

PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO BRASILEIRO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.X-001>

César Antônio de Abreu Araújo, Carlos Fernando Lemos (*)
Universidade Federal de Viçosa/Campus Florestal - MG – fernando.lemos@ufv.br

RESUMO

O presente trabalho analisa as perspectivas e os desafios para a implantação do hidrogênio verde (H₂V) no setor de transporte rodoviário brasileiro. A crescente demanda global por soluções energéticas sustentáveis, conivente à necessidade de descarbonização da matriz energética, incita a propensão pelo H₂V como vetor estratégico. A pesquisa é de natureza qualitativa e descritiva, realizada por meio de revisão bibliográfica, abordando temáticas como panorama atual da dependência de combustíveis fósseis até projetos nacionais em desenvolvimento, além de aspectos técnicos, logísticos, econômicos e regulatórios. Os resultados indicam que o Brasil apresenta vantagens competitivas importantes, como sua matriz elétrica majoritariamente renovável e grande disponibilidade de recursos naturais. No entanto, a estabilização do hidrogênio verde como alternativa viável requer políticas públicas eficientes, incentivos econômicos, desenvolvimento tecnológico e investimentos em infraestrutura.

Palavras-chave: hidrogênio verde; transporte rodoviário; sustentabilidade; descarbonização; matriz elétrica.

INTRODUÇÃO

A busca por alternativas energéticas sustentáveis têm se intensificado diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o hidrogênio verde alvorece como uma solução viável e estratégica para promover a descarbonização, especialmente no setor de transporte rodoviário, um dos mais dependentes de combustíveis fósseis (IEA, 2019).

Este trabalho propõe uma reflexão sobre as perspectivas e os desafios para a implantação do hidrogênio verde no transporte rodoviário brasileiro, considerando aspectos técnicos, logísticos, econômicos e regulatórios, além de analisar iniciativas e projetos em andamento no país.

A intensificação dos impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas tem impulsionado a necessidade de transição para modelos energéticos mais limpos e sustentáveis. Nesse cenário, o setor de transporte rodoviário brasileiro destaca-se como um dos principais emissores de gases de efeito estufa, em função da grande utilização de combustíveis fósseis (MCTI, 2020).

Considerando os compromissos ambientais firmados pelo Brasil em acordos internacionais, bem como a necessidade de promover a descarbonização da matriz energética, o hidrogênio verde surge como uma alternativa estratégica, pelo fato de ser produzido a partir de fontes renováveis e não gerar emissões durante seu uso (MME, 2021).

Entretanto, a implementação dessa tecnologia no país ainda enfrenta desafios significativos, tais como os elevados custos de produção, limitações logísticas e ausência de infraestrutura adequada, além da necessidade de políticas públicas e incentivos que viabilizem sua adoção (EPE, 2021).

Nesse contexto, o presente estudo justifica-se pela pertinência de analisar de forma crítica as perspectivas e os entraves relacionados à introdução do hidrogênio verde no setor de transporte rodoviário nacional, contribuindo para o avanço do debate sobre a transição energética e sustentabilidade.

OBJETIVO

Analisar as perspectivas e desafios para a implantação do hidrogênio verde no setor de transporte rodoviário brasileiro, considerando aspectos técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios. Os Específicos serão de: 1) Avaliar a atual dependência do setor de transporte rodoviário brasileiro em combustíveis fósseis e os impactos ambientais associados. 2) Verificar o papel do hidrogênio verde na descarbonização do setor de transportes e sua viabilidade como alternativa energética sustentável. 3) Explicar o processo de eletrólise e sua importância na produção do hidrogênio verde. 4) Analisar o funcionamento das células a combustível e o uso do hidrogênio verde em veículos. 5) Examinar os desafios relacionados à infraestrutura e logística para o armazenamento, transporte e abastecimento do hidrogênio verde. 6) Discutir os custos de produção do hidrogênio verde e sua viabilidade econômica no Brasil. 7) Projetar possíveis cenários para a adoção do hidrogênio verde no transporte rodoviário brasileiro e as expectativas para o futuro do setor. 8) Identificar e analisar as políticas públicas, incentivos governamentais, legislação vigente e projetos relacionados à implementação do hidrogênio verde no Brasil.

JUSTIFICATIVA

A busca por alternativas energéticas sustentáveis têm se intensificado diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o hidrogênio verde alvorece como uma solução viável e estratégica para promover a descarbonização, especialmente no setor de transporte rodoviário, um dos mais dependentes de combustíveis fósseis (IEA, 2019).

