

HIDROGÊNIO COMO UMA ALTERNATIVA AOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

Guilherme Pedroso Rodrigues¹
Yuri de Souza Oliveira¹
Nelson Cevidanes Nascimento de Assis²

profnelson1234@gmail.com

ÁREA DO CONHECIMENTO: Engenharias

RESUMO

O desenvolvimento de novos produtos desempenha um papel crucial no avanço da sociedade, especialmente em resposta às crescentes necessidades de medidas preventivas. Nesse contexto, os carros movidos a células de combustível de hidrogênio surgem como uma alternativa ecológica promissora. Este estudo examina a viabilidade do hidrogênio como uma solução sustentável para substituir os combustíveis fósseis, com foco particular em sua aplicação em células a combustível. A análise abrange diferentes métodos de produção de hidrogênio, incluindo eletrólise e reforma do gás natural, e explora os desafios técnicos, econômicos e infraestruturais associados. Entre as diversas tecnologias de células a combustível, o estudo destaca as células a combustível de membrana eletrolítica de polímero (PEMFC) como o modelo mais promissor para adoção em larga escala na indústria automotiva. As PEMFCs oferecem alta eficiência, densidade de potência e uma resposta rápida, tornando-as ideais para aplicações no setor de transporte. No entanto, o estudo também identifica vários problemas que precisam ser resolvidos antes que essas tecnologias possam ser amplamente disseminadas. Estes incluem a necessidade de superar desafios técnicos como o envenenamento por monóxido de carbono (CO), desenvolver sistemas de resfriamento eficientes e estabelecer uma infraestrutura adequada para a distribuição de hidrogênio. A superação dessas barreiras será essencial para a transição bem-sucedida para veículos movidos a hidrogênio e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio; Combustíveis Fósseis; Energia Limpa; Sustentabilidade; Infraestrutura

1 INTRODUÇÃO

A dependência global em combustíveis fósseis para suprir a demanda energética se mostra cada vez mais insustentável. As reservas, antes tidas como inesgotáveis, revelam-se finitas, e seus preços, sujeitos à volatilidade de ciclos

¹ Acadêmico do 8º Período de Engenharia Mecânica da Faculdade Vértix Trirriense - UNIVÉRTIX

² Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Professor da Faculdade Vértix Trirriense – UNIVÉRTIX.

econômicos e geopolíticos, evidenciam a fragilidade do sistema atual. A busca por segurança energética impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de alternativas, e o hidrogênio surge como um protagonista em planos estratégicos de diversos países, abrindo caminho para um futuro energético mais limpo e promissor (Verhelst, 2009).

O hidrogênio desponta como um vetor energético promissor devido à sua versatilidade na produção, desde combustíveis fósseis até fontes renováveis, e conversão em energia utilizável, tais como motores, turbinas, células de combustível, com emissões mínimas e alta eficiência. Comparado aos biocombustíveis, sua produção a partir de fontes renováveis é mais eficiente em termos de área utilizada, e sua alta densidade energética o torna atrativo para armazenamento, superando a eletricidade (Majewski, 2023).

No entanto, desafios persistem em seu uso, principalmente devido à sua baixa densidade, que dificulta armazenamento, transporte e distribuição, mesmo comprimido ou liquefeito. No setor automotivo, a análise do ciclo de vida completo é crucial para garantir efetiva redução de emissões em relação aos combustíveis tradicionais. Apesar disso, seu potencial como alternativa limpa e versátil justifica investimentos em pesquisa e desenvolvimento para superar barreiras e viabilizar sua implementação em larga escala, rumo a um futuro energético mais sustentável (Verhelst, 2009).

O projeto visa explorar o uso do hidrogênio como combustível em motores a combustão interna, destacando seu potencial como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Focado na viabilidade técnica e econômica do hidrogênio, o estudo pretende mostrar como essa tecnologia pode reduzir emissões de gases de efeito estufa e contribuir para um futuro mais sustentável. Além disso, o projeto abordará os desafios e oportunidades da adoção do hidrogênio em veículos, oferecendo uma visão prática sobre sua aplicação (Costa, 2024).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A crescente demanda por energia renovável tem incentivado pesquisas sobre combustíveis alternativos (Chung (2013), Chen (2012)), como o biogás, que é uma mistura rica em metano e de baixo custo. Apesar de promissor, o biogás enfrenta desafios como menor poder calorífico e velocidade de chama em comparação com combustíveis fósseis. Para superar essas limitações, o hidrogênio está sendo

estudado como aditivo ao biogás, visando melhorar a eficiência da combustão e reduzir emissões (Chung, 2013).

