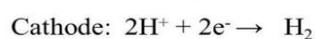
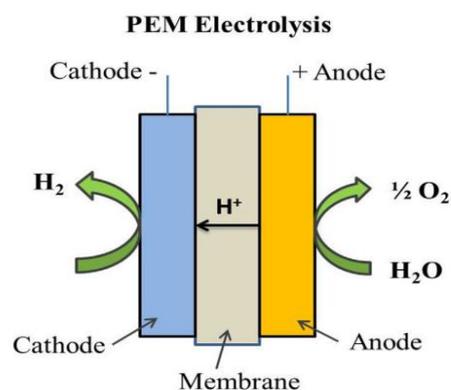


Fonte: Ursua *et al.*, 2012.

2.2.2 Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Prótons (*PEMWE*)

Diferentemente do eletrolisador aquoso alcalino, onde cada elemento é gerado de forma independente no ânodo e cátodo, o eletrolisador aquoso de membrana permeável à prótons opera de forma diferente. O PEMWE promove a fragmentação da água no ânodo e migração de íons de hidrogênio H^+ para o cátodo, onde então é reduzido à H_2 (CHENG *et al.*, 2007). A visualização do processo pode ser vista na Figura 6. As vantagens desse tipo de equipamento estão, principalmente, no *design* compacto, operação em baixas temperaturas e maior eficiência de operação em relação ao processo de eletrólise alcalina (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

Figura 6. Eletrolisador Aquoso de Membrana Permeável à Prótons.

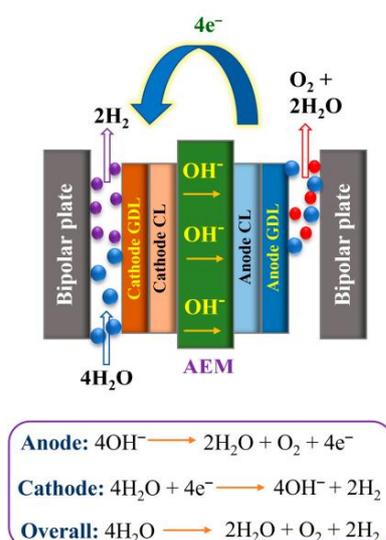


Fonte: Kumar; Himabindu, 2019.

2.2.3 Eletrolisador aquoso de Membrana Permeável à Ânions (AEMWE)

O eletrolisador aquoso de membrana permeável à ânions (AEMWE) opera de forma similar ao eletrolisador aquoso de membrana permeável à cátions (PEMWE). Como é possível visualizar na Figura 7, o princípio que transferência de cargas entre uma membrana ainda está presente. Entretanto, o gás hidrogênio é produzido no cátodo e os ânions (íons hidroxila) migram pela membrana ao ânodo, onde são oxidados. Entretanto, esse tipo de equipamento ainda está em desenvolvimento e não é utilizado comercialmente (VINODH *et al.*, 2023).

Figura 7. Eletrolisador Aquoso de Membrana Permeável à Ânions.

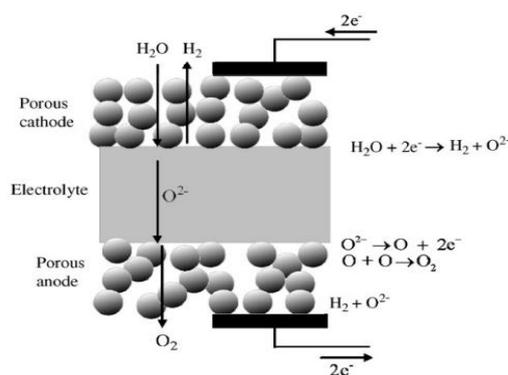


Fonte: Vinodh *et al.*, 2023.

2.2.4 Célula Eletrolítica de Óxido Sólido (SOEC)

Na produção de hidrogênio verde com o uso de células eletrolíticas de óxido sólido, obtêm-se valores maiores de eficiência comparadas às demais formas de eletrolisar a água. Como pode ser visto na Figura 8, existe uma barreira que divide a água no cátodo de ânodo formada por materiais sólidos. Nesse tipo de processo, é utilizado óxido sólido poroso que permite a passagem de íons de oxigênio do cátodo para o ânodo. Embora sejam mais eficientes energeticamente, os equipamentos requerem temperaturas elevadíssimas de operação, bem como menores tempos de vida útil (NI; LEUNG; LEUNG, 2018).

Figura 8. Célula Eletrolítica de Óxido Sólido.



