

**CENTRO PAULA SOUSA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

VINÍCIUS HENRIQUE DA SILVA

**COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS: HISTÓRICO E PRODUÇÃO E
HIDROGÊNIO VERDE**

Santo André

2025

VINÍCIUS HENRIQUE DA SILVA

**COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS: HISTÓRICO E PRODUÇÃO E
HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Eletrônica automotiva da Fatec Santo André, orientado pelo Prof. Dr Jhonny Frank Sousa Joca, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Eletrônica Automotiva.

Santo André

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S586c

Silva, Vinícius Henrique da

Combustíveis sintéticos: histórico e produção e hidrogênio verde / Vinícius Henrique da Silva. - Santo André, 2025. – 27f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Jhonny Frank Sousa Joca

1. Eletrônica. 2. Veículos. 3. Combustíveis sintéticos. 4. Tecnologia. 5. Meio Ambiente. 6. Produção. 7. Hidrogênio verde. 8. Veículos. 9. Eletrólise. 10. Fontes renováveis. I. Combustíveis sintéticos: histórico e produção e hidrogênio verde.

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 06 de dezembro de 2025.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:
“COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS: HISTÓRICO, PRODUÇÃO E HIDROGÊNIO
VERDE” DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. JHONNY FRANK SOUSA JOCA _____

MEMBROS:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO _____

PROF. ORLANDO DE SALVO JUNIOR _____

ALUNOS:

VINICIUS HENRIQUE DA SILVA _____

Aos professores que ministraram aulas para mim nesses anos, aos familiares que apoiaram nessa trajetória, e a mim mesmo por não desistir na dificuldade.

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus familiares e amigos que me incentivaram para chegar até aqui. Também agradeço a todos professores que tive no curso, em especial o professor Fernando Garup Dalbo e ao professor Jhonny Frank Sousa Joca.

“Use a sua disposição em prol do bem e o sol vai brilhar”

Hariel Denaro

RESUMO

O trabalho consiste em mostrar de que forma os combustíveis sintéticos provocam efeitos positivos e negativos no meio ambiente e tratar estes pontos em relação aos combustíveis já existentes que são obtidos a partir do petróleo. Este combustível é possível existir graças ao hidrogênio verde capturado na atmosfera e que é transformado através da eletrólise da água que por sua vez utiliza de fontes renováveis como energia solar e eólica para o seu funcionamento, e também sua relação e comparação aos veículos movidos à energia elétrica. O objetivo é realizar um estudo deste combustível e se há viabilidade de substituição dos combustíveis utilizados atualmente e também sua concorrência com veículos movidos a bateria. A busca pela diminuição nas emissões de gases poluentes no planeta é um desafio que diversas empresas estão tentando solucionar e é assim também na indústria automobilística, já que existem normas para que em 2030 todos os veículos emitam zero carbono.

Palavras-chave: Combustíveis sintéticos. Meio ambiente. Eletrólise. Fontes renováveis.

ABSTRACT

The work involves demonstrating how synthetic fuels cause both positive and negative effects on the environment, and discussing the advantages and disadvantages of this type of fuel compared to existing fuels derived from oil. This fuel is made possible by green hydrogen captured from the atmosphere and transformed through water electrolysis, which in turn uses renewable sources such as solar and wind energy for its operation, as well as its relationship and comparison with electric-powered vehicles. The objective is to carry out a study of this fuel and assess whether there is feasibility to replace the fuels currently used, as well as its competitiveness with battery-powered vehicles. The search for a reduction in pollutant gas emissions on the planet is a challenge that many companies are trying to address, and this is also the case in the automotive industry, since there are regulations requiring all vehicles to achieve zero carbon emissions by 2030.

Keywords: Synthetic fuels. Environment. Electrolysis. Renewable sources.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	9
1.1 Objetivo.....	12
1.2 Motivação.....	12
2 Histórico dos combustíveis sintéticos e sua produção.....	13
2.1 Custo de fabricação do e-fuel.....	18
2.2 Estudo do ciclo de vida.....	18
3 Hidrogênio Verde: Captura do Carbono e panorama de combustíveis sintéticos no Brasil..	17
4 Conclusão.....	20
5 Referências.....	22

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a Indústria busca medidas de diminuir emissões de poluentes que geram o efeito estufa, normalmente dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4) (VASCONCELOS, 2023; MARAFON, 2023; JUNIOR, 2023). E uma das maiores causadoras desse efeito são os automóveis com os motores de combustão interna que utilizam combustíveis de derivados fósseis.