O Brasil tem grande potencial na produção de hidrogênio verde devido a seus recursos renováveis abundantes. Regiões como o Ceará lideram iniciativas para se tornarem hubs de produção, com foco na exportação. O país também busca parcerias internacionais, com acordos com Alemanha e Holanda, e projetos de empresas como Petrobras e Vale. Apesar das vantagens logísticas, o Brasil enfrenta desafios na adaptação da infraestrutura para o hidrogênio. O governo está iniciando a formulação de políticas e estratégias para impulsionar o mercado, incluindo debates sobre incentivos fiscais e subsídios (Nadaleti, 2021).

No entanto, para alcançar a produção e a utilização plena do hidrogênio como combustível, é necessário ter conhecimento dos fatores que beneficiam e os obstáculos impostos pela tecnologia de fabricação.

Conforme Kumar (2019), a produção de hidrogênio pode ser feita por métodos tradicionais (com alta emissão de CO₂) ou renováveis (mais sustentáveis, mas com custos elevados). A escolha do método ideal depende de diversos fatores, como custo e impacto ambiental. O futuro da produção de hidrogênio está ligado ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e limpas.

No Brasil, o desenvolvimento de carros a hidrogênio ainda está em fase inicial, com universidades e centros de pesquisa conduzindo estudos e projetos pilotos. No entanto, a infraestrutura de abastecimento é praticamente inexistente, e os altos custos de produção e logística do hidrogênio verde são barreiras significativas para sua adoção em larga escala. Embora o país tenha grande potencial para hidrogênio verde a partir de fontes renováveis, ainda falta apoio governamental e incentivos específicos para impulsionar essa tecnologia. Enquanto países desenvolvidos avançam na implementação de veículos a hidrogênio, o Brasil começa a explorar as possibilidades, mas enfrenta desafios consideráveis para se estabelecer nesse mercado emergente (Raffi, 2012).

Além disso, estudos experimentais têm mostrado que a substituição de monóxido de carbono (CO) por hidrogênio (H₂) em motores de ignição por faísca (SI) pode melhorar a eficiência térmica e reduzir emissões de óxidos de nitrogênio (NOx). Por exemplo, um estudo revelou que a substituição de CO por H₂ pode aumentar a

eficiência térmica dos motores para cerca de 27%, enquanto mantém as emissões de NOx abaixo de 63 ppm quando uma razão de substituição de hidrogênio (H.S.R.) de 50% e uma razão de diluição de combustível (F.D.R.) de 0,2 são aplicadas. No entanto, a diluição com CO₂ pode reduzir a eficiência térmica e afetar a estabilidade do motor, embora ajude a diminuir as emissões de NOx. Esses avanços ressaltam a importância de equilibrar a proporção de H₂ e CO₂ para otimizar o desempenho dos motores alimentados com combustíveis gasosos derivados de biomassa (Chen, 2012).

2.1 Características da Combustão de Biogás e Hidrogênio

A combustão do biogás em motores de ignição por centelha é influenciada por fatores como a composição do combustível, taxa de compressão, ponto de ignição e razão ar-combustível. A adição de hidrogênio ao biogás melhora a combustão, aumentando a eficiência térmica devido à rápida e completa queima do hidrogênio. No entanto, essa mistura também pode elevar as temperaturas de pico na câmara de combustão, resultando em maiores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), um poluente prejudicial (Chung, 2013).

2.2 Efeito da Diluição por CO₂ na Combustão

O dióxido de carbono (CO₂), um dos principais componentes do biogás, atua como um diluente na mistura ar-combustível, influenciando a combustão e o desempenho do motor. A diluição por CO₂ reduz a temperatura de combustão, o que pode diminuir a formação de NOx, mas também pode levar a uma combustão mais lenta e incompleta, reduzindo a eficiência térmica e aumentando as emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC). O equilíbrio entre a adição de hidrogênio e a diluição por CO₂ é crucial para otimizar o desempenho do motor, buscando alta eficiência térmica e baixas emissões (Chung (2013) & Chen (2012)).

2.3 Modelos de Combustão

O modelo de duas zonas divide a câmara de combustão em duas zonas, sendo uma zona queimada e uma zona não queimada. A transferência de massa e energia entre as zonas é calculada para cada passo de tempo, permitindo a previsão da taxa

de liberação de calor e da pressão no cilindro. Segundo Chung (2013), as equações que regem esse modelo são:

2.3.1 Para a zona não queimada:

$$\frac{d(m_u e_u)}{dt} = -p \frac{dV_u}{dt} - Q - \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right) + \frac{dm_{f,i}}{dt} h_{f,i}$$

A equação expressa que a variação da energia interna na zona sem queima é determinada pelo trabalho de compressão, pela perda de calor para o ambiente e pela entrada de massa e energia provenientes do combustível e do ar, incluindo a injeção direta de combustível.