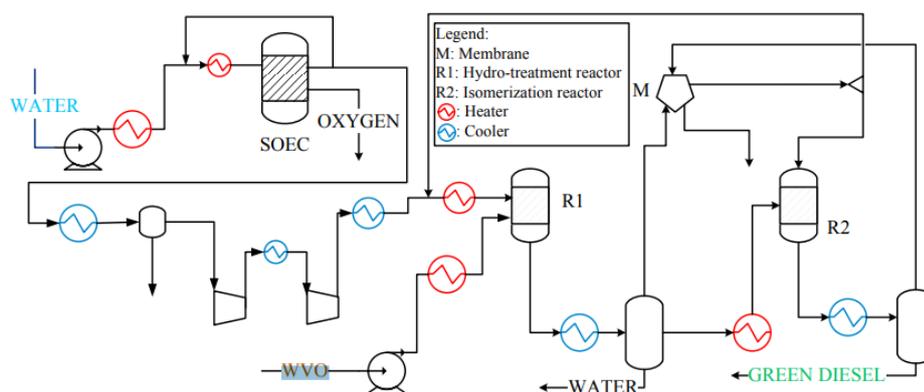
Fonte: Vinodh *et al.*, 2023.

2.3 Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO)

Óleo Vegetal Hidrotratado (HVO) é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais por meio de um processo de hidrotratação. Este combustível é considerado uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis tradicionais, pois sua produção utiliza matérias primas renováveis e tem o potencial de reduzir significativamente as emissões de motores de combustão interna à diesel, quando utilizado em sua composição (BORTEL; VÁVRA; TAKÁTS, 2019).

Existem basicamente duas rotas para produção de HVO. Na primeira rota, o óleo vegetal é primeiramente purificado e filtrado, para posteriormente reagir com o hidrogênio, em condições específicas para cada óleo. Sendo esse, o processo de hidrotratamento. Já segunda rota é a feita pelo craqueamento. No craqueamento, o óleo é fragmentado em um tratamento térmico, ou seja, um processo físico-químico, na presença de um catalisador. Com a quebra das moléculas da matéria-prima, é feita a produção do óleo vegetal hidrotratado (SANTOS *et al.*, 2023). Na Figura 9, é exposta uma planta de produção de HVO acoplada diretamente com um processo de produção de hidrogênio verde por eletrólise aquosa, onde o óleo é oriundo de restos de óleo vegetal da indústria alimentícia.

Figura 9. Fluxograma de produção de HVO.



Fonte: Lorenzi *et al.*, 2019.

2.4 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma metodologia capaz de coletar e avaliar informações acerca de materiais e energia dentro de uma cadeia de produção de algum produto ou serviço. Essa ferramenta permite entender quais os impactos e benefícios ambientais associados, tornando possível comparar situações diferentes de uso ou produção de algum produto. Não somente isso, mas também é possível identificar possíveis conflitos entre interesses econômicos e necessidades ambientais (THEIS; TOMKIN, 2015).

No Brasil, a regulação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi realizada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) nas ABNT NBR 14040: (2009a), na qual estabeleceu-se a estruturação da ACV e ABNT NBR 14044: (2009b), onde definiu-se os requisitos metodológicos (FERREIRA, 2004).

2.4.1 Definição de Escopo e Objetivo

Com base na ABNT (2001), deve-se determinar o objetivo de forma transparente, bem como as razões para condução do estudo. O escopo deve, primordialmente, abranger as unidades do processo e fronteiras do sistema. A escolha da fronteira do sistema estudado deve ser definida e justificada com os fins do estudo a ser realizado.

2.4.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Na etapa de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), a coleta de dados é feita, visando viabilizar os cálculos de entradas e saídas no sistema de produto. Esses dados devem ser coletados em bancos de dados estabelecidos para não comprometer os resultados da ACV (ALVES, 2014).

2.4.3 Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Na fase de Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV), examina-se a magnitude dos impactos ambientais causados por um sistema de produto. Trata-se de uma etapa de avaliação ambiental, na qual as informações são utilizadas para a última fase de interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009).

2.4.4 Interpretação do Ciclo de Vida

A última etapa da ACV é a interpretação do ciclo de vida. Nesse último estágio, são interpretados os dados e resultados obtidos das etapas anteriores. É importante ressaltar que nessa etapa final resultados consistentes com os objetivos e escopos definidos sejam consistentes, bem como gerar conclusões claras e esclarecer limitações identificadas no estudo (ABNT, 2009).

3 METODOLOGIA

3.1 Software

O presente trabalho foi realizado com o uso do *software* OpenLCA, versão 2.4.0, desenvolvido pela GreenDelta para estudos de sustentabilidade. Esse programa é de acesso gratuito e fácil manuseio, tornando acessível os processos da ACV.

3.2 Base de Dados

A base de dados utilizada dentro do *software* OpenLCA foi a *Environmental Footprints*, a qual possui acesso gratuito e detém todos os parâmetros necessários para a realização dos cálculos da ACV. O objetivo dessa base de dados é padronizar modelos de ciclo de vida para a União Europeia.

Entretanto, nem todos os dados utilizados tinham o Brasil como região delimitada. Os dados considerados para os cálculos da produção de óleo de palma refinado são da perspectiva europeia, os demais dados de produção local estimada de H2V e produção elétrica das diversas fontes existentes são nacionais. É importante salientar que, no Brasil, diversos outros tipos de óleos vegetais podem ser considerados para estudos de viabilidade, dada a vasta gama de frutos oleaginosos em solo brasileiro.