O Petróleo como a principal fonte desses combustíveis tem visto seu valor diminuir nos últimos anos, porém a demanda energética mundial aumentou, isso faz com que países em desenvolvimento como o Brasil busquem alternativas tanto no valor gasto quanto na redução de poluentes. O Brasil há alguns anos trabalha nessa missão de redução de emissões utilizando combustíveis renováveis como o etanol e o biodiesel derivados da cana-de-açúcar. Uma das alternativas é o uso de hidrogênio(H_2) como fonte de energia, pois com ele é possível obter combustíveis que não aumentam o efeito estufa, pois gases liberados por ele já estavam na atmosfera(VASCONCELOS, 2023; MARAFON, 2023; JUNIOR, 2023).

O hidrogênio é um dos compostos químicos de maior quantidade no globo terrestre, através dele é possível obter outros compostos. A indústria tem explorado a produção de combustíveis sintéticos, um combustível sem emissão de poluentes.

Para a produção desses combustíveis é necessário dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). A água passa por uma eletrólise onde se separa o oxigênio e o hidrogênio, e o oxigênio é desprezado nesse processo, enquanto o hidrogênio é misturado com o dióxido de carbono resultando em metanol (CH_3OH), que passa por um catalisador e assim chegará na composição desejada, Gasolina ou Diesel, também é possível extrair Querosene de aviação nesse processo(VASCONCELOS, 2023; MARAFON, 2023; JUNIOR, 2023).

O hidrogênio possui diversas classificações e também separado por cores e são eles:

Hidrogênio Renovável: Produzido usando eletricidade gerada a partir de fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou hidroelétrica. Também pode ser obtido a partir de biogás ou da conversão de biomassa, desde que esses processos atendam a critérios de sustentabilidade.

Hidrogênio Limpo: Refere-se ao hidrogênio renovável, que é produzido de maneira a não gerar emissões de gases de efeito estufa, especialmente quando a eletricidade utilizada é totalmente renovável.

Hidrogênio Baseado em Fósseis: Feito a partir de combustíveis fósseis, como gás natural ou carvão, e é bastante poluente devido às grandes emissões de CO₂ associadas a esse processo.










Hidrogênio de Base Fóssil com Captura de Carbono: Produzido a partir de combustíveis fósseis, mas inclui tecnologia para capturar e armazenar os gases de efeito estufa emitidos durante a produção. Embora reduza as emissões em comparação com o processo sem captura, a eficiência máxima da captura é de cerca de 90%.

Hidrogênio de Baixo Teor de Carbono: Também produzido a partir de combustíveis fósseis, mas incorpora a captura de carbono e pode utilizar eletricidade. Este tipo de hidrogênio tem menos impacto ambiental do que o hidrogênio baseado apenas em fósseis, mas ainda pode gerar algumas emissões.

Combustíveis Sintéticos Derivados de Hidrogênio: Criados a partir da combinação de hidrogênio e carbono para produzir combustíveis líquidos ou gasosos. Para serem sustentáveis, uma parte significativa do hidrogênio usado deve ser renovável. No entanto, a pegada de carbono dos combustíveis sintéticos pode variar muito dependendo dos processos e fontes utilizados (VASCONCELOS, 2023; MARAFON, 2023; JUNIOR, 2023).

A tabela 1 mostra os tipos de hidrogênio citados anteriormente, mas agora classificando eles e mostrando uma breve descrição sobre cada um deles.

Tabela 1 – Tipos de Hidrogênio

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE, 2021.

Carbon Capture and Utilisation (CCU) é uma mistura de tecnologias que capturam o hidrogênio da atmosfera e o transforma em outros produtos como combustíveis, produtos químicos e materiais de construção (CO₂ VALUE EUROPE, 2025).

1.1 Objetivo

Realizar um estudo sobre combustíveis sintéticos e analisar uma potencial substituição dos combustíveis derivados de petróleo nos motores movidos à combustão interna e como esse combustível sintético pode fazer frente aos motores elétricos.

1.2 Motivação

Acompanhando a Fórmula 1, me interessei por alguns pontos, mais especificamente qual combustível é usado na categoria. Atualmente é usada a gasolina convencional, porém a partir do ano de 2026, a categoria adotará um novo combustível para reduzir os impactos ao meio ambiente, que é o combustível sintético.

2 Histórico dos combustíveis sintéticos e sua produção

A história dos combustíveis sintéticos apesar de parecer mais recente é estudada aproximadamente desde os anos 1910 na Alemanha por Friederich Bergius que utilizava o processo de liquefação direta de carvão que envolve utilizar uma reação química de hidrogénio sob alta pressão (3000 a 10000 psi) e temperatura (400 a 500 °C) junto com uma mistura de carvão ou petróleo triturado sobre um catalisador, com isso era possível produzir combustíveis líquidos como gasolina, diesel e óleo combustível. Friederich Bergius com base de estudos descobriu que o carvão marrom era a melhor opção para esse processo pois o conteúdo de carbono era inferior a 85% no carvão livre de cinzas e que o hidrogénio dobrava durante o processo de liquefação. Bergius teve seu trabalho reconhecido e ganhou um Premio Nobel em 1931 pelas suas contribuições à invenção e desenvolvimentos de métodos químicos de alta pressão (WILLAUER; HARDY, 2020).

