

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Gabriel Lunardi

**EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: A
UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.**

Frederico Westphalen, RS
2024

Gabriel Lunardi

EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: A UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS) *campus* Frederico Westphalen, como
componente obrigatório para conclusão do curso
em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Eliane dos Santos
Banca: Aline Ferrão Custódio Passini,
Henrique Baldi Facenda

Frederico Westphalen, RS
2024

Gabriel Lunardi

EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: A UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), campus de Frederico Westphalen - RS, como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Ambiental e Sanitarista**.

Aprovado em 02 de julho de 2024.

Eliane Pereira dos Santos (UFSM, Dra)
(Presidente/Orientador)

Henrique Baldi Facenda (UFSM, Dr)
Convidado 1

Aline Ferrão Custodio Passini (UFSM, Dra)
Convidada 2

Frederico Westphalen, RS

2024

RESUMO

EVOLUÇÃO DA MOBILIDADE SUSTENTÁVEL: A UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL.

AUTOR: Gabriel Lunardi

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Eliane dos Santos

Encontrar alternativas aos combustíveis fósseis é essencial para mitigar os impactos ambientais negativos do transporte. O hidrogênio destaca-se como uma solução promissora pela sua elevada eficiência energética e pela sua capacidade de reduzir emissões poluentes. Este trabalho explora a evolução da mobilidade sustentável utilizando hidrogênio como combustível. Com o seu elevado poder calorífico, o hidrogênio supera os combustíveis tradicionais como a gasolina e o gasóleo, produzindo apenas vapor de água durante a combustão, o que elimina as emissões de CO² e outros poluentes, melhorando assim a qualidade do ar e mitigando as alterações climáticas. A investigação aborda os desafios tecnológicos e económicos associados à produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, destacando a necessidade de progresso contínuo e investimento em infraestruturas. Além disso, analisar as projeções do futuro, prevendo que a adoção do hidrogênio na mobilidade nos próximos 50 anos trará benefícios como a redução dos gases com efeito de estufa, o desenvolvimento tecnológico, a promoção de uma economia sustentável e a melhoria da mobilidade urbana. Conclui-se que, apesar dos desafios, o hidrogênio oferece um futuro promissor e sustentável.

Palavras-chave: hidrogênio, mobilidade sustentável, eficiência energética, combustíveis fósseis.

ABSTRACT**TITLE: EVOLUTION OF SUSTAINABLE MOBILITY: THE USE OF HYDROGEN AS FUEL****AUTHOR:** Gabriel Lunardi**ADVISOR:** Prof^a. Dr^a. Eliane dos Santos

Finding alternatives to fossil fuels is essential to mitigating the negative environmental impacts of transportation. Hydrogen stands out as a promising solution due to its high energy efficiency and its ability to reduce pollutant emissions. This paper explores the evolution of sustainable mobility using hydrogen as fuel. With its high calorific value, hydrogen surpasses traditional fuels such as gasoline and diesel, producing only water vapor during combustion, thus eliminating CO_2 and other pollutant emissions, improving air quality and mitigating climate change. The research addresses the technological and economic challenges associated with the production, storage, and distribution of hydrogen, highlighting the need for continuous progress and investment in infrastructure. Additionally, it analyzes future projections, predicting that the adoption of hydrogen in mobility over the next 50 years will bring benefits such as the reduction of greenhouse gases, technological development, the promotion of a sustainable economy, and the improvement of urban mobility. It concludes that despite the challenges, hydrogen offers a promising and sustainable future.

Keywords: hydrogen, sustainable mobility, energy efficiency, fossil fuels..

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar força, saúde e perseverança durante toda a trajetória deste trabalho e da minha formação acadêmica.

Aos meus pais, César Antonio Lunardi e Rosangela Chini Lunardi, pela educação, amor e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu irmão, Samuel Lunardi, e à minha irmã, Emanuele Lunardi, pela paciência, compreensão e incentivo, sempre ao meu lado, me motivando a seguir em frente.

Ao meu chefe de estágio, Henrique Baldi Facenda, pela oportunidade, orientação e aprendizado durante o período de estágio. Sua experiência e conhecimentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu colega e amigo, Marcus Vinícius, pela parceria, troca de ideias e apoio durante os estudos. Sua colaboração foi essencial para a conclusão deste trabalho.

À minha avó, Anery Piccolo Chini, pelo carinho, palavras de incentivo e orações, sempre acreditando no meu potencial e me inspirando a buscar sempre o melhor.