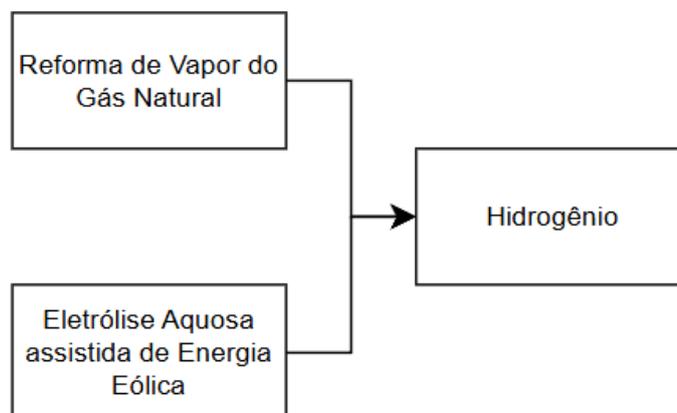
3.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

De acordo com os resultados obtidos através da ACV das rotas de produção consideradas para produção de hidrogênio, será feita a comparação do impacto ambiental causado por cada uma. Além disso, foi realizada uma comparação entre o processo de produção de HVO, considerando o óleo de palma, utilizando hidrogênio de reforma de vapor do gás natural e da eletrólise aquosa assistida de energia eólica.

3.3.1 Definição de Objetivo e Escopo

A Figura 10 demonstra a fronteira do primeiro sistema a ser estudado. Nesse caso, serão feitas as comparações de impacto ambiental gerado por ambas as rotas de produção de hidrogênio.

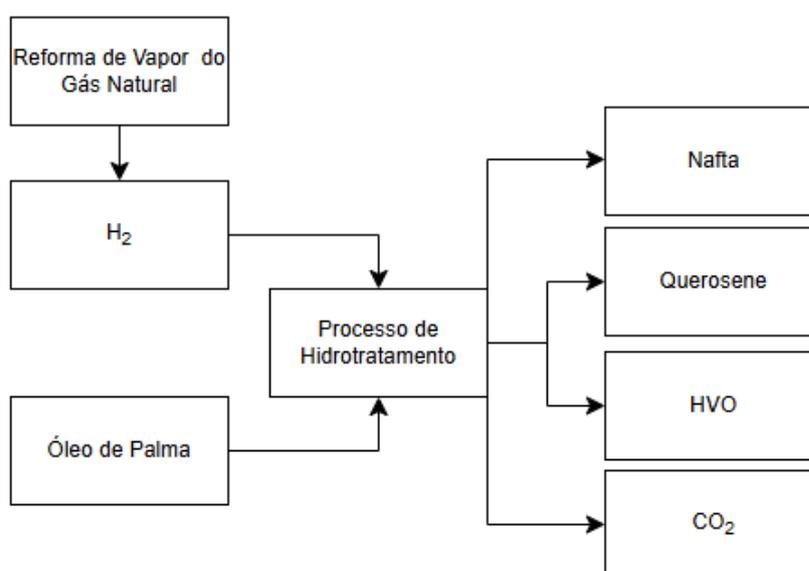
Figura 10. Fronteira do primeiro sistema.



Fonte: O autor (2025).

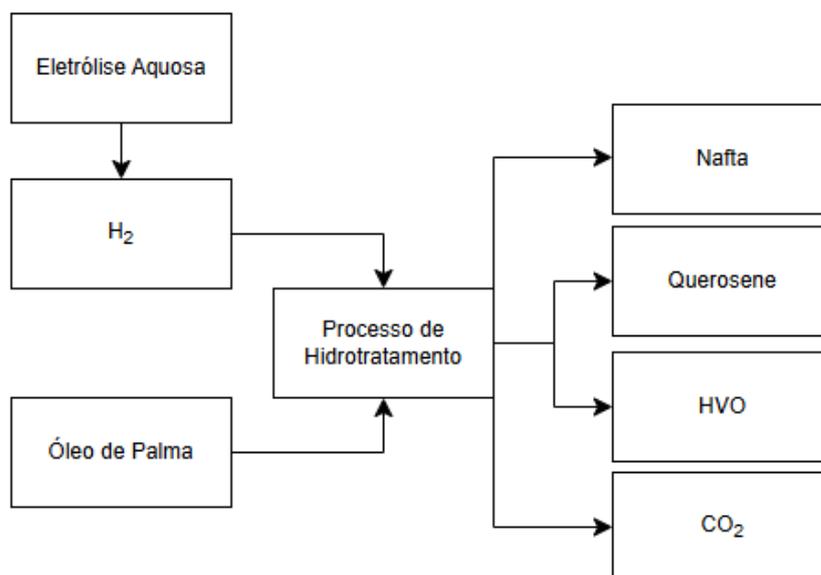
Nas Figuras 11 e 12, estão claras as fronteiras do segundo sistema a ser estudado. Nesse caso, será feita a comparação de impactos ambientais considerando duas fontes diferentes de hidrogênio para o processo de hidrotreatação do óleo de palma refinado. Dessa forma, será possível comparar os impactos ambientais do processo considerando a produção de hidrogênio pela reforma de vapor e pela eletrólise aquosa acoplada com uma fonte elétrica eólica.