Os eletrocombustíveis configuram-se como uma proposta tecnologicamente inovadora, dotada de elevado potencial para atender às crescentes demandas energéticas das sociedades contemporâneas, ao mesmo tempo em que promovem uma expressiva redução na pegada de carbono. Uma de suas principais vantagens reside na compatibilidade com as infraestruturas energéticas já estabelecidas, possibilitando sua utilização direta em motores, redes e sistemas existentes, sem exigir adaptações estruturais significativas. Essa característica confere aos e-fuels uma atratividade singular, especialmente no contexto de setores de difícil descarbonização, como o transporte marítimo, aéreo e rodoviário de longa distância (UDDIN; WANG, 2024).

Mais do que uma simples alternativa aos combustíveis fósseis, os eletrocombustíveis despontam como potenciais elementos estruturantes da próxima etapa da transição energética global. Seu desenvolvimento e implementação em larga escala representam uma oportunidade estratégica para a consolidação de sistemas energéticos baseados em fontes renováveis, promovendo não apenas a neutralidade, mas também a possibilidade de emissões negativas de carbono. Dessa forma, os e-fuels constituem um vetor promissor na construção de um cenário energético

sustentável, contribuindo de maneira decisiva para a mitigação das emissões globais de CO₂ e para o enfrentamento dos impactos mais severos das mudanças climáticas (UDDIN; WANG, 2024).

Aproximadamente 10 anos após Friederich Bergius, Franz Fischer e Hans Tropsch começaram a desenvolver o processo de liquefação indireta de carvão para sintetizar combustível líquido através de carvão na Alemanha. O processo consiste utilizar o vapor para produzir uma mistura de hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO), os componentes químicos H₂ e CO sofrem uma reação sobre um catalisador formado de cobalto ou ferro em temperaturas baixas (180°C a 200°C) e pressões baixas (14 a 235 psi), essa reação conseguia extrair frações líquidas de hidrocarbonetos de petróleo, esse processo ficou conhecido como Fischer-Tropsch (WILLAUER; HARDY, 2020).

O desenvolvimento e comércio dessas tecnologias de combustível líquido sintético foi de extrema importância para a Alemanha e outros países na década de 20, pois dependiam muito do petróleo para abastecer automóveis, caminhões, aviões e navios movidos a diesel.

O Partido Nazista se comprometeu em fornecer dinheiro para a produção desse combustível sintético com o objetivo de tornar a Alemanha independente de petróleo e se fortalecer economicamente. Durante o período da Segunda Guerra Mundial esse processo rendeu cerca de 50% do combustível líquido utilizado pela Alemanha, sendo 95% para abastecer aviões. No ano de 1945 as Forças Aliadas desativaram diversos locais de produção, o que fez diminuir a sua fabricação. Com o fim da guerra e derrota alemã foi definido na Conferência de Potsdam que os locais de fabricação de combustível sintético seriam utilizados pela Alemanha Ocidental para hidrogenar e refinar o petróleo que seria importado (WILLAUER; HARDY, 2020).

Desde a segunda guerra essas tecnologias foram mais usadas por países com pouca reserva de petróleo e que buscavam uma alternativa para a fabricação de combustíveis. A *South African Coal, Oil and Gas Corporation* (SASOL), foi a primeira a comercializar o processo de Fischer-Tropsch na África do Sul em 1955 (WILLAUER; HARDY, 2020).

Trazendo para os dias atuais, montadoras buscam alternativas para a redução de emissão de gases que resulta também na mudança climática, um dos caminhos é a transição para veículos elétricos, pois em alguns países já existe regulamentação para a proibição de veículos a gasolina e diesel para propor uma solução mais sustentável. É tido como objetivo o ano de 2030 para a eletrificação total dos veículos, muitas fabricantes já estão se adaptando para essa realidade em baterias e motores eletricos para os novos veículos. Por outro lado, também há resistência por parte de montadoras em abandonar a produção de veículos movidos a combustão. E a busca por combustíveis sintéticos e tecnologias que visam diminuir a emissão de poluentes é uma via para a continuidade da existência de veículos à combustão (GRANDE, 2023).

Ter duas ou mais soluções sustentáveis no futuro como a eletrificação e combustível sintético acaba atendendo diversos consumidores e mantendo a meta de atingir emissão zero em poluentes no ano de 2030.