E, finalmente, à minha orientadora, Eliane Pereira dos Santos, por sua orientação, paciência, dedicação e valiosas contribuições ao longo de todo o processo. Sua expertise e feedback foram cruciais para a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste TCC, o meu sincero muito obrigado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Erro! Indicador não definido.
2.1 Eletrólise da água.....	Erro! Indicador não definido.
2.2 Reforma de hidrocarbonetos.....	Erro! Indicador não definido.
2.3 Gaseificação de biomassa	Erro! Indicador não definido.
2.4 Desafios e oportunidades na transição para o hidrogênio	14
2.5 Projeção futura: mobilidade sustentável em 50 anos.....	16
2.6 Avanços tecnológicos e econômicos	17
2.7 Infraestrutura e políticas públicas.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1 Eficiência energética do hidrogênio vs. Combustíveis fósseis.....	19
4.2 Impacto ambiental	19
4.3 Sustentabilidade econômica	19
4.4 Desafios tecnológicos	19
4.5. PREVISÕES FUTURISTAS.....	20
4.6. ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES DO USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)	21
4.6.1 ODS 7: Energia acessível e limpa	21
4.6.2 ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura.....	21
4.6.3 ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis	22
4.6.4 ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis	22
4.6.5 ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima	22
4.6.6 ODS 15: Vida Terrestre	23
5. CONCLUSÃO.....	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1. INTRODUÇÃO

A evolução da mobilidade sustentável é um tema cada vez mais importante no cenário atual, à medida que aumentam as preocupações globais sobre os impactos ambientais negativos associados ao transporte urbano e ao tráfego de veículos terrestres. As emissões de gases poluentes, a poluição atmosférica e a dependência de combustíveis fósseis levam as autoridades, as empresas e os cidadãos a procurarem alternativas mais sustentáveis.

Neste contexto, o hidrogênio surge como uma solução promissora para substituir os combustíveis fósseis tradicionais como a gasolina, o petróleo, o querosene, o gás natural e o carvão. Seu uso em células a combustível pode fornecer uma alternativa eficiente para geração de energia em residências, indústrias, automóveis, aviões e muito mais. O hidrogênio é um combustível menos poluente, mais eficiente e mais prático, além de oferecer certas facilidades na sua produção e distribuição (KENSKI, 2003).

A importância do hidrogênio como combustível reside nas suas propriedades ecológicas e na eficiência energética. Utilizado em células a combustível, o hidrogênio pode gerar energia limpa para residências, indústrias e veículos, emitindo apenas vapor d'água como subproduto, reduzindo significativamente a poluição do ar. Além disso, a sua densidade energética é adequada para veículos de longa distância e de alta capacidade, enquanto a possibilidade de produção a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água, proporciona um caminho sustentável para a sua adoção em larga escala.

O principal argumento deste trabalho é que o hidrogênio representa uma melhoria significativa em termos de sustentabilidade em comparação com outras fontes de combustível. A sua utilização pode reduzir significativamente as emissões de carbono e contribuir para um futuro mais limpo e saudável. No entanto, desafios como transporte, armazenamento e custos de produção precisam ser superados. A expansão das infraestruturas e o desenvolvimento contínuo da tecnologia são fundamentais para tornar o hidrogênio viável como combustível primário. 40 anos antes do motor de combustão, a decomposição da água em gases hidrogênio e oxigênio com eletricidade foi descrita em 1800 pelos ingleses William Nicholson e Anthony Carlisle, onde em 1839 William Grove descobriu como combinar gases para produzir eletricidade e água. (KENSKI, 2003).

O presente trabalho foi feito através de uma revisão bibliográfica de artigos científicos dos últimos anos. A investigação centra-se nas tendências e avanços nas tecnologias do hidrogênio, comparando-as com outras fontes de energia no contexto da

mobilidade sustentável. A pesquisa incluirá estudos publicados nos últimos vinte anos, abordando os métodos de produção, eficiência e viabilidade econômica do hidrogênio.

Uma das principais dificuldades do hidrogênio reside no seu transporte e armazenamento. No estado gasoso ocupa muito espaço e apresenta risco de vazamentos e explosões. No estado líquido é necessária grande quantidade de energia, pois deve ser mantido em alta pressão e a uma temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porém, novas técnicas estão sendo estudadas, como o armazenamento de hidrogênio e as nanofibras de grafite, que podem armazenar até 65% de sua massa em hidrogênio. Esta última abordagem vem sendo desenvolvida desde 1997 pela Northeastern University, nos Estados Unidos (NETO, 2013).

Além disso, os avanços tecnológicos e a inovação contínua são essenciais para a viabilidade econômica e operacional do hidrogênio verde. Países como a Austrália, a União Europeia, a Índia, o Canadá e os Estados Unidos têm liderado esforços para desenvolver a infraestrutura para a produção e distribuição de hidrogênio, promovendo a investigação e a implementação de eletrolisadores de alta eficiência alimentados por fontes renováveis, como a energia solar e a eólica. Tais esforços são essenciais para superar os desafios econômicos e técnicos, permitindo que o hidrogênio se torne uma parte central do cabaz energético global e contribua significativamente para a mitigação das alterações climáticas. Além disso, a criação de políticas públicas favoráveis e incentivos econômicos pode acelerar a transição para tecnologias de hidrogênio, promovendo um ambiente de inovação e investimento (Oxford Academic, 2023) (MDPI, 2023). O hidrogênio também pode proporcionar benefícios adicionais, como a redução da dependência de combustíveis fósseis e a promoção da segurança energética, garantindo assim um futuro mais sustentável e resiliente (MDPI, 2023) (IRENA, 2023).

