



energia
NO TRANSPORTE

HIDROGÊNIO H₂

H₂
Hidrogênio

Hidrogênio Renovável

*Uma das rotas para descarbonizar o
transporte rodoviário*

Ficha Técnica

Presidente da CNT
Vander Francisco Costa

Vice-Presidentes da CNT

Transporte Rodoviário de Passageiros
Eudo Laranjeiras

Transporte Rodoviário de Cargas
Flávio Benatti

Transporte Aquaviário de Cargas e de Passageiros
Raimundo Holanda Cavalcante Filho

Transporte Ferroviário de Cargas e de Passageiros
Fernando Simões Paes

Transporte Aéreo de Cargas e de Passageiros
Eduardo Sanovicz

Infraestrutura de Transporte e Logística
Paulo Gaba Junior

Diretor Executivo da CNT
Bruno Batista

Diretora Executiva Adjunta da CNT
Fernanda Rezende

Equipe Técnica da CNT

Gerência Ambiental

Erica Marcos
Raflem Santos

Revisão: Anna Guedes

Diagramação: Marília da Silva Ferreira

Divulgação: Hércules Barros

Hidrogênio renovável: uma das rotas para descarbonizar o transporte rodoviário. – Brasília: CNT, 2023.

35 p. : il. color. – (Energia no Transporte)

1. Hidrogênio – combustível. 2. Hidrogênio – fonte energética – legislação. 3. Hidrogênio verde. 4. Energia – fontes alternativas. 5. Transporte rodoviário - sustentabilidade. I. Confederação Nacional do Transporte.

CDU 662.769.2:502.13

Sumário

Apresentação	5
O que é o hidrogênio renovável?	6
Legislação vigente	13
Principais fontes	17
Mapeamento do hidrogênio	19
Aplicações no modo rodoviário	24
Saldo de emissões	28
Vantagens x desafios	32
Referências	33



Apresentação

A Confederação Nacional do Transporte (CNT) tem, dentro da sua agenda ambiental, a visão de ser a principal promotora de ações voltadas ao desenvolvimento sustentável do setor de transporte e da qualidade de vida de seus trabalhadores no Brasil.

Uma das principais medidas da Confederação nesse sentido é viabilizar o acesso dos transportadores a informações estratégicas de temas relevantes, como novas tecnologias e fontes de energia mais limpas, e às práticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, a CNT elabora conteúdos técnicos a fim de entregar conhecimento ao transportador e à sociedade sobre práticas que levem à descarbonização do setor.

Assim, a CNT publica a série **Energia no Transporte**, com o intuito de disseminar material preciso sobre **diferentes fontes energéticas** que podem ser utilizadas no transporte rodoviário para auxiliar o segmento a diminuir a sua dependência de combustíveis fósseis, como o diesel. Os estudos abordam, ainda, temáticas como legislações vigentes, saldo de emissões e vantagens e desafios para cada fonte.

Com o presente trabalho, a CNT expressa o reconhecimento da importância da atividade transportadora no desenvolvimento sustentável do país e na construção de um setor ainda mais responsável ambientalmente, entregando melhor qualidade de vida ao transportador e à sociedade.

Vander Costa
Presidente da CNT



O que é o hidrogênio renovável?

O hidrogênio (H_2) é uma das fontes energéticas mais abundantes do planeta e pode ser encontrado na superfície terrestre^a na forma combinada com outros compostos, como nas moléculas de hidrocarbonetos^b (hidrogênio e carbono – HC), na amônia (nitrogênio e hidrogênio – NH_3) e na água (hidrogênio e oxigênio – H_2O). Pelo fato de o hidrogênio estar majoritariamente combinado com outros elementos químicos, o seu processo de extração, a fim de obtê-lo na forma elementar, é complexo. Há raros casos em que pode ser encontrado em formações geológicas e jazidas naturais.¹

Seu átomo é composto por apenas um próton e um elétron – sendo, assim, o elemento químico mais leve do universo. Essas características físico-químicas também permitem ao H_2 oferecer propriedades atrativas ao setor de combustíveis, como **alta densidade energética** (quantidade de energia por quilograma de H_2) e **baixo peso molecular**.¹

Em seu estado natural, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido, sendo também altamente inflamável e armazenador de grandes quantidades de energia.² Desta forma, o H_2 pode ser utilizado em diferentes aplicações, como na produção de amônia (segmento de fertilizantes); de metanol (combustível marítimo); em refinarias de petróleo e siderúrgicas; e na indústria de alimentos. Além disso, pode gerar eletricidade; aquecimento; armazenamento de energia; e se tornar um **combustível veicular para o modo rodoviário**, sendo, igualmente, uma opção para os modos aéreo, ferroviário e marítimo.³

Mesmo sendo tratado, ainda, como uma tecnologia disruptiva,^c o hidrogênio vem ganhando destaque no setor energético pela sua diversidade de aplicações industriais e seu grande potencial para auxiliar na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Portanto, **quando renovável**, conhecido como hidrogênio verde, **o hidrogênio é um dos caminhos da transição para uma economia de baixo carbono** a ser percorrido por setores que emitem quantidades consideráveis de GEE – tal como o segmento do transporte rodoviário, que, hoje, utiliza intensamente veículos pesados de cargas e de passageiros movidos a fontes fósseis.⁴

^a Compreende as parcelas da atmosfera, crosta terrestre e meios aquáticos.