A Porsche foi pioneira na introdução de combustíveis sintéticos com a inauguração de uma fábrica no Chile no ano 2024, o que fez muitas pessoas voltarem sua atenção para a marca, já que pode ser a salvação dos motores a combustão. Combustíveis sintéticos são neutros em emissões de dióxido de carbono, já que o CO₂ utilizado é retirado da própria atmosfera, portanto ao ser queimado ele não contribuirá para o aumento de gases no planeta, enquanto o CO₂ presente em combustíveis fósseis vem do petróleo e aumenta ainda mais a poluição na Terra (PAIXÃO, 2023).

A usina construída no Chile foi feita por um conjunto de empresas comandadas pela *Highly Innovative Fuels* (HIF), que tem como parceria a empresa alemã Porsche, a americana Baker Hughes e a chilena AME, que denominaram a usina de Haru Oni, o nome representa ventos fortes na língua dos índios locais que já habitaram a região, já que o local onde está a usina tem ventos fortes durante aproximadamente 270 dias do ano, segundo a Porsche, e junto a isso a produção de energia vem através de energia eólica que faz com que as turbinas trabalhem por muito tempo em potência alta, mais do que qualquer local da Alemanha por exemplo (GRANDE, 2023).

O início da produção ainda em estado experimental segundo a HIF gerava cerca de 130 mil litros por ano, mas a projeção era chegar em 55 milhões de litros após 2 anos de usina e 550 milhões de litros por ano após 10 anos de produção e ampliação da usina. Esses números também são bases para outras duas usinas que estão no Texas nos Estados Unidos da América e Tasmânia na Austrália que tinham de previsão de início no ano de 2024. A localização serviu de estratégia de marketing e na questão energética, então o Texas(EUA) forneceria para o mercado norte americano, o Chile representaria a Europa e a Austrália o mercado asiático, no geral todas essas usinas utilizariam uma energia renovável como, energia solar ou eólica (PAIXÃO, 2023).

As empresas relacionadas acreditam que no futuro os combustíveis sintéticos podem suprir toda a demanda de automóveis movidos a combustão presentes no mundo, cerca de 1,3 bilhões de veículos e querendo expandir para a aviação e marítimos (PAIXÃO, 2023).

Engenheiros da Porsche salientam que uma das vantagens do combustível sintético é que não será necessário adaptação nos veículos a combustão já produzidos, já que o composto químico é o mesmo da gasolina utilizada atualmente (GRANDE, 2023).

Um dos pontos negativos no momento atual é o preço do combustível comparado aos atuais, em média o e-fuel custa 2 dólares. Isso significa quase o dobro do preço no Brasil(US\$ 1,011) e EUA(US\$ 0,984), mas se for comparado ao preço vendido na Alemanha(US\$ 1,879) e do Chile(US\$ 1,595) os valores se aproximam bastante, esses dados foram analisados pelo site Global Petrol Prices(PAIXÃO, 2023). Uma sugestão dada por Marcos Marques gerente de combustíveis sintéticos da Porsche, seria a mistura entre o combustível sintético e o combustível fóssil para diminuir a emissão de CO2 e o preço do combustível sintético, mas inicialmente a produção do e-fuel irá para os carros de corrida da Porsche que competem na Porsche Mobil 1 Super (PAIXÃO, 2023).

Embora a Europa tenha feito acordo para a proibição de utilização de carros a combustão a partir de 2030 e permitindo apenas carros elétricos e carros que usam células de combustível, a Alemanha e a União Europeia estabeleceram um novo acordo para que seja permitida a venda e registros de carros que utilizem combustível sintético até 2035.

A usina de Haru Oni tem destinadas partes para que a produção desse combustível seja feita, elas são divididas em 6 partes: A primeira parte é responsável pela geração de energia eólica, a segunda parte é onde ocorre a eletrólise da água separando a água em O_2 e em H_2 verde, a terceira é feita captura de carbono da atmosfera, o processo de captação do gás carbônico é através do ar da atmosfera, onde ele aspirado para uma etapa onde há a separação dos componentes através de pressurizadores, condensadores e filtros, o CO_2 é armazenado em estado líquido e oxigênio é liberado novamente para a atmosfera., na quarta o H_2 e CO_2 sofrem uma reação química que gera o metanol sintético, no quinto processo o metanol passa por outra reação química onde é convertido em gasolina sintética, o sexto processo principal a gasolina sintética é armazenada e pode se exportada para outros lugares. A água utilizada na usina é fornecida pela empresa Punta Arenas e através de poços artesianos. A Figura 1 ilustra a usina de Haru Oni.

Figura 1 - Usina de Haru Oni



Fonte: eixos, (2022).