Este trabalho propõe uma reflexão sobre as perspectivas e os desafios para a implantação do hidrogênio verde no transporte rodoviário brasileiro, considerando aspectos técnicos, logísticos, econômicos e regulatórios, além de analisar iniciativas e projetos em andamento no país.

A intensificação dos impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas tem impulsionado a necessidade de transição para modelos energéticos mais limpos e sustentáveis. Nesse cenário, o setor de transporte rodoviário brasileiro destaca-se como um dos principais emissores de gases de efeito estufa, em função da grande utilização de combustíveis fósseis (MCTI, 2020).

Considerando os compromissos ambientais firmados pelo Brasil em acordos internacionais, bem como a necessidade de promover a descarbonização da matriz energética, o hidrogênio verde surge como uma alternativa estratégica, pelo fato de ser produzido a partir de fontes renováveis e não gerar emissões durante seu uso (MME, 2021). Entretanto, a implementação dessa tecnologia no país ainda enfrenta desafios significativos, tais como os elevados custos de produção, limitações logísticas e ausência de infraestrutura adequada, além da necessidade de políticas públicas e incentivos que viabilizem sua adoção (EPE, 2021).

Nesse contexto, o presente estudo justifica-se pela pertinência de analisar de forma crítica as perspectivas e os entraves relacionados à introdução do hidrogênio verde no setor de transporte rodoviário nacional, contribuindo para o avanço do debate sobre a transição energética e sustentabilidade.

METODOLOGIA

Tipo de pesquisa

Este trabalho é designado como uma pesquisa de abordagem qualitativa e de característica exploratória e descritiva. Seu objetivo é analisar as perspectivas e desafios para a implantação do hidrogênio verde no setor de transporte rodoviário brasileiro, por meio da revisão e interpretação de dados teóricos e estudos recentes. A escolha pela abordagem qualitativa é justificada pela necessidade de compreender, a partir de uma perspectiva ampla, os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e políticos relacionados ao tema.

Coleta de dados

A coleta de dados foi embasada em uma ampla revisão bibliográfica. Foram utilizados materiais provenientes de artigos científicos, livros, dissertações e teses, além de informações de sites confiáveis. As bases de dados consultadas incluíram Google Acadêmico, e Google Search.

Os critérios de seleção abarcaram o uso de palavras-chave como “hidrogênio verde”, “hidrogênio verde no transporte rodoviário”, “infraestrutura para o hidrogênio”, “viabilidade econômica do hidrogênio verde”, “políticas públicas associadas ao H2V e energias renováveis”. Foram priorizadas publicações recentes, entre os anos de 2015 e 2025, com ênfase em estudos voltados ao contexto brasileiro e global sobre a transição energética.

A revisão foi estruturada a partir de nove eixos temáticos centrais: (1) Panorama atual da dependência de combustíveis fósseis, (2) Descarbonização do planeta e o hidrogênio como combustível, (3) Eletrólise e Hidrogênio Verde, (4) Células a combustível e aplicação veicular, (5) Infraestrutura e logística para o H2V, (6) Custos de produção e viabilidade econômica, (7) Possíveis cenários para a adoção do H2V no Brasil e expectativas para o setor, (8) Legislação, projetos de lei, incentivos governamentais e políticas públicas e (9) projetos nacionais de hidrogênio verde.

Análise dos dados

Os dados obtidos foram analisados de forma interpretativa e comparativa, buscando identificar as principais oportunidades e dificuldades para a inserção do H2V no setor de transporte brasileiro. A análise considerou informações internacionais e nacionais, levando em conta fatores como disponibilidade de fontes renováveis, políticas energéticas, capacidade de produção, logística, infraestrutura existente e projeções econômicas. Também foram observadas as contribuições potenciais do H2V para a descarbonização do setor de transportes e os desafios técnicos de sua aplicabilidade em larga escala.

Limitações do estudo

A principal limitação deste estudo é a dependência de dados secundários e a insuficiência de dados experienciados ou estudos de caso práticos no Brasil, dado que o uso do hidrogênio verde ainda está em estágios iniciais de desenvolvimento no país. Além disso, o desprovimento de pesquisas consolidadas sobre a infraestrutura específica de produção e distribuição de H₂V representa um desafio para a uma análise mais otimizada.