Os objetivos deste estudo foram analisar a distância de sustentabilidade entre o hidrogênio e outros combustíveis, identificando os métodos mais eficientes para a produção e utilização de energia. Em particular, procuramos contextualizar a importância da transição para veículos mais sustentáveis, descobrir o potencial energético do hidrogênio, rever estudos recentes, comparar resultados e determinar os melhores métodos para a sua produção e utilização. Por fim, serão apresentadas conclusões sobre as principais descobertas e tendências, bem como sugestões para pesquisas futuras na área.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Assim como os compostos de carbono, o hidrogênio pode ser usado como combustível. O eletroquímico John Bockris foi o primeiro a declarar, em 1970, que o hidrogênio seria o combustível do futuro e que a economia mundial dependeria dele. Júlio Verne, em seu romance *A Ilha Misteriosa*, de 1874, também menciona o hidrogênio como o combustível do futuro (HINRICHS, 2010). O raciocínio por trás dessas afirmações e previsões é que, quando combinado com o oxigênio para formar água, o hidrogênio libera uma quantidade significativa de energia, conforme mostrado na Tabela 1.

Devido à sua leveza, o hidrogênio tem sido usado como combustível em missões a Saturno, que é destinados a chegar à Lua, e em naves espaciais, denominadas Ônibus Espaciais, para ignição e propulsão de foguetes (HINRICHS, 2010).

O hidrogênio foi descoberto em 1766 pelo físico-químico Henry Cavendish, que observou a formação de bolhas quando ácido era adicionado ao ferro. Essas bolhas queimaram e causaram explosões ao entrarem em contato com o ar, levando Cavendish a se referir a elas como "ar inflamável". Lavoisier nomeou posteriormente o elemento hidrogênio, derivado do latim "Hydrogenyum", que significa "formar água" em grego, pois as erupções produziram água (SIBLERUD, 2001).

O hidrogênio é um dos elementos mais abundantes na natureza e possui características únicas, diferentes de qualquer outro elemento químico conhecido, seja metálico ou não metálico. Constitui cerca de 76% da massa do universo e 93% dos átomos (ESTÊVÃO, 2008), embora raramente seja encontrado na sua forma pura (H_2), e geralmente está combinado com outros elementos como oxigênio, carbono, e nitrogênio (LAMEIRAS, 2019). O hidrogênio não pode ser considerado uma fonte de energia primária como os combustíveis fósseis ou nucleares, mas sim um importante vetor energético (SANTOS, 2004). Pode ser obtido a partir de fontes como energia solar, energia eólica, combustíveis fósseis (petróleo ou gás natural) ou energia nuclear, e pode ser armazenado como líquido, gás ou composto químico e depois convertido em energia para combustão em motores, fornalhas ou turbinas ou por processos eletroquímicos.

A implementação bem-sucedida do hidrogênio verde requer uma abordagem integrada que combine inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e investimentos estratégicos em infraestruturas. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2023), o hidrogênio desempenhará um papel fundamental na transição energética global, especialmente em setores difíceis de descarbonizar, como a indústria pesada, os transportes e a aviação. A cooperação internacional e o desenvolvimento de um mercado

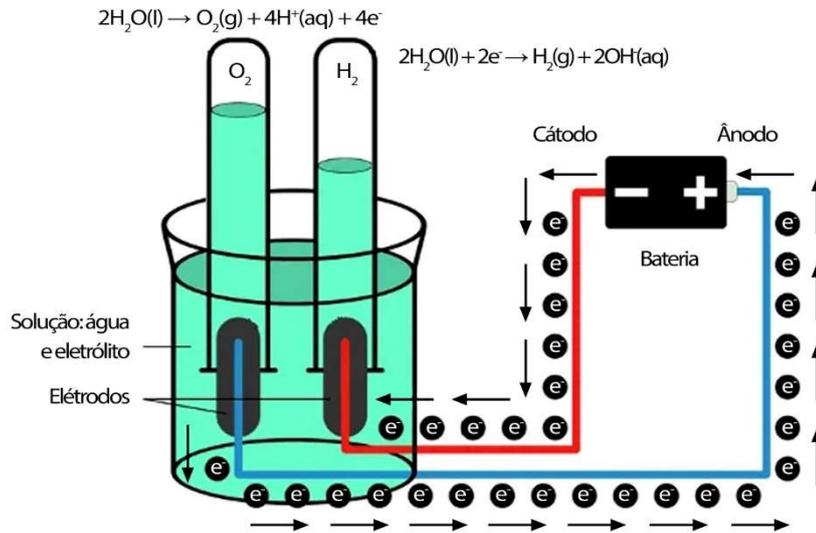
global de hidrogênio são essenciais para maximizar os benefícios desta tecnologia, garantindo que a produção e utilização de hidrogênio seja economicamente viável e ambientalmente sustentável. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias eficientes de armazenamento e transporte é essencial para o sucesso da integração do hidrogênio verde na matriz energética (MDPI, 2023) (IRENA, 2023). Finalmente, o envolvimento de várias partes interessadas, incluindo governos, indústria e sociedade civil, é essencial para criar um ecossistema robusto que apoie o crescimento e a adoção do MDPI em todo o mundo (IRENA, 2023).