A geração de energia elétrica da fábrica vem através da energia eólica, onde os ventos fazem girar as pás eólicas e conseguem armazenar até 3465 MW. Essa energia é utilizada na eletrólise da água para que seja captado o hidrogênio e como no processo do gás carbônico o oxigênio também é jogado na atmosfera, em seguida a água passa por um eletrolisador (é um dispositivo que utiliza a eletrólise para separar as moléculas da água em hidrogênio e oxigênio, utilizando energia elétrica) onde ela entra em um grupo de células e entra em contato com corrente elétrica. A energia utilizada nesse processo é aproximadamente 30% da capacidade do gerador de energia elétrica (GRANDE, 2023).

2.1 Custo de fabricação do e-fuel

O custo de produção dos eletrocombustíveis está profundamente relacionado tanto ao preço quanto à origem da eletricidade utilizada em sua síntese. Caso o valor da energia elétrica permaneça dentro das faixas atualmente observadas no mercado, a competitividade econômica dos eletrocombustíveis tende a ser reduzida em comparação com outras alternativas de descarbonização. Além disso, embora as fontes renováveis apresentem vantagens ambientais evidentes, sua natureza intermitente impõe limitações à estabilidade da produção, elevando os custos de investimento e exigindo soluções tecnológicas complementares, como sistemas de armazenamento de energia e estratégias de controle operacional, para mitigar os efeitos da variabilidade na geração (ABABNEH; HAMEED, 2022).

As diferenças nas condições econômicas, estruturais e de disponibilidade de recursos entre distintas regiões geográficas resultam em variações significativas nos custos e nas eficiências dos processos de produção. Dessa forma, torna-se imprescindível que cada país ou região desenvolva análises técnico-econômicas específicas sobre a viabilidade da síntese de eletrocombustíveis, de modo a definir estratégias energéticas adequadas às suas particularidades territoriais, industriais e infraestruturais.

Nesse contexto, é fundamental promover o avanço das pesquisas voltadas à otimização das rotas tecnológicas de redução metálica trocando o gás natural ou carvão por hidrogênio, isso geraria vapor de água ao invés de poluentes, à ampliação da viabilidade econômica dos processos e à integração sistêmica dessas tecnologias com redes elétricas de alta participação renovável. Tais esforços contribuem para o fortalecimento das estratégias de descarbonização e consolidam o papel dos eletrocombustíveis — líquidos e metálicos — como elementos centrais na transição para um sistema energético global de baixo carbono (ABABNEH; HAMEED, 2022).

2.2 Estudo do ciclo de vida

As Avaliações do Ciclo de Vida (ACV), ou Life Cycle Assessments (LCA), têm se consolidado como instrumentos essenciais para a compreensão abrangente dos impactos ambientais de tecnologias emergentes no setor energético. Sob essa ótica, as ACVs oferecem uma visão sistêmica que abrange desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reaproveitamento final dos produtos, possibilitando a identificação de impactos em múltiplas dimensões ambientais, e não apenas na emissão de gases de efeito estufa. Estudos recentes, reforçam a relevância dessa

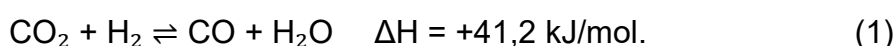
abordagem ao evidenciar a importância de considerar variáveis regionais, tecnológicas e metodológicas para a avaliação realista da sustentabilidade dos eletrocombustíveis(UDDIN; WANG, 2024).

Apesar dos avanços observados na literatura, observa-se ainda uma limitação significativa quanto à integração entre as Avaliações do Ciclo de Vida (ACVs) e as Avaliações Tecnoeconômicas (TEAs). A ausência de estudos que articulem de forma sistemática os aspectos econômicos e ambientais restringe a capacidade de formulação de diagnósticos completos sobre a viabilidade dos eletrocombustíveis (e-fuels). Assim, permanece a necessidade de uma abordagem interdisciplinar que combine as dimensões técnica, econômica e ambiental em um mesmo esquema analítico, de modo a orientar estratégias de desenvolvimento tecnológico e políticas públicas de descarbonização mais efetivas.

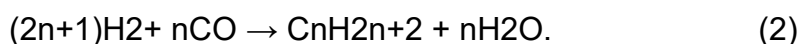
O presente estudo busca suprir essa lacuna ao integrar as perspectivas de TEA e ACV em uma análise consolidada sobre os e-fuels. Essa integração visa oferecer uma compreensão mais ampla e fundamentada de sua viabilidade técnica, econômica e ambiental, permitindo identificar sinergias, trade-offs e pontos críticos ao longo das cadeias de produção e uso (UDDIN; WANG, 2024).