Aspectos éticos

O trabalho respeitou todos os princípios de integridade acadêmica, baseando-se exclusivamente em materiais devidamente referenciados. Todas as fontes consultadas foram citadas conforme as normas, assegurando o respeito aos direitos autorais e a transparência na estruturação do conhecimento científico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As pesquisas evidenciaram que o Brasil possui grande potencial para se tornar uma potência global na produção e exportação de hidrogênio verde, devido a matriz elétrica predominantemente renovável e abundância de recursos naturais. Foram identificados projetos estratégicos em andamento, principalmente em hubs como pecém (ce), suape (pe) e açu (rj), com investimentos que ultrapassam us\$ 30 bilhões. Contudo, foram observados obstáculos consideráveis à implantação do h₂v no setor de transporte rodoviário, como o alto custo de produção, ausência de infraestrutura de armazenamento e abastecimento, e a necessidade de políticas públicas mais sólidas. A produção do hidrogênio verde ainda é economicamente complexa, mas estudos apontam para a possibilidade da redução significativa de custos até 2030, o que favorecerá a concorrência com os combustíveis fósseis.

Infraestrutura e logística para o hidrogênio verde

O Brasil tem o potencial para ser um dos maiores produtores de hidrogênio verde do mundo devido às suas vantagens naturais associadas a uma matriz elétrica predominantemente renovável. Internamente, o hidrogênio tem potencial de aplicação em diversos setores industriais, podendo também ser utilizado como substituto de combustíveis que têm alta intensidade de carbono (Fernandes et al, 2023).

Uma estrutura de produção de h₂v envolve diferentes etapas, em que se encontram sistemas de captação de energia renovável, como painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas, unidades de eletrólise de água, sistemas de purificação e compressão, tanques de armazenamento pressurizados e sistemas de controle e automação. Essas instalações podem ser centralizadas, quando instaladas com alta capacidade de produção e posterior transporte do hidrogênio, ou descentralizadas, situadas próximo aos pontos de consumo, como indústrias ou postos de abastecimento, reduzindo a necessidade de logística de transporte (IEA, 2022).

Além disso, a determinação do local para implantação da produção depende da disponibilidade de recursos hídricos, acesso à energia renovável, sistemas de transporte e proximidade com centros consumidores. As entidades que regulamentam essas questões, são a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), respectivamente (de Nóbrega et al., 2022). A integração entre a infraestrutura de produção energética e a logística de distribuição são decisivos para o avanço competitivo do hidrogênio verde (Irena, 2020).

O hidrogênio possui ponto de fusão extremamente baixo (-259 °C) e ponto de ebulição de aproximadamente (-253 °C), o que significa que ele se torna líquido apenas sob condições de alta pressão. Quando resfriado abaixo de seu ponto de ebulição e convertido em estado líquido, o hidrogênio passa a ocupar um volume cerca de 700 vezes menor do que no estado gasoso, o que favorece seu armazenamento e transporte. Para facilitar esse processo, o gás hidrogênio é comprimido a pressões que variam de 150 a 700 bar e armazenado em tanques especiais projetados para suportar essas condições (de Lara; Richter, 2023).

Custos de produção e viabilidade econômica

O hidrogênio verde pode ser produzido de forma mais coerente onde há energia renovável suficiente para alimentar a eletrólise da água. O Brasil tem excelentes condições climáticas para produzir eletricidade a partir do vento e do sol em áreas não utilizadas (Santos; Chaves, 2021).

a produção de hidrogênio verde no Brasil por meio da eletrólise da água é viável, através do consumo de eletricidade advinda de fontes renováveis, principalmente energia eólica e solar. O país possui extensas áreas com alta irradiação solar e ventos favoráveis, o que torna a energia solar fotovoltaica e a eólica alternativas economicamente viáveis. Além disso, a predominância da energia hidrelétrica reduz custos de investimento e integração à rede, já que essas usinas compensam bem a variabilidade das fontes renováveis. Além de que, as regulamentações locais também incentivam o uso de energias limpas (de Lara; Richter, 2023). Resultados de estudos relacionados a tal temática, indicam que o Brasil pode se tornar uma potência de hidrogênio verde para o mercado interno e para exportações (Kelman et al. 2020).