2.1 ELETRÓLISE DA ÁGUA

Um dos métodos mais promissores e ecologicamente corretos para a produção de hidrogênio é a eletrólise da água, que utiliza eletricidade para separar os elementos que compõem a água, o oxigênio e o hidrogênio, alcançando uma eficiência de 95% (BAIRD, 2011).

A eletrólise da água pode ser realizada com eletricidade de diversas fontes renováveis, como energia eólica, solar, hidrelétrica e nuclear. Por exemplo, fábricas protótipo na Alemanha e na Arábia Saudita utilizam eletricidade proveniente da energia solar para produzir hidrogênio com uma eficiência de 7%. Nas usinas eólicas, hidrelétricas e nucleares, o excesso de energia elétrica, que não é consumido imediatamente, pode ser desviado para a produção de hidrogênio por eletrólise da água (BAIRD, 2011). Uma técnica promissora consiste no uso direto da energia solar para a eletrólise da água, utilizando dióxido de titânio (TiO_2) como fotocatalisador. O TiO_2 é estável quando exposto à luz solar e é relativamente acessível, mas na sua forma pura absorve apenas os raios UV. Quando misturado com carbono, a eficiência pode ser aumentada em mais de 8% da energia solar porque o carbono absorve radiação no espectro visível. Esse método produz hidrogênio com alto grau de pureza, embora ainda exija um aporte energético significativo (BAIRD, 2011).

Figura 1: Processo de formulação da eletrólise da água

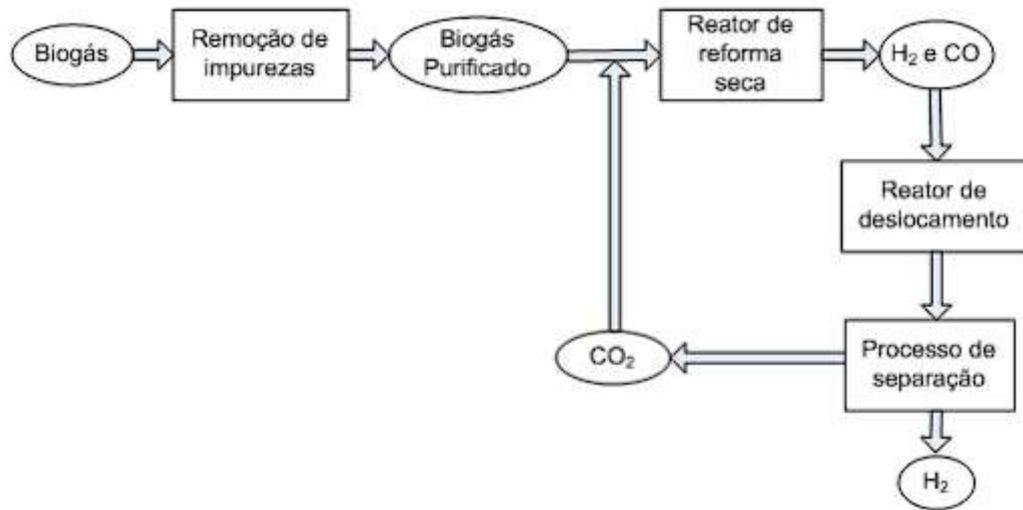


Fonte: Casa das ciências (2023).

2.2 REFORMA DOS HIDROCARBONETOS

Outra forma de produzir hidrogênio é reformar hidrocarbonetos, como o metano, principal componente do gás natural. A reforma a vapor é o método mais comum, no qual o metano reage com o vapor de água em alta temperatura para produzir hidrogênio e monóxido de carbono. A reação pode ser representada por: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$. Este método é amplamente utilizado devido à sua eficácia e custo relativamente baixo (SANTOS, 2013). No entanto, a produção de hidrogênio a partir de hidrocarbonetos ainda resulta na emissão de dióxido de carbono (CO_2), exigindo tecnologias adicionais de captura e armazenamento de carbono (CCs) para reduzir o seu impacto ambiental.

Figura 2: Reforma dos hidrocarbonetos

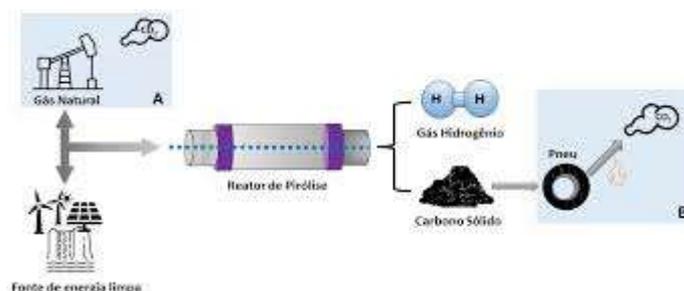


Fonte: Autor (2024).

2.3 GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

A gaseificação de biomassa é um processo no qual materiais orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais, são convertidos num gás rico em hidrogênio. A biomassa é aquecida em um ambiente com quantidade limitada de oxigênio, resultando na produção de gás de síntese (syngas), que contém hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O hidrogênio pode ser separado e purificado deste gás de síntese. Este método é considerado renovável e pode ajudar a reduzir resíduos e emissões de gases de efeito estufa (SANTOS, 2013).