^b Moléculas formadas por átomos de carbono e hidrogênio.

^c Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), tecnologias disruptivas são capazes de alterar significativamente o mercado energético, mas há pouca informação disponível para confecção de dados estimativos e desdobramentos mercadológicos. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3iUjJnt

O hidrogênio pode ser utilizado como combustível para veículos leves e pesados, movidos tanto a combustão interna quanto a eletricidade, por meio de células de combustível (VECC). Conforme indicado pela Agência Internacional de Energia (IEA, na sua sigla em inglês), o H₂ pode estar entre as principais fontes energéticas do cenário de descarbonização global,^d em que será responsável por cerca de 4% da redução de emissões do setor de energia no período de 2021 a 2050.⁵

Cabe destacar que esse ativo energético pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas. Sua classificação é determinada de acordo com a origem da fonte energética e o possível emprego de tecnologias de inserção de carbono no subsolo ou reúso de dióxido de carbono (CO₂) para demais processos produtivos (CCUS, na sigla em inglês para *carbon capture, utilization and storage* ou captura, utilização e armazenamento de carbono, em português^e). Tal caracterização é normalmente referenciada na literatura por **cores**, mas não estão padronizadas devido às distinções entre os processos de produção de cada país. Portanto, para esta edição da Série, adotou-se a classificação brasileira empregada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)⁶ – listada no **Quadro 1**, com os respectivos procedimentos e definições de obtenção de hidrogênio.

QUADRO 1 Categorização de hidrogênio, por cor, de acordo com seu processo produtivo e respectivas definições didáticas		
Tipo	Processo	Definição didática
H ₂ preto	Gaseificação de carvão mineral do tipo antracito, sem CCUS.	Conversão termoquímica de carvão, com teor de carbono superior a 90% (antracito), mediante a aplicação de calor na presença de água e oxigênio. O processo transforma o antracito (carvão sólido) em gases combustíveis, sendo, um deles, o H ₂ preto. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H ₂ marrom	Gaseificação do carvão mineral do tipo hulha, sem CCUS.	Conversão termoquímica de carvão, com teor de carbono entre 75% e 85% (hulha), mediante a aplicação de calor na presença de água e oxigênio. O processo transforma a hulha (carvão sólido) em gases combustíveis, sendo, um deles, o H ₂ marrom. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.