Figura 11. Fronteira do segundo sistema com reforma de vapor.



Fonte: O autor (2025).

Figura 12. Fronteira do segundo sistema com eletrólise.

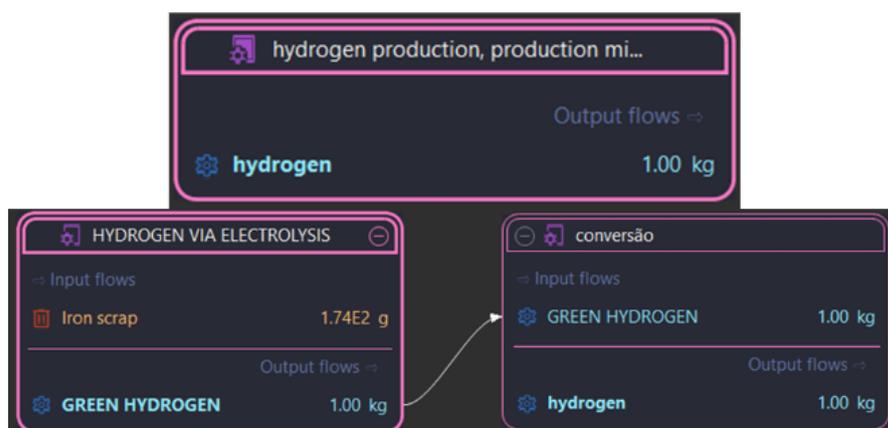


Fonte: O autor (2025).

3.3.2 Inventário de Ciclo de Vida

A simulação dentro do *software OpenLCA* foi realizada com a combinação de blocos que correspondem aos processos de produtos estudados. As fronteiras dos sistemas foram delimitadas, como pode ser visto na Figura 13, e foi necessária a criação de um bloco que não estava presente no programa: as emissões e consumo do processo de produção de hidrogênio verde a partir de eletrólise aquosa associada com energia eólica. Os dados utilizados para construção desse bloco estão nos estudos de Bhandari, Trudewind e Zapp (2013).

Figura 13. Blocos de fronteira do primeiro sistema.



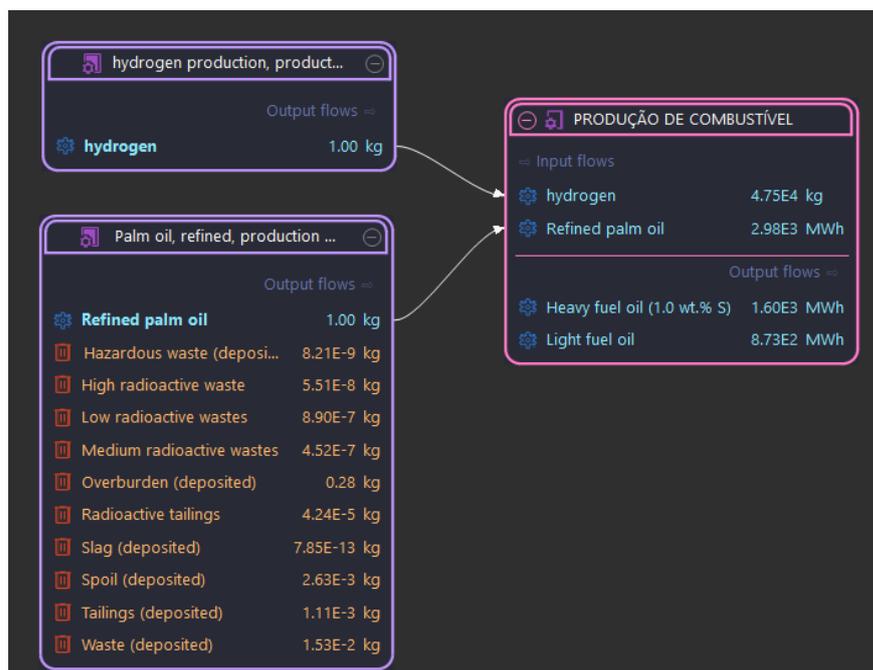
Fonte: O autor (2025).

Nas Figuras 14 e 15, ficam demonstrados de forma visual os esquemas de blocos para delimitação das fronteiras da produção de *HVO* com hidrogênio oriundo de gás natural e produção de *HVO* utilizando de hidrogênio verde a partir de eletrólise aquosa assistida de energia eólica, respectivamente.

De acordo com as informações fornecidas pelo Complexo Portuário SUAPE (2024), estima-se a produção de 76 mil toneladas anuais de H₂V na primeira etapa de instalação da planta. Dessa forma, será considerada essa quantidade de produção para ambas as rotas de produção de hidrogênio.

