



Motores a hidrogênio para veículos: tecnologia, estágio atual e limitações

Alvaro Eduardo do Amaral Menezes Junior, Álvaro Davi Silva de Lima², Samuel Vasconcelos Azevedo², Abner Felipe dos Reis Silva²

¹Instituto Federal de Brasília, Brasília, Brasil (alvaro.eduardo@ifb.edu.br)

² Instituto Federal de Brasília, Brasília, Brasil

Resumo: O hidrogênio é alternativa para descarbonizar o transporte por duas rotas: células a combustível (FCEV) e motores de combustão interna (H2ICE). Apresentam-se princípios, vantagens, a questão das emissões de NOx e estratégias para controlá-las. A tecnologia é promissora, mas limitada por custo, infraestrutura e armazenamento, sendo mais viável no transporte pesado e complementar — não substituta — dos veículos elétricos a bateria.

Palavras-chave: Hidrogênio; células a combustível; motores de combustão interna;

INTRODUÇÃO

O hidrogênio tem sido discutido como uma das alternativas para a descarbonização do setor de transportes, especialmente em aplicações nas quais a eletrificação direta por baterias apresenta limitações relacionadas à massa, ao tempo de recarga, à autonomia ou à operação contínua. No contexto veicular, é importante diferenciar dois caminhos tecnológicos para o uso do hidrogênio: os veículos elétricos a célula a combustível, conhecidos como FCEV, e os motores de combustão interna alimentados por hidrogênio, chamados de H2ICE. Embora ambos utilizem hidrogênio, o princípio de funcionamento é diferente. Nos FCEV, o hidrogênio reage eletroquimicamente com o oxigênio em uma célula a combustível, gerando eletricidade para acionar motores elétricos. Já nos H2ICE, o hidrogênio é queimado dentro da câmara de combustão de um motor semelhante aos motores convencionais, com adaptações no sistema de alimentação, ignição, controle eletrônico, arrefecimento e tratamento de emissões (EPE, 2021) (GRIGORIADIS; SILVA, 2022).

DISCUSSÃO

Nos veículos a célula a combustível, o sistema se aproxima de um veículo elétrico, mas a eletricidade é gerada a bordo a partir do hidrogênio armazenado em cilindros pressurizados. A principal vantagem é a ausência de emissões diretas de dióxido de carbono no escapamento, sendo a água praticamente a única emissão. Essa característica torna a célula a combustível uma opção tecnicamente atraente para ônibus, caminhões, veículos comerciais e aplicações de longa distância, nas quais autonomia e tempo de

reabastecimento são fatores relevantes. Entretanto, o custo das células a combustível, a durabilidade de componentes, a necessidade de hidrogênio com alta pureza e a ausência de infraestrutura ampla de abastecimento ainda limitam sua adoção em escala (OLIVEIRA, 2022).

A segunda possibilidade, o motor de combustão interna a hidrogênio, tem despertado interesse porque permite aproveitar parte do conhecimento acumulado pela indústria automotiva em motores, sistemas de injeção, turbocompressores, lubrificação, arrefecimento e pós-tratamento. Em termos conceituais, o hidrogênio possui alta velocidade de chama, ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia mínima de ignição. Essas propriedades favorecem a combustão rápida e a operação com misturas pobres, o que pode contribuir para maior eficiência térmica. Como o hidrogênio não contém carbono, sua combustão não gera dióxido de carbono, à exceção de traços oriundos do óleo lubrificante. Apresenta, contudo, como ponto negativo, a possibilidade de emissão de óxidos de nitrogênio (NOx), especialmente em condições de alta temperatura na câmara de combustão (GRIGORIADIS; SILVA, 2022) (CRUZ, 2023).

Do ponto de vista técnico, o H2ICE exige modificações relevantes em relação aos motores a gasolina, etanol ou diesel. Entre elas estão o uso de materiais compatíveis com o hidrogênio, sistemas de armazenamento sob alta pressão, injeção gasosa ou direta, controle preciso da mistura ar-combustível, prevenção de pré-ignição e retrocesso de chama, além de calibrações específicas para reduzir NOx. A operação com mistura pobre, recirculação de gases de escape, injeção direta e estratégias híbridas podem reduzir parte desses problemas. Assim, o motor a hidrogênio não deve ser visto apenas como uma



simples conversão de motores existentes, mas como uma arquitetura que exige desenvolvimento próprio para alcançar eficiência, segurança e baixa emissão (CRUZ, 2023).

A geração de NOx ocorre porque o hidrogênio é queimado com o ar atmosférico, que contém grande quantidade de nitrogênio; em temperaturas elevadas, parte desse nitrogênio reage com o oxigênio e forma NOx. Essa limitação também ocorre em motores Otto e Diesel. Assim estratégias já utilizadas nesses sistemas podem ser adaptadas ao H2ICE, como recirculação dos gases de escape (EGR), controle da mistura ar-combustível, atraso ou ajuste do ponto de ignição, operação com mistura pobre, uso de intercooler em motores sobrealimentados, e sistemas de pós-tratamento. Na operação com mistura pobre típica do hidrogênio, contudo, o catalisador de três vias é pouco eficaz para o NOx, sendo a redução catalítica seletiva (SCR, com ARLA 32) o pós-tratamento mais indicado.

Trabalhos sobre combustão a hidrogênio indicam que a formação de NOx é uma das principais limitações ambientais dessa tecnologia, mas também apontam a EGR como uma solução técnica aplicável para reduzir essas emissões. Dessa forma, o controle de NOx em motores a hidrogênio é tecnicamente viável, mas exige desenvolvimento específico de calibração, injeção, arrefecimento e pós-tratamento, voltados às particularidades da combustão do hidrogênio. (CRUZ, 2023; GRIGORIADIS; SILVA, 2022).

CONCLUSÃO

Em síntese, os motores e veículos a hidrogênio representam uma tecnologia promissora, mas ainda não estão em estágio de massificação para veículos leves no Brasil. O cenário mais provável no curto e médio prazo é a adoção em projetos-piloto, nas quais o tempo de abastecimento e a autonomia sejam mais importantes do que a eficiência energética total. Para uso em larga escala, ainda será necessário reduzir o custo do hidrogênio de baixa emissão, expandir a infraestrutura de abastecimento, consolidar normas de segurança, desenvolver fornecedores nacionais e definir políticas públicas estáveis (EPE, 2025) (OLIVEIRA, 2022). Assim, o hidrogênio deve ser entendido não como substituto universal do processo de descarbonização, mas como uma rota complementar dentro de uma matriz tecnológica mais ampla de descarbonização dos transportes.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Brasília (IFB)

REFERÊNCIAS

CRUZ, P. A. M. V. Produção de NOx pela combustão de hidrogênio em motores de ciclo

Otto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Instituto Politécnico do Porto, 2023.

EPE. Análise da viabilidade de tecnologias alternativas para veículos rodoviários de carga. Nota Técnica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2025a.

GRIGORIADIS, A. B.; SILVA, P. A. Análise da utilização do hidrogênio como combustível em veículos leves no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, R. C. Panorama do hidrogênio no Brasil. Texto para Discussão n. 2787. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022.