3 Hidrogênio Verde: Captura do Carbono e panorama de combustíveis no Brasil

O hidrogênio verde (H₂V) destaca-se no contexto da transição energética por ser produzido a partir de fontes renováveis, como a energia eólica e solar, por meio do processo de eletrólise da água. Nesse processo, as moléculas de água são separadas em seus componentes fundamentais, o hidrogênio e o oxigênio, por meio da aplicação de corrente elétrica através de eletrolisadores (PEREIRA; SALES MARINHO; DA SILVA, 2023). Ela é dividida em duas partes, a primeira o hidrogênio reage com o dióxido de carbono, transformando ele em monóxido de carbono através da reação reversa de deslocamento do gás de água, seguido pela Equação 1:



Na segunda parte essa reação gera uma mistura gasosa e é submetida ao processo de Fischer-Tropsch que transforma a mistura de hidrocarbonetos de cadeia longa como alcanos e alcenos onde podem ser refinados e obterem combustíveis líquidos como gasolina, diesel e querosene, dada pela equação (2) global de Fischer-Tropsch: (ABABNEH; HAMEED, 2022).



A eletrólise é considerada uma das tecnologias mais promissoras para a produção de hidrogênio verde, principalmente devido ao seu potencial de integrar fontes de energia limpa, como a solar e a eólica, que não emitem CO₂. Por não gerar emissões de gases de efeito estufa durante sua produção, esse insumo energético desempenha um papel central nos esforços globais para atingir as metas climáticas estabelecidas no acordo de Paris, que busca diminuir a emissão de gases e consequentemente a diminuição do efeito estufa que causa o aumento da temperatura do planeta (LIMA et al., 2024).

O eletrolisador de membrana com troca de prótons (PEM) se apresenta como uma das opções mais eficientes para a produção de hidrogênio verde. Esse dispositivo oferece diversas vantagens tecnológicas, como alta eficiência energética, capacidade de produzir hidrogênio com elevado grau de pureza e adaptação a energias de baixo carbono. Sua eficiência é especialmente notável em ambientes dinâmicos, onde a produção de energia renovável pode variar ao longo do tempo, devido à variabilidade das fontes eólica e solar. Além disso, o eletrolisador PEM possui baixa permeabilidade, o que contribui para a minimização de perdas no processo de separação das moléculas de hidrogênio e oxigênio (PEREIRA; SALES; DA SILVA, 2023).

No entanto, um desafio significativo dessa tecnologia é o elevado custo de produção, principalmente devido à necessidade de materiais como metais preciosos como platina e irídio em seus componentes. Esses materiais são fundamentais para garantir a eficiência e a durabilidade dos sistemas PEM, mas sua escassez e o alto preço impactam diretamente no custo total do processo de produção do hidrogênio verde. Esse fator ainda é uma barreira para o aumento da tecnologia, limitando sua viabilidade econômica em larga escala.

Após a produção, o hidrogênio é armazenado de duas formas principais: como gás comprimido ou em estado liquefeito. O armazenamento como gás comprimido exige pressões elevadas, o que requer infraestrutura robusta e segura. O hidrogênio liquefeito, por sua vez, necessita de temperaturas extremamente baixas para manter seu estado, o que demanda um alto consumo energético para sua liquefação. Por outro lado, o oxigênio gerado no processo de eletrólise é geralmente liberado na atmosfera, mas também pode ser armazenado para fins específicos, como uso medicinal ou industrial (PEREIRA; SALES; DA SILVA, 2023).

Entretanto, a manipulação do hidrogênio apresenta desafios adicionais devido às suas propriedades físicas. O hidrogênio possui uma densidade muito baixa, o que dificulta seu armazenamento e transporte, além de possuir baixos pontos de fusão e ebulição. Essas características exigem tecnologias e infraestrutura especializadas para garantir a segurança e a eficiência no manuseio do gás, tornando a logística de distribuição um dos principais desafios no processo de implementação em larga escala do hidrogênio verde (LIMA et al., 2024).

Para a captura de carbono surge como uma tecnologia complementar essencial no processo de mitigação das mudanças climáticas. Essa técnica visa remover o dióxido de carbono proveniente de atividades industriais e da geração de energia, reduzindo significativamente sua concentração atmosférica. A eficácia dessa abordagem, contudo, depende de marcos regulatórios robustos que normatizem a captura, o transporte, o armazenamento e a eventual utilização do CO₂, de modo a garantir segurança operacional e eficácia ambiental (LIMA et al., 2024).

A integração do hidrogênio verde com o CO₂ capturado permite a produção de combustíveis sintéticos, cuja aplicação é particularmente relevante em setores de difícil eletrificação, como os transportes marítimo e aéreo, além de segmentos industriais intensivos em energia. Essa alternativa tecnológica tem o potencial de promover a descarbonização em setores nos quais a eletrificação direta ainda se mostra inviável do ponto de vista técnico ou econômico.