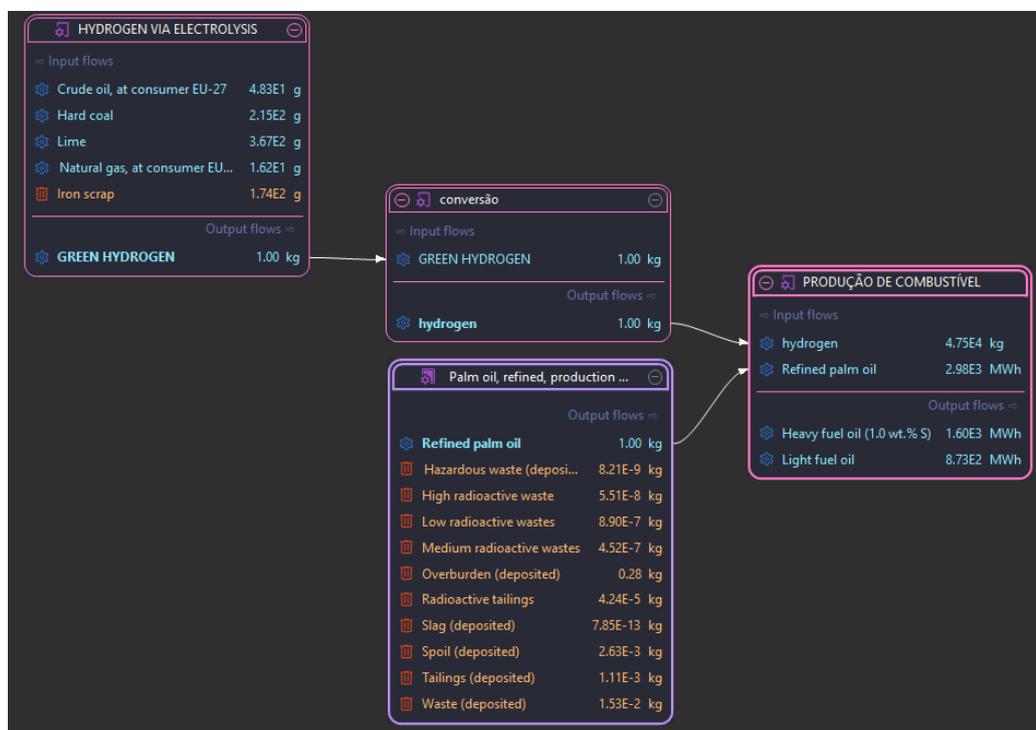
No segundo sistema, será considerado que todo o hidrogênio produzido será utilizado na produção de *HVO*. Em relação à produção de *HVO*, os dados de referência para o cálculo estão contidos nos estudos de Vivadinar e Purwanto (2021), onde para cada 1 MWh de energia de óleo de palma refinado, são necessárias 62,83 toneladas de hidrogênio. Com base nas informações da *World Nuclear Association* (2020), foram determinados os valores energéticos de 45 MJ/kg, 29,3 MJ/kg e 45 MJ/kg para o petróleo bruto, carvão e gás natural. Esses dados são necessários, uma vez que o OpenLCA exige a entrada em valores energéticos de recursos fósseis a serem utilizados.

Figura 14. Blocos de fronteira da produção de *HVO* por hidrogênio cinza.



Fonte: O autor (2025).

Figura 15. Blocos de fronteira do *HVO* por hidrogênio verde.



Fonte: O autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção de Hidrogênio

Os resultados obtidos para as emissões, uso de recursos fósseis e consumo de minérios e metais para as rotas de produção de hidrogênio, reforma de vapor e eletrólise aquosa assistida de energia eólica, estão dispostos na Tabela 1. É importante salientar que o *software* retorna os resultados de emissões em quilogramas equivalentes de CO₂, o uso de recursos fósseis em mega joules de energia e consumo de minérios e metais em quilogramas equivalentes de antimônio (Sb).

Tabela 1: Resultados das vias de produção de hidrogênio.

Indicadores	Reforma de Vapor	Eletrólise Aquosa	Redução
CO ₂ eq. (kg)	1,33 x 10 ⁸	1,07 x 10 ⁸	19,49 %
Recursos Fósseis (MJ)	4,84 x 10 ⁹	6,99 x 10 ⁸	85,58 %
Sb eq. (kg)	20,73	0,85	95,92 %

Fonte: O autor (2025).

Como pode ser visto na Tabela 1, ocorreram reduções significativas dos impactos diretos ao meio ambiente em todos os indicadores analisados.

Em relação à emissão de CO₂ equivalente, a redução de aproximadamente 19,5% pode ser explicada pelo fato de usinas eólicas necessitarem de transportes de cargas pesadas para áreas afastadas de centros urbanos, demandando uma quantidade significativa de combustível queimado para instalação de parques eólicos. Além disso, o processo de fabricação de aerogeradores precisa de uma grande quantidade de energia e logística, devido ao tamanho dos equipamentos utilizados.

Retomando a atenção para o uso de recursos fósseis, a drástica redução de quase 86%, leva ao entendimento de que o processo de eletrólise aquosa associada com usinas eólicas pode até demandar uma quantidade de recursos fósseis inicialmente para fabricação e instalação dos parques industriais. Entretanto, a operação e fonte energética não depende diretamente do uso de gás natural, o que ocorre no processo de reforma de vapor.