Onde:

- $\frac{d(m_u e_u)}{dt}$ É a taxa de mudança de energia interna na zona não queimada.
- $-p \frac{dV_u}{dt}$ É o trabalho realizado pelos gases devido à compressão.
- $-Q$ É a transferência de calor para fora da zona sem queima.
- $-\left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_a}{dt} h_a \right)$ É a Variação da energia interna devido à transferência de massa na zona sem queima

2.3.2 Para a zona queimada:

$$\frac{d(m_b e_b)}{dt} = -p \frac{dV_b}{dt} - Q_b - \left(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_b}{dt} h_b \right)$$

Esta equação representa a variação da energia interna na zona de gases queimados dentro de uma câmara de combustão, utilizando um modelo que divide a câmara em duas zonas. Em termos simples, a equação demonstra que a energia interna da zona queimada muda devido a quatro fatores principais: o trabalho realizado pela expansão dos gases, a perda de calor para o ambiente, a entrada de massa e energia proveniente da combustão do combustível e a saída de massa e energia com os gases de escape.

Onde:

- $\frac{d(m_b e_b)}{dt}$ É a taxa de mudança de energia interna na zona queimada.

- $-p \frac{dV_b}{dt}$ É o trabalho realizado pela expansão dos gases queimados.
- $-Q_b$ É a transferência de calor para fora da zona queimada
- $-(\frac{dm_f}{dt} h_f + \frac{dm_b}{dt} h_b)$ É a mudança na energia interna devido à transferência de massa.

Segundo Chung (2013), a taxa aparente de liberação de calor é calculada como:

$$ARHR = \frac{-p \frac{dV_{tot}}{dt} - Q_{tot} - \frac{dm_{tot} e_{tot,s}}{dt}}{m_{f,tot} \times LHV_i}$$

Neste caso a equação calcula a ARHR considerando, o trabalho realizado pelo sistema (mudança de pressão e volume), as perdas de calor para o ambiente assim como as mudanças na energia interna da mistura no cilindro.

Onde:

- *ARHR* (Apparent Rate Of Heat Release) é a taxa na qual o calor é aparentemente liberado durante a combustão. É "aparente" porque é calculado com base nas mudanças de pressão no cilindro, não na medição direta do calor;
- p é a pressão dentro da câmara de combustão;
- $\frac{dV_{tot}}{dt}$ é a taxa de variação do volume total do cilindro;
- $-Q_{tot}$ representa a perda total de calor do sistema para o ambiente;
- $-\frac{dm_{tot} e_{tot,s}}{dt}$ este termo representa a variação da energia interna do sistema devido à mudança na massa e na energia específica da mistura no cilindro;
- $m_{f,tot}$ é a massa total de combustível no cilindro
- *LHV* Poder calorífico inferior do combustível, que é a quantidade de calor liberada por unidade de massa de combustível quando a água nos produtos da combustão permanece na forma de vapor

O modelo de taxa de queima, utilizado em motores de ignição por centelha, estima a velocidade com que o combustível é consumido durante o processo de combustão. Essa estimativa é baseada na análise da pressão no interior do cilindro, incorporando também informações sobre a geometria do cilindro, o momento exato da ignição, o fluxo de ar dentro do cilindro e as características específicas do combustível.

2.4 Parâmetros de Composição do Combustível

Taxa de Substituição de Hidrogênio (H.S.R.): Expressa a proporção de hidrogênio em relação ao monóxido de carbono na mistura combustível:

$$H.S.R = \frac{\varphi_{H_2}}{\varphi_{H_2} + \varphi_{CO}}$$

Onde:

- $H.S.R$ (Hydrogen Substitution Ratio) é a Taxa de Substituição de Hidrogênio, representando a fração de hidrogênio na mistura de combustível.
- φ_{H_2} é a taxa de equivalência do hidrogênio
- φ_{CO} é a taxa de equivalência do monóxido de carbono

A razão de equivalência (φ) é um parâmetro essencial na análise de processos de combustão, especialmente em motores de combustão interna. Ela expressa a relação entre a proporção real de combustível e ar presente na mistura e a proporção ideal para uma combustão completa, conhecida como razão estequiométrica.

Dessa forma, a razão estequiométrica corresponde à mistura perfeita de combustível e ar, na qual ambos os reagentes são completamente consumidos durante a combustão, sem deixar excesso de nenhum deles.