Figura 3: Gaseificação de biomassa



Fonte: Embrapa (2022).

A alta densidade energética e a combustão limpa do hidrogênio, que produz apenas vapor d'água como subproduto, tornam-no uma opção ecologicamente correta para veículos de longa distância e condução de alta capacidade (SANTOS, 2013). Além disso, a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis pode reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. À medida que a infraestrutura do hidrogênio se expande e os custos de produção diminuem, o hidrogênio tem o potencial de impulsionar a transição para uma mobilidade mais sustentável, conforme destacado na introdução deste trabalho.

A inovação tecnológica contínua e as políticas facilitadoras serão essenciais para superar as barreiras atuais e promover a utilização generalizada do hidrogênio como combustível, ajudando a construir um futuro mais limpo e sustentável para todos.

A análise comparativa entre combustíveis comuns, como a gasolina, o gásóleo e o metano, e o hidrogênio revela diferenças substanciais em termos de eficiência energética, impacto ambiental e sustentabilidade econômica. A Tabela 1 mostra claramente que o hidrogênio tem o maior poder calorífico (141,86 kJ/g) em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais, como a gasolina (47,5 kJ/g) e o gásóleo (44,8 kJ/g). Essa superioridade energética do hidrogênio resulta em uma maior quantidade de energia liberada por unidade de massa, o que é uma vantagem significativa quando utilizado como combustível, especialmente em aplicações de alta demanda energética, como veículos pesados e aviões (SANTOS,2013).

Tabela 1: Poder calorífico dos combustíveis acima de 25 C° e abaixo dos 25C°;

Combustível	Poder Calorífico Superior (kJ/g)	Poder Calorífico Inferior (kJ/g)
Hidrogênio	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,60
Gasolina	47,50	44,50
Gasóleo	44,80	42,50
Metanol	19,96	18,05

Fonte: SANTOS (2008).

Além da eficiência energética, a queima de hidrogênio produz apenas vapor de água, eliminando as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes nocivos encontrados na queima de combustíveis fósseis. Esta característica torna o hidrogênio um combustível extremamente atrativo do ponto de vista ambiental, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a redução da poluição atmosférica (BAIRD, 2011).

2.4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA TRANSIÇÃO PARA O HIDROGÊNIO

A transição para o hidrogênio como combustível primário para a mobilidade enfrenta desafios significativos, incluindo a necessidade de infraestruturas adequadas para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio. Atualmente, a eletrólise da água e a reforma de hidrocarbonetos são as tecnologias mais viáveis para a produção de hidrogênio em grande escala, sendo a eletrólise particularmente promissora quando alimentada por fontes de energia renováveis, como a energia solar e a eólica.

Contudo, a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura e a eficiência ainda relativamente baixa dessas tecnologias constituem obstáculos a serem superados (SANTOS, 2013).

2.5 PROJEÇÃO FUTURA: MOBILIDADE SUSTENTÁVEL EM 50 ANOS

Projetando um cenário daqui a 50 anos, em que o hidrogênio substituirá completamente os combustíveis fósseis para a mobilidade, podemos prever transformações significativas no panorama energético e ambiental global. A adoção generalizada do hidrogênio como combustível poderá levar a uma redução drástica das emissões de gases com efeito de estufa, ajudando a cumprir os objetivos de mitigação das alterações climáticas estabelecidos em acordos internacionais como o Acordo de Paris. Impactos ambientais e de saúde Ao eliminar as emissões de CO₂, NOx e partículas provenientes da combustão de combustíveis fósseis, espera-se uma melhoria substancial na qualidade do ar nas zonas urbanas e industriais, conduzindo a benefícios diretos para a saúde pública. A redução dos poluentes atmosféricos reduzirá a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, melhorando assim a qualidade de vida da população mundial (HINRICHS, 2010).

2.6 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ECONÔMICOS

A crescente procura de hidrogênio incentivará o desenvolvimento e implementação de tecnologias mais eficientes e econômicas para a sua produção e armazenamento. A investigação em curso sobre células de combustível e novas técnicas de eletrólise, como a utilização de fotocatalisadores avançados, prometem aumentar a eficiência e a viabilidade econômica do hidrogênio.

Grandes montadoras como Toyota, Hyundai e Honda já estão investindo significativamente em veículos a hidrogênio e espera-se que essa tendência aumente, impulsionada por políticas governamentais de estímulo e avanços tecnológicos (BAIRD, 2011).