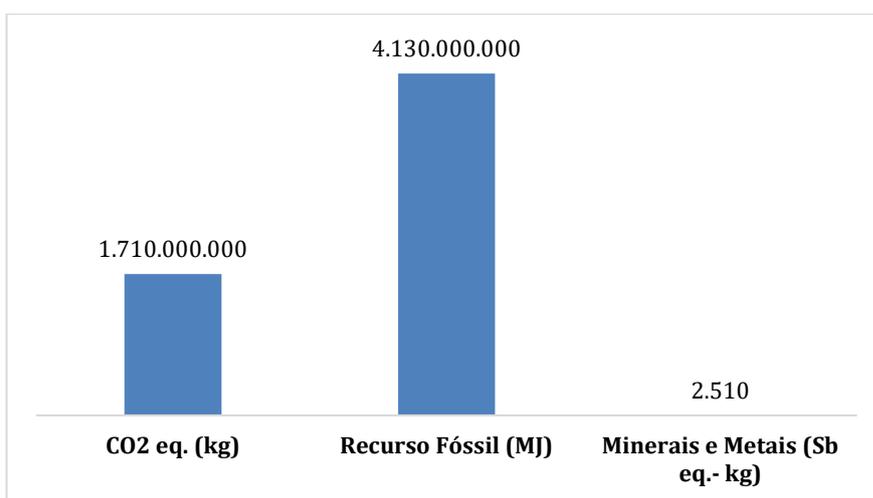
Por fim, a redução de 95,92% no consumo de minérios e metais pode ser explicada pela manutenção constante de parques industriais de reforma de vapor, uma vez que, esse processo, gera diversos subprodutos potencialmente corrosivos, além de operar em condições de altas temperaturas e elevadas pressões.

4.2 Produção de HVO

Na Figura 16, estão os resultados dos impactos ambientais estudados para o processo de refino de óleo de palma, o qual será utilizado para produção do HVO. É importante salientar que esse processo será considerado o mesmo em ambos os casos de estudo, visto que independe da produção de hidrogênio pelas vias consideradas.

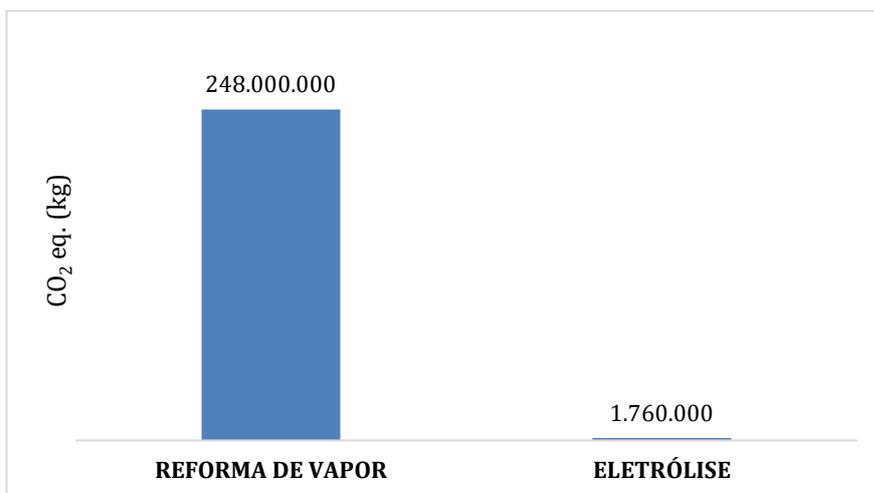
Já nas Figuras 17, 18 e 19, estão dispostos os dados calculados em relação aos impactos ambientais de cada uma das duas configurações consideradas para obtenção de hidrogênio.

Figura 16 – Impactos ambientais do refino de óleo de palma.

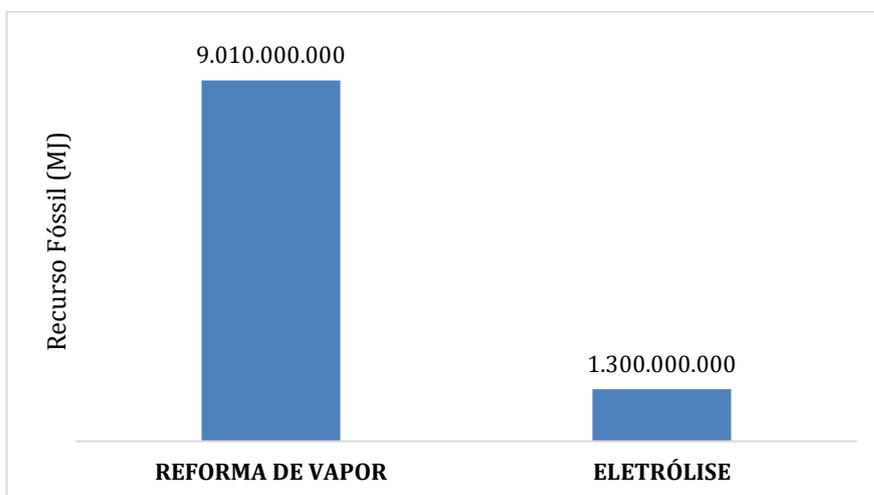


Fonte: O autor (2025).