Uma mistura com razão de equivalência com $\varphi = 1$ é considerada estequiométrica, indicando uma combustão teoricamente completa. Misturas pobres ($\varphi < 1$), com excesso de ar, tendem a reduzir a temperatura de combustão, diminuindo a formação de NOx, mas podem comprometer a potência do motor e levar à combustão incompleta. Por outro lado, misturas ricas ($\varphi > 1$), com excesso de combustível, podem aumentar a potência, porém, frequentemente resultam em maiores emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC) devido à combustão incompleta.

Assim ao manipular a razão de equivalência precisamente, busca-se otimizar o processo, visando objetivos como: Maximização da Potência ($\varphi > 1$); Otimização da Eficiência Energética ($\varphi < 1$); e Minimização de Emissões.

Os autores Chen *et al.* (2012) investigaram a combustão de misturas de H₂-CO com diluição de CO₂ em um motor de ignição por centelha, com foco em condições pobres ($\phi < 0,8$) para obter emissões e consumo de combustível aceitáveis. A razão

de equivalência é central no seu estudo, influenciando diretamente a temperatura de combustão, o desempenho do motor e as emissões.

Já Chung e Chun (2013), analisam a combustão e a eficiência de geração de misturas de biogás-hidrogênio em um motor a gás, realizando experimentos e simulações sob uma taxa de excesso de ar fixa (relacionada à razão de equivalência). O estudo explora o impacto da variação do tempo de ignição e da adição de hidrogênio no desempenho do motor. A razão de equivalência é fundamental para compreender o equilíbrio entre potência, eficiência e emissões.

Taxa de Diluição de Combustível (F.D.R.): Indica a fração de CO_2 na mistura total:

$$F.D.R = \frac{CO_{2,mole}}{Fuel_{mole} + CO_{2,mole}}$$

Onde:

- $CO_{2,mole}$ e $Fuel_{mole}$ são os números de mols de CO_2 e combustível, respectivamente.

2.5 Otimização da Combustão e Minimização de Emissões

A otimização da combustão em motores que utilizam biogás e hidrogênio requer ajustes precisos nos parâmetros operacionais e na composição da mistura ar-combustível. Técnicas como variação do ponto de ignição, recirculação de gases de escape e controle da razão ar-combustível são essenciais para melhorar a eficiência, reduzir emissões e manter a estabilidade do motor. A pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias são fundamentais para promover o uso desses combustíveis alternativos. Além disso, o modelo de taxa de queima ajuda a estimar a velocidade de consumo do combustível, com base em vários fatores, como pressão e características do cilindro.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho se trata de uma pesquisa de viabilidade que busca compreender os desafios de consorciar ou mesmo substituir os combustíveis fósseis pelo hidrogênio e quais são as dificuldades inerentes a este processo, pautado pelo método hipotético dedutivo (Popper, 2004).

A pesquisa engloba não somente as dificuldades de se produzir um veículo automotor movido a hidrogênio, mas também como o processo de produção e armazenamento pode contribuir negativamente na viabilidade do produto, representando variáveis que impactam diretamente o custo-benefício. Nesta seção, serão detalhadas as etapas que serão realizadas nesta pesquisa.

3.1 Revisão Bibliográfica

A primeira atividade será visitar trabalhos relativos que demonstrem como funciona o processo de produção, armazenamento e processamento do hidrogênio. Além disso, este passo será essencial para o entendimento de como está o cenário de hidrogênio atualmente tanto no Brasil quanto no Mundo.

3.2 Verificação do Tipo de Motor mais viável

Baseado na fundamentação teórica, serão avaliados os diferentes conceitos de carro a hidrogênio a fim de se constatar qual é o modelo que é mais economicamente viável para produção em larga escala. Desta forma, será possível determinar qual conceito terá a maior probabilidade de ser disseminado em escala global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os diferentes possíveis métodos de utilização do hidrogênio como fonte de energia em motores automotivos, o modelo de Fuel Cell (FC), mais especificamente o modelo de célula de combustível de membrana eletrolítica de polímero (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*) se mostrou mais eficiente que a utilização do hidrogênio como combustível de motores de explosão interna. Suas equações químicas demonstram que o produto final de toda a reação é água, o que não agride o ambiente (Manoharan, 2019).