2.7 INFRAESTRUTURA E POLÍTICAS PÚBLICAS

O sucesso da transição para uma economia baseada no hidrogênio dependerá também da criação de uma infraestrutura robusta e abrangente para a produção, distribuição e fornecimento de hidrogênio. Políticas públicas favoráveis, incluindo subsídios, incentivos fiscais e investimentos em investigação e desenvolvimento, serão fundamentais para superar os desafios iniciais e acelerar a adoção do hidrogênio como combustível dominante

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo utiliza a revisão de literatura como principal método de pesquisa, que visa compilar, analisar e sintetizar o conhecimento existente sobre o uso do hidrogênio como combustível, suas vantagens, desafios e comparação com os combustíveis fósseis tradicionais. A revisão bibliográfica será feita de acordo com as seguintes etapas: Coleta de dados: A coleta de dados será realizada por meio de pesquisas sistemáticas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, incluindo Scopus, Web of Science, Google Scholar e IEEE Xplore. Os termos de pesquisa utilizados serão “hidrogênio como combustível”, “tecnologias de produção de hidrogênio”, “células de combustível de hidrogênio”, “comparação de combustível” e “mobilidade sustentável”. A busca concentra-se em artigos publicados nos últimos 20 anos para garantir a relevância e atualidade das informações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO HIDROGÊNIO VS. COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A análise dos dados recolhidos revela que o hidrogênio apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética comparativamente aos combustíveis fósseis tradicionais. O maior poder calorífico do hidrogênio é 141,86 kJ/g, enquanto o menor poder calorífico é 119,93 kJ/g, superando todos os combustíveis fósseis comuns como metano, propano, gasolina e diesel (SANTOS, 2008).

Esta elevada densidade energética torna o hidrogênio uma escolha muito eficaz para a geração de energia, especialmente em aplicações que requerem alta densidade energética, como a mobilidade.

4.2. IMPACTO AMBIENTAL

Um dos aspectos mais interessantes do hidrogênio como combustível é a sua capacidade de reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa. A queima de hidrogênio gera apenas vapor d'água como subproduto, eliminando emissões de CO₂, NO_x, SO_x e outros poluentes associados à queima de combustíveis fósseis (BAIRD, 2011).

A mudança para o hidrogênio, especialmente quando é produzido a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água com energia solar ou eólica, pode levar a uma redução quase total das emissões de carbono no setor dos transportes.

4.3. SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA

Atualmente, os custos de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio são significativamente superiores aos dos combustíveis fósseis. Porém, com os avanços nas tecnologias de produção, como a eletrólise com membranas de troca de prótons e a utilização de catalisadores mais eficientes, espera-se que esses custos diminuam significativamente (SANTOS, 2013). Além disso, o aumento da procura e a produção em grande escala ajudarão a reduzir custos, tornando o hidrogênio uma opção econômica viável no futuro.

4.4. DESAFIOS TECNOLÓGICOS

Os principais desafios tecnológicos na adoção do hidrogênio como combustível incluem o desenvolvimento de infra-estruturas de distribuição, armazenamento seguro e eficiente e a melhoria das tecnologias de células de combustível. O hidrogênio, no estado gasoso, ocupa grande volume e, no estado líquido, necessita de condições criogênicas para armazenamento, o que implica em alto custo energético (BAIRD, 2011). Porém, técnicas inovadoras como o armazenamento em hidretos metálicos e nanofibras de grafite oferecem soluções promissoras, com potencial para armazenar até 65% da massa em hidrogênio (NETO, 2013).

4.5. PREVISÕES FUTURISTAS

De hoje em diante, se houvesse uma transição completa para a utilização do hidrogênio como combustível em movimento, dentro de 50 anos os impactos seriam transformadores, como:

Reduzir as emissões de carbono: ao eliminar as emissões de CO₂ e outros poluentes, a qualidade do ar urbano seria significativamente melhorada, conduzindo a benefícios significativos para a saúde pública e a mitigação das alterações climáticas.

Desenvolvimento tecnológico: Esperam-se avanços significativos nas tecnologias de produção, armazenamento e utilização de hidrogênio. Serão incentivados mais investigação e desenvolvimento em células de combustível e métodos de produção eficientes, como a eletrólise solar direta, promovendo assim inovações tecnológicas.

Economia sustentável: A criação de uma economia baseada no hidrogênio, apoiada por políticas governamentais e investimentos em infraestruturas, pode gerar novas oportunidades de emprego e crescimento econômico sustentável. O desenvolvimento de uma cadeia de valor do hidrogênio, desde a produção até ao consumo final, reforçará a resiliência econômica global.

Mobilidade limpa: Com a adoção generalizada de veículos a hidrogênio, como os desenvolvidos pela Toyota (Mirai), Hyundai (Nexo) e Honda (Clarity Fuel Cell), a dependência de combustíveis fósseis seria reduzida, promovendo um transporte mais sustentável e mais eficiente (HINRICHS, 2010).

4.6. ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES DO USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL PARA OS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Este trabalho responde diretamente a diversos objetivos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). A seguir, serão discutidas as contribuições deste estudo em relação aos ODS, que sustentam a importância do hidrogênio como alternativa viável e sustentável para a mobilidade..

4.6.1 ODS 7: Energia acessível e limpa

O hidrogênio, quando produzido a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água com energia solar ou eólica, alinha-se perfeitamente com a meta 7.2 do ODS, que visa aumentar a participação das energias renováveis na matriz energética global. De acordo com o relatório da Agência Internacional de Energia (AIE), o hidrogênio verde tem o potencial de reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas ao setor energético, apoiando assim uma transição para um sistema energético mais limpo e sustentável (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2019). Este estudo explora este potencial, mostrando como o hidrogênio pode desempenhar um papel fundamental na diversificação da matriz energética e na redução da dependência dos combustíveis fósseis.