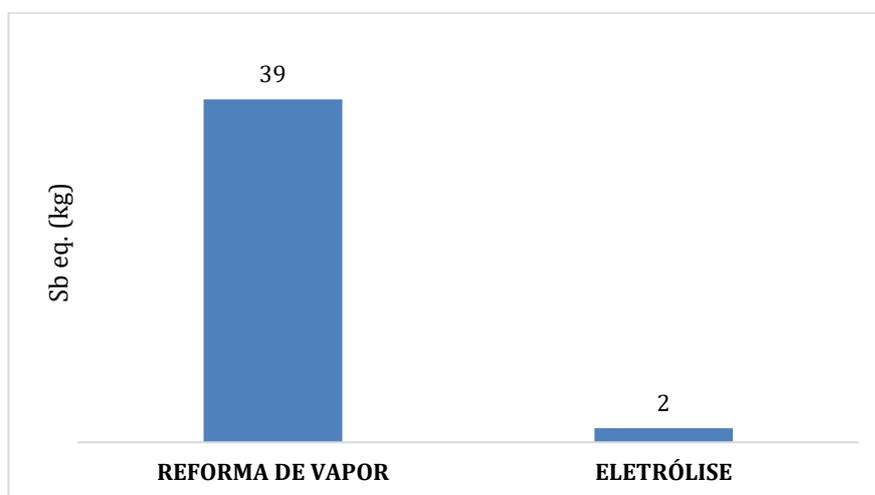
Figura 17 – Emissões dos processos de produção do hidrogênio.



Fonte: O autor (2025).

Figura 18 – Consumo de recursos fósseis dos processos de produção de H₂.

Fonte: O autor (2025).

Figura 19 – Consumo minerais e metais dos processos de produção de H₂.

Fonte: O autor (2025).

Em relação aos impactos das rotas de produção do hidrogênio, nota-se uma relevante diferença em relação a todos os indicadores levantados para o estudo da ACV.

Como pode ser visto na Tabela 2, obteve-se uma redução maior que 99% na emissão de CO₂ equivalente na atmosfera, um decaimento de quase 86% no consumo de recursos fósseis e aproximadamente 96% de queda no consumo de minérios.

Tabela 2 – Resultados das vias de produção de HVO.

Indicadores	Reforma de Vapor	Eletrólise Aquosa	Redução
CO ₂ eq. (kg)	2,48 x 10 ⁸	1,76 x 10 ⁶	99,3%
Recurso Fóssil (MJ)	9,01 x 10 ⁹	1,30 x 10 ⁹	85,6%
Sb eq. (kg)	38,6	1,57	95,9%

Fonte: O autor (2025).

Esses resultados aparentam ser coerentes, visto que o princípio de funcionamento de uma reforma de vapor depende diretamente do processamento de gás natural, ao passo que a eletrólise utiliza energia eólica, dessa forma, não depende diretamente do consumo de materiais fósseis, de forma contínua, para produzir hidrogênio. O maior consumo de minérios e metais no processo de reforma de vapor pode ser explicado com base na necessidade constante de manutenção dos equipamentos industriais, visto que esse processo gera componentes agressivos e potencialmente corrosivos às tubulações e estruturas de sustentação.

5 CONCLUSÃO

Através da Análise de Ciclo de Vida dos processos de reforma de vapor e eletrólise aquosa assistida de energia eólica, foi possível mensurar os impactos ambientais de cada uma na produção de hidrogênio. Além disso, também foi possível compreender os aspectos ambientais afetados na produção de óleo vegetal hidrotratado, considerando as mesmas duas rotas de produção de hidrogênio.

A produção de hidrogênio verde pelo processo eletrolítico, o qual gera H₂V, demonstrou-se substancialmente mais sustentável que o processo de reforma de vapor do gás natural. As reduções obtidas nas emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos fósseis em unidades energéticas e consumo de minérios e metais demonstram um grande potencial de viabilizar esse processo como o principal para obtenção de hidrogênio em sua forma molecular.

Não obstante, no processo de produção de óleo vegetal hidrotratado também foram observadas reduções significativas nos indicadores diretos de impacto ao meio ambiente, ao se considerar a obtenção de hidrogênio pela via eletrolítica assistida de energia eólica. Com isso, fica claro o potencial e viabilidade ecológica da produção em escala desse novo tipo de biocombustível, utilizando-se de matérias-primas verdes.

REFERÊNCIAS

SOFTWARE

GREENDELTA. **OpenLCA**. Version 2.4.0. Berlin. Green Delta GmbH, 2025. Disponível em: <https://www.openlca.org/download/>. Acesso em: 20 fev. 2025.

LEGISLAÇÃO

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 14040**: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR ISSO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT. NBR 14044**: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2009b.