Nesse cenário, projetos iniciais e plantas experimentais voltadas à síntese de combustíveis sintéticos têm desempenhado papel fundamental na avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental dessas soluções energéticas. Essas iniciativas são essenciais para a consolidação de uma matriz energética sustentável e para a superação dos desafios inerentes à adoção em larga escala. Embora diversos países já estejam investindo significativamente em projetos dessa natureza, observa-se que, no Brasil, estas iniciativas ainda são limitadas, o que evidencia a necessidade de políticas públicas mais eficazes, incentivos financeiros e investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) (LIMA et al., 2024).

Portanto, para que o Brasil acompanhe as transformações energéticas globais e se insira de forma competitiva no mercado de energias sustentáveis, é imperativo avançar na implementação de projetos voltados ao hidrogênio verde e aos combustíveis sintéticos. Isso demanda um esforço coordenado entre governo, setor privado, universidades e centros de pesquisa, visando à construção de uma base tecnológica sólida e de um ambiente regulatório favorável à inovação. Diversos fatores colaboram com a falta de projetos de combustíveis sintéticos no Brasil, econômicos, técnicos, normativos e regulatórios, mas o país já mostra estar em busca de regularizar a produção e o uso do combustível (LIMA et al., 2024).

O Brasil tem grandes aspectos para se tornar um grande produtor de hidrogênio verde e conseqüentemente um produtor de combustível sintético, isso se dá pelo clima do país, no Nordeste é um bom ponto de partida para se iniciar a produção e captura do hidrogênio, pois a maior parte de energia elétrica usada viria através da energia solar. No país também já são utilizados combustíveis renováveis como o etanol e o biodiesel, sendo assim o e-fuel seria mais uma alternativa sustentável para o Brasil (PEREIRA; SALES; DA SILVA, 2023).

4 CONCLUSÃO

A busca pela diminuição nas emissões de gases poluentes no planeta é um desafio que diversas empresas estão tentando solucionar e é assim também na indústria automobilística, pois o combustível utilizado em maior parte dos veículos vem através de combustíveis de derivados fósseis encontrados no petróleo.

A história de encontrar soluções para isso não é tão nova e surgiu no começo do século 20 com processos que utilizavam o carvão e hidrogênio para a produção de combustíveis líquidos e aprofundada em meio a guerra mundial por Franz Fischer e Hans Tropsch, formando o método Fischer-Tropsch. Aqui no Brasil já utilizamos combustíveis que reduzem o aumento do efeito estufa, pois seu ciclo de vida é renovável como o biodiesel obtido através de óleos vegetais ou gordura animal e o etanol que vem através da cana-de-açúcar.

Atualmente existem normativas para que em 2030 na Europa não haja mais vendas de carros movidos a combustão interna, diversas montadoras já partiram para os veículos movidos somente pela eletricidade, em contrapartida outras buscam alternativas para não haver mudanças drásticas na sua frota de veículos, uma das pioneiras nesse quesito é a Porsche que possui uma empresa localizada no Chile para a produção de combustíveis sintéticos. A eletricidade da empresa é gerada através da energia eólica já que a região possui a característica de ventos fortes e isso faz com que tenha uma economia e uma vantagem de usar uma energia renovável. Vale ressaltar que a Porsche já utiliza esse combustível em alguns carros de competição.

O método utilizado para a produção do combustível sintético é a eletrólise, onde a matéria química capturada no ar sofre um processo que separa o hidrogênio do oxigênio onde só o hidrogênio molecular é armazenado e passa por outros processos para que chegue até o metano, onde é possível desenvolver também a gasolina que já é conhecida. O hidrogênio verde é altamente benéfico ao meio ambiente pois utiliza somente fontes renováveis na sua produção, como biomassa, energia solar e energia eólica, e dentre estes fatores a eletrólise é um dos pilares do hidrogênio verde, pois no processo é possível extrair um hidrogênio muito puro e limpo, e junto a isso no seu processo ele não libera gases que aumentam o efeito estufa, apesar de ser altamente benéfico para o planeta é um processo que hoje acaba tendo um alto custo para a sua produção. O Brasil ainda esbarra nas regulamentações para dar iniciativa à pesquisas de desenvolvimentos e processos

de captura de carbono e produção do hidrogênio verde e conseqüentemente a fabricação e uso do combustível sintético. No Brasil há locais favoráveis para a instalação de usinas voltadas para captura de carbono e ser um grande produtor de hidrogênio verde devido ao seu clima que favorece a produção de energia renovável como a energia solar e energia eólica e nesse aspecto a região do Nordeste se destaca, o governo busca normas para regularizar a produção.

Um ponto a ser notado é que estudo do Ciclo de Vida dos combustíveis sintéticos ainda está em análise pois não foi possível chegar a uma conclusão sobre o ciclo inteiro, que consiste não só a neutralidade de gases de efeito estufa e sim desde a extração dos minérios até o descarte ou reaproveitamento dos produtos utilizados, e já há estudos onde buscam completar essa análise.