Mesmo com cerca de 87% da sua matriz energética oriunda de fontes renováveis, o Brasil ainda tem grande capacidade de expansão destas fontes. Para o hidrogênio verde ter uma maior competitividade, é de suma importância o barateamento destes recursos, visto que a energia elétrica corresponde por 80% do CAPEX. Como o país tem uma tarifa de energia elevada, torna-se necessário considerar os modelos de negócio de contratação de energia para que a fonte utilizada não ultrapasse os 25 US\$/MW (Fernandes et al, 2023).

Além do custo da energia elétrica, outro fator que impacta diretamente a viabilidade econômica do hidrogênio verde é o investimento em eletrolisadores, equipamentos responsáveis por realizar a eletrólise da água. Atualmente, são utilizados eletrolisadores alcalinos (AEL), que são mais acessíveis e comumente operados, o PEM (proton exchange membrane), que oferece maior eficiência e melhor funcionamento, mas apresentam custos mais elevados e os SOEC (solid oxide electrolyzer cells), que atuam em altas temperaturas e até o momento, estão em desenvolvimento (IEA, 2022).

Os eletrolisadores alcalinos têm custos que variam entre US\$ 500/kW e US\$ 1.000/kW, enquanto os eletrolisadores do tipo PEM podem variar entre US\$ 1.100/kW e US\$ 1.800/kW. Com a expansão da produção e o aumento da demanda global por hidrogênio verde, esses gastos podem cair significativamente, podendo atingir valores menores que US\$ 300/kW nos próximos anos (Irena, 2020).

Pesquisas realizadas pela Agência Internacional de Energia (IEA), mostram que os eletrolisadores representam uma parte significativa do custo total da infraestrutura para produção do H₂V, e que seu preço poderá cair entre 60% e 70% até 2030, à medida que a produção se torne mais eficiente (IEA, 2022).

A produção global de hidrogênio atingiu o patamar de 90 milhões de toneladas em 2020, e a previsão é que esta produção atinja a marca de 200 milhões de toneladas em 2040. Nesse viés, o mercado de hidrogênio verde atingiu o patamar de 300 milhões de dólares em 2020. Seguindo os pesados investimentos que estão sendo feitos no setor, há uma expectativa de que no final da década o mercado já movimente cerca de 10 bilhões de dólares (Fernandes et al, 2023).

Legislação, projetos de lei, incentivos governamentais e políticas públicas

O Brasil possui grande potencial para se tornar um protagonista global no mercado de hidrogênio, aproveitando sua matriz energética majoritariamente renovável para desenvolver uma indústria de hidrogênio de baixa emissão de carbono. Esse recurso será fundamental para a transição energética do país e a meta de neutralidade de carbono até 2050, além de possibilitar modelos de negócios híbridos e fortalecer tanto o mercado interno quanto as exportações. Para consolidar um mercado competitivo, é essencial uma abordagem abrangente que envolva tecnologia, economia, regulamentação e capacitação. A criação de um ambiente de negócios atrativo e seguro é fundamental para estimular investimentos e expandir a cadeia de valor do hidrogênio no Brasil (MME, 2025).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1-BRASIL. Curitiba (PR). Lei nº 14.826/2016, 25 de abril de 2016. Dispõe sobre o incentivo à utilização de veículos automotores movidos à base de energia elétrica ou a hidrogênio. Diário Oficial do Município de Curitiba, PR, 28 abr. 2016.
- 2-EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- 3-EPE – Empresa de Pesquisa Energética.. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-lanca-nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio->. Acesso em: 16 abr. 2025.

- 4-EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 23 abr. 2025.
- HYDROGEN CENTRAL. **Brasil inaugura primeira estação de conversão de etanol em hidrogênio do mundo**. Disponível em: <https://hydrogen-central.com/brazil-unveils-worlds-first-ethanol-to-hydrogen-station/>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- 5-HYDROGEN COUNCIL. **Ciclo Produtivo do Hidrogênio Verde**. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/>. Acesso em: 19 mar. 2025.
- 6-IEA – International Energy Agency. **O Futuro do Hidrogênio**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 16 abr. 2025.
- 7-IEA – International Energy Agency. **Revisão Global de Hidrogênio 2022**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- 8-IPCC - Painel Intergovernamental Sobre Mudança Climática. **Mudança do Clima. Relatório Síntese. 2023**. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 2 abr. 2025.
- 9-MME - Ministério de Minas e Energia. **Resoluções 2021**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- 10-MME - Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>. Acesso em: 24 mar. 2025.