4.6.2 ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura

A modernização das infra-estruturas e a integração de tecnologias limpas são essenciais para a concretização do objetivo 9.4. O desenvolvimento de tecnologias para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio representa uma importante inovação que poderá transformar a indústria dos transportes. Um estudo de Staffell et al. (2019) indicam que a adoção do hidrogênio como combustível pode estimular o desenvolvimento de novas infraestruturas, como postos de abastecimento de hidrogênio e veículos com células de combustível, fomentando assim um ecossistema de inovação tecnológica.

4.6.3 ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis

O Objetivo 11.2 visa garantir o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis e sustentáveis para todos. A utilização do hidrogênio como combustível pode contribuir significativamente para a mobilidade urbana sustentável, reduzindo as emissões de poluentes e melhorando a qualidade do ar nas cidades. Estudos mostram que veículos movidos a hidrogênio emitem apenas vapor d'água, eliminando poluentes nocivos como óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas finas, comuns em veículos movidos a combustíveis fósseis (RAUCCI et al., 2015).

4.6.4 ODS 12: Consumo e Produção Responsáveis

O hidrogênio também está alinhado com a meta 12.2, que promove a gestão sustentável e a utilização eficiente dos recursos naturais. A produção de hidrogênio verde, através da eletrólise a partir de energias renováveis, representa uma forma eficiente de utilizar os recursos naturais sem os esgotar. Além disso, o hidrogênio pode ser produzido a partir de biomassa e resíduos orgânicos, contribuindo assim para um ciclo produtivo mais responsável e sustentável (GUTIÉRREZ-MARTÍN et al., 2010).

4.6.5 ODS 13: Ação Contra a Mudança Global do Clima

A mitigação das alterações climáticas é uma das principais motivações para mudar para o hidrogênio. O Objetivo 13.2 favorece a integração de medidas relacionadas com as alterações climáticas nas políticas e estratégias nacionais. De acordo com o Hydrogen Council (2020), a adoção do hidrogênio poderia evitar até 6 gigatoneladas de CO₂ por ano até 2050, tornando-o uma parte essencial das estratégias de descarbonização a longo prazo. Este trabalho demonstra como a implementação do hidrogênio como combustível pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, ajudando assim a alcançar as metas climáticas globais.

4.6.6 ODS 15: Vida Terrestre

A utilização de combustíveis limpos, como o hidrogênio, também pode ajudar a preservar o ecossistema terrestre, de acordo com a Meta 15.9. A redução da poluição do ar e da água, bem como a redução da extração de recursos fósseis, contribuem para a proteção da biodiversidade e dos habitats naturais. Estudos mostram que a mudança para combustíveis limpos pode reduzir os impactos negativos sobre a vida selvagem, promovendo assim a saúde dos ecossistemas terrestres (HOLLADAY et al., 2009)

5. CONCLUSÃO

O hidrogênio como combustível tornou-se uma alternativa revolucionária na busca por transportes sustentáveis. Destaca-se pela maior eficiência energética e menor impacto ambiental em comparação com os combustíveis fósseis tradicionais. O hidrogênio possui alto poder calorífico e a água é o único subproduto da combustão, o que acaba sendo uma opção limpa e eficiente (BAIRD, 2011; SANTOS, 2008).

Embora a transição para uma economia do hidrogênio enfrente desafios significativos, como os elevados custos de produção e a necessidade de uma infraestrutura robusta de armazenamento e distribuição, o caminho é promissor. Tecnologias emergentes, como a eletrólise por membrana de troca de prótons e o armazenamento de hidreto metálico, estão superando esses obstáculos (NETO, 2013).

Além disso, o desenvolvimento contínuo de métodos de produção de hidrogênio a partir de células a combustível e de fontes de energia renováveis, como o sol e o vento, contribuirá para a sustentabilidade econômica desta transição (SANTOS, 2013).

A adoção generalizada de veículos a hidrogênio, representados por modelos como o Toyota Mirai, o Hyundai Nexa e o Honda Clarity Fuel Cell, já está a começar a moldar um futuro de mudanças profundas na mobilidade. Estas iniciativas não apenas reduzem as emissões de gases de efeito estufa, mas também melhoram a qualidade do ar e promovem a saúde pública (HINRICHS, 2010). A eliminação das emissões de dióxido de carbono e de outros poluentes tradicionais reduzirá significativamente os efeitos das alterações climáticas e ajudará a criar um ambiente mais saudável e sustentável.