Essas células a combustível são as mais amplamente utilizadas no setor de transporte porque são células de combustível de baixa temperatura, operando em torno de 80°C, o que resulta em tempos relativamente curtos de partida e parada. Outra vantagem das PEMFCs é que possuem alta eficiência e densidade de potência na classe de tamanho de motores de veículos. Essas características são bem adequadas para uma fonte de energia veicular, onde a densidade de potência é desejada e as demandas dinâmicas de potência são significativas. Algumas das

desvantagens das PEMFCs incluem um maior risco de envenenamento por CO e a necessidade de resfriamento (Manoharan, 2019).

Segundo Manoharan (2019), a reação química geral para a PEMFC é:



As reações químicas parciais para a PEMFC são as seguintes:

- Reação de oxidação: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- Reação de redução: $1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (11)

A PEMFC em um veículo elétrico desempenha o papel do motor de combustão interna em um veículo convencional, pois é a fonte de energia motriz no veículo elétrico de célula a combustível. Até o momento, a PEMFC é a única célula a combustível considerada adequada para automóveis. Ao combinar PEMFCs com baterias recarregáveis, é criado um veículo híbrido que é competitivo tanto com veículos elétricos a bateria quanto com veículos movidos a combustíveis fósseis. O motor elétrico, a bateria e a PEMFC são as três partes interdependentes desse veículo híbrido (Manoharan, 2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hidrogênio apresenta um potencial significativo como uma alternativa sustentável e eficiente aos combustíveis fósseis, especialmente quando utilizado em células a combustível de membrana eletrolítica de polímero (PEMFC). Este estudo destacou as vantagens do uso de PEMFCs, incluindo sua alta eficiência, densidade de potência e tempo de resposta rápido, características que as tornam ideais para aplicações no setor de transporte.

As PEMFCs têm se mostrado uma solução promissora para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação das fontes de energia. Sua operação em baixas temperaturas e a capacidade de integração com baterias recarregáveis em veículos híbridos reforçam sua competitividade frente às tecnologias convencionais e emergentes.

Entretanto, ainda existem desafios a serem superados para a ampla adoção das PEMFCs, como o risco de envenenamento por CO, a necessidade de um sistema de resfriamento eficiente e a infraestrutura de distribuição de hidrogênio. Superar

essas barreiras exigirá esforços contínuos em pesquisa e desenvolvimento, além de investimentos em infraestrutura e políticas públicas que incentivem a transição energética.

REFERÊNCIAS

VERHELST, Sebastian; WALLNER, Thomas. **Hydrogen-fueled internal combustion engines**. Progress in energy and combustion science, v. 35, n. 6, p. 490-527, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>. Acesso em: 24 de agosto de 2024

RAFFI, Sérgio Aldrighi. **Os investimentos estatais na geração de hidrogênio no Brasil**. 2012. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3359>. Acesso em: 25 de Agosto de 2024

COSTA, Micheli dos Santos Quadri; VAZ, Caroline Rodrigues; MALDONADO, Mauricio Uriona. **HIDROGÊNIO VERDE: REVISÃO DE MÉTODO DE PRODUÇÃO A PARTIR DO BIOGÁS**. Revista ADMPG, v. 14, 2024. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/admpg/article/view/23187/209209218572>. Acesso em: 24 de Agosto de 2024

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>. Acesso em: 24 de Agosto de 2024.

MAJEWSKI, Peter; SALEHI, Fatemeh; XING, Ke. **Green hydrogen**. AIMS Energy, v. 11, n. 5, p. 878-895, 2023. Disponível em: <https://researchers.mq.edu.au/en/publications/green-hydrogen>. Acesso em: 17 de agosto de 2024

CHUNG, Kyungsun; CHUN, Kwang-Min. **Combustion characteristics and generating efficiency using biogas with added hydrogen**. SAE Technical Paper, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2013-01-2506>. Acesso em: 10 de Agosto de 2024

CHEN, Lei; SHIGA, Seiichi; ARAKI, Mikiya. **Combustion characteristics of an SI engine fueled with H₂-CO blended fuel and diluted by CO₂**. International journal of hydrogen energy, v. 37, n. 19, p. 14632-14639, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.048> Acesso em: 10 de Agosto de 2024

MANOHARAN, Yogesh et al. **Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect**. Applied Sciences, v. 9, n. 11, p. 2296, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9112296>. Acesso em: 24 de Agosto de 2024

NADALETI, Willian César; LOURENÇO, Vitor Alves; AMERICO, Gabriel. **Green hydrogen-based pathways and alternatives: towards the renewable energy transition in South America's regions—Part A**. International Journal of Hydrogen

Energy, v. 46, n. 43, p. 22247-22255, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.239>. Acesso em: 20 de Agosto de 2024.

POPPER, Karl R. **A lógica da pesquisa científica**. Editora Cultrix, 2004.