No momento o preço acaba sendo uma desvantagem ao combustível que acaba perdendo ainda para os combustíveis já conhecidos, pois o custo de sua fabricação é necessário muitos investimentos tecnológicos como armazenamento de energia e controle operacional mas a projeção é que no futuro e com produção em grande escala e em outras fábricas o custo de sua produção e venda diminua e fique mais acessível.

A não adaptação dos carros acaba sendo uma vantagem em relação aos elétricos, pois também há um custo alto para adequar os veículos para os motores elétricos e a falta de infraestrutura para o carregamento elétrico, já que não são todas as cidades que possuem e também tem seu custo, por essa questão montadoras ainda não abandonaram a produção de veículos à combustão e isso deve ao fato de que não seria necessário adaptar os veículos para o combustível sintético.

Portanto o combustível sintético é de grande importância para a redução de emissões de gases de efeito estufa, pois seu ciclo é neutralizado em carbono, junto com os motores elétricos ou híbridos, porém seu custo de produção elevado faz com que sua distribuição seja dificultada, mas com estudos, investimentos futuros e uma produção em massa e em diversos locais, isso tende a melhorar a viabilidade econômica do combustível sintético e isso deve ser mais analisado com o passar do tempo.

5 REFERÊNCIAS

ABABNEH, H.; HAMEED, B. H. *Electrofuels as Emerging New Green Alternative Fuel. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 160, p. 112357-, 2022.

ALVES, P. E. V; MARAFON, R.; JUNIOR, R. M., 2023. Hidrogênio verde como alternativa para a transição energética e a importância do Brasil nesse cenário. **Revista Direito das Políticas Públicas**, v. 5 n. 1, 2024.

CO₂ Value Europe. **Carbon Capture and Utilisation (CCU): What is CCU?** [S.d.]. Disponível em: https://co2value-eu.translate.google.com/what-is-ccu/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc

WILLAUER, H. D.; HARDY, D. R. **Synthetic Fuel Development. Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet**. Amsterdã: Elsevier, 2020.

EIXOS, Primeira indústria de combustíveis sintéticos começa a operar no Chile, 2022. Disponível em <https://eixos.com.br/hidrogenio/primeira-industria-de-combustiveis-sinteticos-comeca-operar-no-chile/>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, Bases para a consolidação da estratégia Brasileira do hidrogênio, 2021. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2022.

GRANDE, P. C. Gasolina sintética: ela pode ser a salvação dos motores a combustão?, 2023). Disponível em <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/gasolina-sintetica-ela-pode-ser-a-salvacao-dos-motores-a-combustao/>

GRAY, N.; O'SHEA, R.; WALL, D.; SMYTH, B.; LENS, P. N. L.; MURPHY, J. D. Batteries, fuel cells, or engines? A probabilistic economic and environmental assessment of electricity and electrofuels for heavy goods vehicles. **Advances in Applied Energy**, v. 8, artigo n. 100110, 2022.

LIMA, M. C. C.; NORBERTO, D. A.; CERQUEIRA, R. M.; BASTOS, V. R., 2024. Revisão dos avanços normativos e aspectos regulatórios sobre hidrogênio verde, combustíveis sintéticos e captura de carbono no Brasil. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 11, n. 2, p. 246-263, 2024.

MCDONAGH, S.; DEANE, P.; RAJENDRAN, K.; MURPHY, J. D. *Are electrofuels a sustainable transport fuel? Analysis of the effect of controls on carbon, curtailment, and cost of hydrogen.* **Applied Energy**, v. 247, p. 716–730, 2019

PAIXÃO, A. Indústria cria combustível sintético para salvar os motores a combustão. Vai funcionar?, 2023). Disponível em <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2023/06/industria-cria-combustivel-sintetico-para-salvar-os-motores-a-combustao-vai-funcionar.ghtml>

PEREIRA, N.; MARINHO, R. M. S.; DA SILVA, S. P., 2023. Hidrogênio (verde) e a energia renovável no Brasil. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5, n. 4, p. 1-7, 2023.

PINTO, P. H. C. Avaliação da produção de H₂ a partir da reforma a seco do metano e eletrólise da água, 2022. Disponível em ([S.d.]-b). <https://repositorio.ufscar.br/server/api/core/bitstreams/4662de7f-4e86-42d3-9a30-8f2a172dd2c3/content>

UDDIN, M. N.; WANG, F. *Fuelling a Clean Future: A Systematic Review of Techno-Economic and Life Cycle Assessments in E-Fuel Development.* **Applied Sciences**, vol. 14, n. 16, p. 2-36, 2024.