AUTORES

ALVES, S. C. C. **Análise de Ciclo de Vida de Coberturas Ajardinadas**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

AMIN, A. M.; CROISSET, E.; EPLING, W. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 4, p. 2904-2935, 2011.

BARCA, S. Energy, property, and the industrial revolution narrative. **Ecological economics**, v. 70, n. 7, p. 1309-1315, 2011.

BHANDARI, R.; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review. **Journal of cleaner production**, v. 85, p. 151-163, 2014.

BORTEL, I.; VÁVRA, J.; TAKÁTS, M. Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. **Renewable Energy**, v. 140, p. 680-691, 2019.

CHENG, X.; SHI, Z.; GLASS, N.; ZHANG, L.; ZHANG, J.; SONG, D.; LIU, Zhong-Sheng; WANG, H.; SHEN, J. A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation. **Journal of Power Sources**, v. 165, n. 2, p. 739-756, 2007.

CHATENET, M.; POLLET, B. G.; DEKEL, D. R.; DIONIGI, F.; DESEURE, J.; MILLET, P.; BRAATZ, R. D.; BAZANT, M. Z.; EIKERLING, M.; STAFFELL, I.; BALCOMBE, P.; SHAO-HORN, Y.; SCHÄFER, H. Water electrolysis: from textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. **Chemical society reviews**, v. 51, n. 11, p. 4583-4762, 2022.

DIÁRIO DE PERNAMBUCO. Recife: faltam ruas para tantos carros. 2024.

FERREIRA, José Vicente Rodrigues. Gestão ambiental. **Análise do Ciclo de Vida**. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

GOVERNO FEDERAL (Brasil). Ministério de Minas e Energia. Energia renovável chega a quase 50% da matriz elétrica brasileira. **Energia renovável chega a quase 50% da matriz elétrica brasileira.**, 2022.

GRIGORIEV, S. A.; FATEEV, V. N.; BESSARABOV, D. G.; MILLET, P. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 49, p. 26036-26058, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review**, 2024.

KAYFEÇI, Muhammet; KEÇEBAŞ, Ali; BAYAT, Mutlucan. Hydrogen production. In: **Solar hydrogen production**. Academic Press, 2019. p. 45-83.

KUMAR, S. Shiva; HIMABINDU, VJMSfET. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442-454, 2019.

LEVALLEY, T. L.; RICHARD, A. R.; FAN, M. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies—A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 30, p. 16983-17000, 2014.

MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. **Desenvolvimento Socioeconômico em Debate**, v. 5, n. 1, p. 94-106, 2019.

LORENZI, G.; MIGNINI, L.; VENEZIA, B.; SILVA, C.; SANTARELLI, M. Integration of high-temperature electrolysis in an HVO production process using waste vegetable oil. **Energy Procedia**, v. 158, p. 2005-2011, 2019.

MASOUMI, M. E.; SADRAMELI, S. M.; TOWFIGHI, J.; NIAEI, A. Simulation, optimization and control of a thermal cracking furnace. **Energy**, v. 31, n. 4, p. 516-527, 2006.

NEZHAD, M. Z.; ROWSHANZAMIR, S.; EIKANI, M. H. Autothermal reforming of methane to synthesis gas: Modeling and simulation. **International journal of hydrogen energy**, v. 34, n. 3, p. 1292-1300, 2009.

NICOLETTI, G.; ARCURI, N.; NICOLETTI, G. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 205-213, 2015.

NI, M.; LEUNG, M. K.H.; LEUNG, D. Y.C. Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). **International journal of hydrogen energy**, v. 33, n. 9, p. 2337-2354, 2008.

RASHID, Md M.; AL MESFER, M. K.; NASEEM, H.; DANISH, M. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. **Int. J. Eng. Adv. Technol**, v. 4, n. 3, p. 2249-8958, 2015.

SANTOS, F. S.; SOARES, A. S; MORET, M. A.; GUARIEIRO, L. L. N. HVO PRODUCTION: CONCEPTS AND PRODUCTION ROUTES. **Blucher Proceedings**, 2023.

SUAPE. Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros. **Projeto Hub Suape para Transição Energética é selecionado pelo Ministério de Minas e Energia.**, 2024.

THEIS, T.; KLEIN-BANAI, C. Problem-Solving, Metrics, and Tools for Sustainability. **Sustainability: A Comprehensive Foundation.**, p. 423-488, 2012.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2011.

VINODH, R.; KALANUR, S. S.; NATARAJAN, S. K.; POLLET, B. G. Recent advancements of polymeric membranes in anion exchange membrane water electrolyzer (AEMWE): A critical review. **Polymers**, v. 15, n. 9, p. 2144, 2023.

VIVADINAR, A. H.; PURWANTO, W. W. Techno-enviro-economic study of hydrogenated vegetable oil production from crude palm oil and renewable hydrogen. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. p. 1143, 2021.

WOLFRAM, C.; SHELEF, O.; GERTLER, P. How will energy demand develop in the developing world?. **Journal of Economic Perspectives**, v. 26, n. 1, p. 119-138, 2012.