Considerando o futuro, uma mudança mundial para o uso do hidrogênio como combustível principal para mobilidade poderia fortalecer a economia global, promover o crescimento econômico sustentável e gerar novos empregos.. A criação de uma cadeia de valor do hidrogênio, apoiada por políticas governamentais e investimentos em infraestrutura, será essencial para esta transformação (LAMEIRAS, 2019) Determinar um número exato sem considerar as variáveis é um exercício simplista e não científico. No entanto, se especularmos de uma forma muito otimista e simplista, podemos imaginar que a eliminação completa dos combustíveis poluentes e a mudança para o hidrogênio como principal fonte de energia poderiam aumentar a vida global em 5 anos. Esta é uma estimativa arbitrária que não se baseia em evidências concretas, mas apenas numa suposição destinada a ilustrar um possível impacto positivo significativo.. Em suma, o hidrogênio oferece um futuro promissor para o transporte sustentável. Embora subsistam desafios significativos, os benefícios potenciais em termos de eficiência energética, redução de emissões e sustentabilidade econômica são evidentes. A inovação tecnológica

e a vontade política são essenciais para alcançar este futuro, que pode melhorar significativamente a qualidade de vida no mundo e proteger o ambiente para as gerações futuras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIRD, C. Química Ambiental. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. Disponível em: <
https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/559748/2/Livro%20Quimica_Ambiental.pdf>. Acesso em: 15 de abril de 2024

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. Energia e Meio Ambiente. 6ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2010. Disponível em: <
https://issuu.com/cengagebrasil/docs/9788522107148_energia-e-meio-ambiente>. Acesso em: 25 de abril de 2024

LAMEIRAS, F. S. Hidrogênio: fonte de energia do futuro? São Paulo: UNESP, 2019. Disponível em < <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746>>. Acesso em: 25 de maio de 2024

NETO, A. G. Nanofibras de grafite para armazenamento de hidrogênio. Journal of Energy Chemistry, v. 22, n. 5, p. 682-689, 2013. Disponível em < <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/14372/000664866.pdf>>. Acesso em: 25 de maio de 2024

SANTOS, A. M. Tecnologia do Hidrogênio: fundamentos e aplicações. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. Disponível em < https://portal.ifba.edu.br/lauro-de-freitas/menu-cursos/superior/bac-eng-energia/copy_of_EMENTAS_EngenhariadeEnergia_Janeiro_2019.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2024

SANTOS, A. M. Hidrogênio: energia e meio ambiente. 3ª ed. São Paulo: Interciência, 2008. Disponível em < <https://www.unisantos.br/wp-content/uploads/2016/09/ENERGIA-E-MEIO-AMBIENTE.pdf>>. Acesso em: 22 de junho de 2024

SIBLERUD, R. Lavoisier e a Revolução Química. Rio de Janeiro: Contraponto, 2001. Disponível em < <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=1782166>>. Acesso em: 24 de junho de 2024

BENEMANN, J. R. Hydrogen production from organic wastes. BioEnergy '96: The Seventh National Bioenergy Conference, Nashville, Tennessee, September 15-20, 1996. Disponível em < https://www.researchgate.net/publication/318431579_Biohydrogen_Production_from_Organic_Wastes>. Acesso em: 02 de junho de 2024

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. International Journal of Hydrogen Energy, 26(1), 13-28, 2001. Disponível em < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319900000586>>. Acesso em: 20 de abril de 2024

DE SÁ, L.; CAMAROTAN, R.; FERREIRA-LEITÃO, V. Produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 3(2), 35-45, 2014. Disponível em <<https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/download/4366/7682>>. Acesso em: 20 de junho de 2024

LEVIN, D. B.; PITT, L.; LOVE, M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(2), 173-185, 2004. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319903000946>>. Acesso em: 12 de abril de 2024

SANTOS, A. F.; PINTO, J. P. Energias Renováveis: Alternativas para um futuro sustentável. *Revista de Estudos Avançados*, 23(65), 103-117, 2009. Disponível em <<https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382/16539>>. Acesso em: 05 de junho de 2024

VARDAR-SCHARA, G.; MAEDA, T.; WOOD, T. K. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for enhanced hydrogen production. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(14), 4678-4688, 2008. Disponível em <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24615384/>>. Acesso em: 24 de maio de 2024

Alzamil, A., Alturki, M., & Abdallah, H. H. (2023). Integration of Renewable-Energy-Based Green Hydrogen into the Energy Future. *Processes*, 11(9), 2685. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11092685> Acesso em: 20 de maio de 2024

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Green hydrogen: a key enabler to broaden the potential of renewable power solutions in hard-to-abate sectors. Disponível em: <https://www.irena.org/green-hydrogen> Acesso em: 27 de maio de 2024

OUP Academic. (2023). Green hydrogen energy production: current status and potential. Acesso em: 16 de maio de 2024

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 27 jun. 2024.

GUTIÉRREZ-MARTÍN, F. et al. Hydrogen production from biomass and waste materials. *Renewable Energy*, v. 35, n. 8, p. 1841-1849, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004749>. Acesso em: 27 jun. 2024.

HOLLADAY, J. D. et al. Hydrogen from renewable resources: Pathways to green hydrogen. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 20, n. 3, p. 264-271, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095816690900043X>. Acesso em: 27 jun. 2024.

HYDROGEN COUNCIL. Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective. 2020. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>. Acesso em: 27 jun. 2024.

RAUCCI, C. et al. Hydrogen fuel cells: The future for cleaner transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 40, n. 10, p. 3380-3390, 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915001121>. Acesso em: 27 jun. 2024.

STAFFELL, I. et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, v. 12, n. 2, p. 463-491, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e>. Acesso em: 27 jun. 2024.