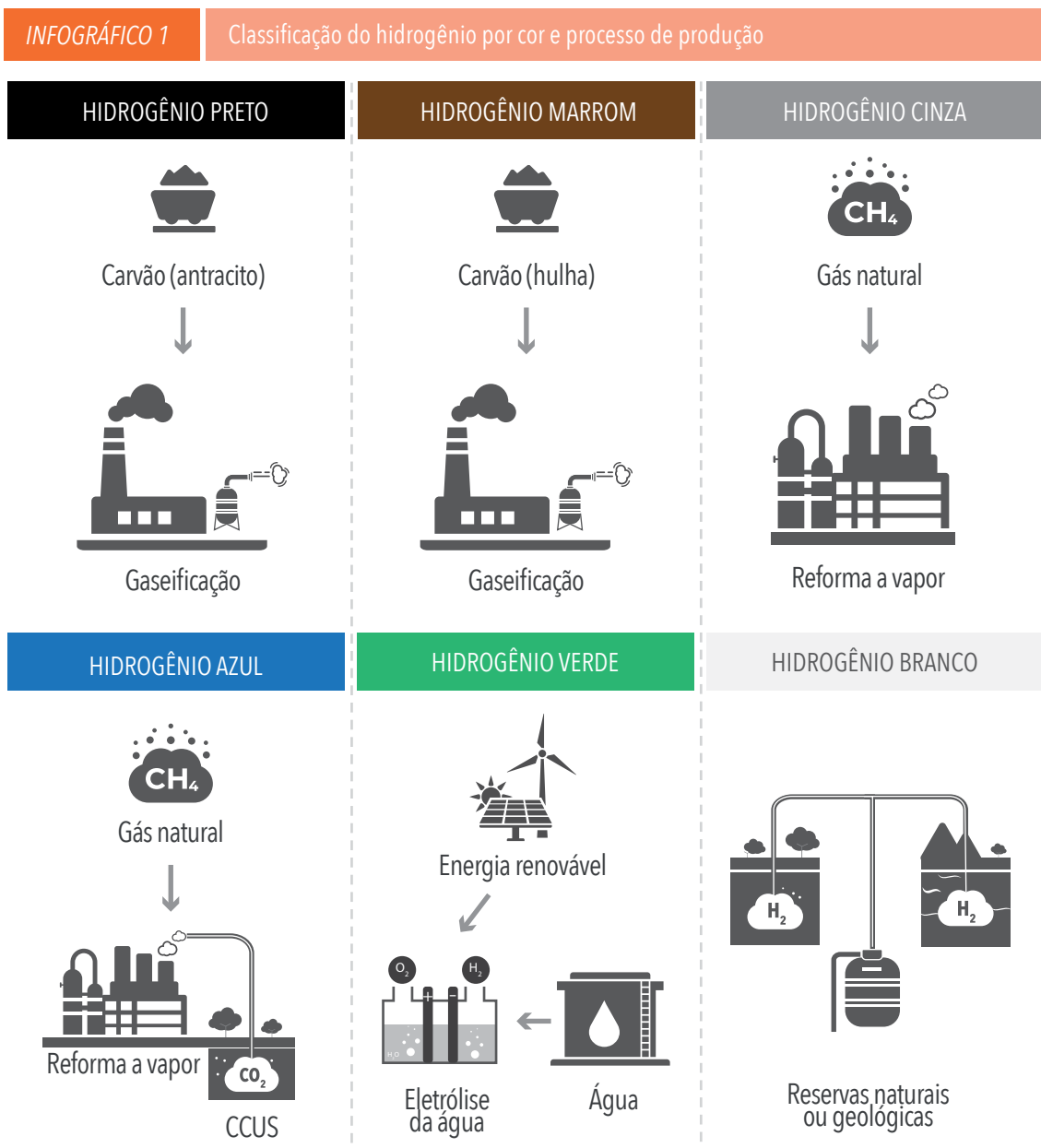
^d O cenário Net Zero 2050, da IEA, estabelece o caminho para estabilizar o aumento da temperatura média global em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, atingindo emissão líquida zero de CO₂ do setor de energia global até 2050. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3D5puFK

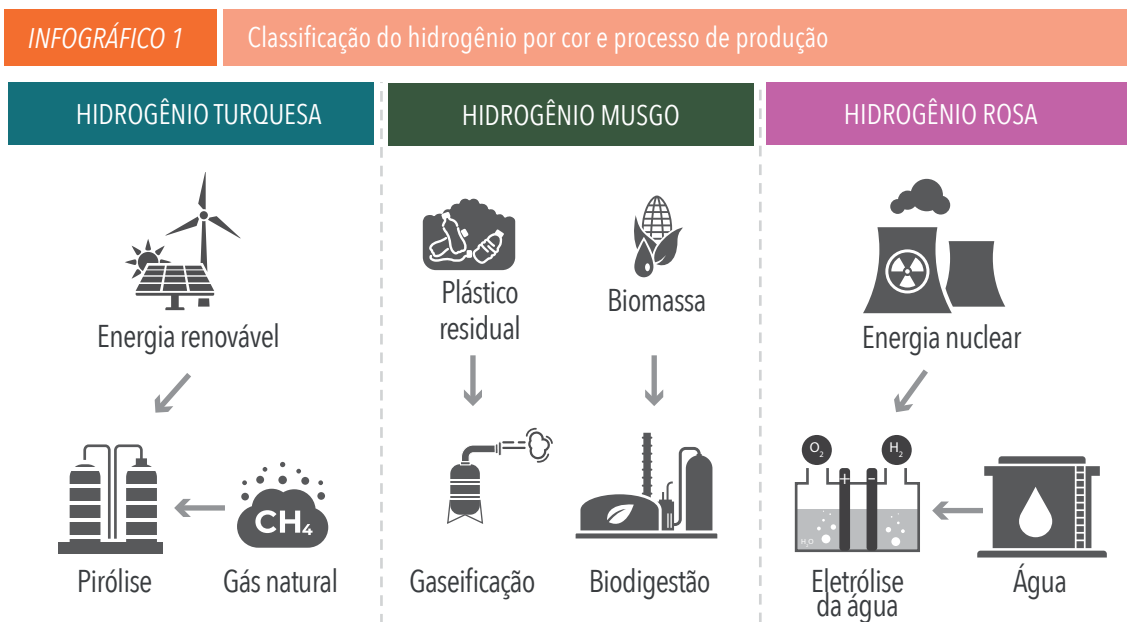
^e O processo de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), de acordo com a EPE, tem o objetivo de impedir a liberação de carbono na forma de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, incluindo as ações de transporte de CO₂, utilização em novos produtos ou armazenamento permanente em formações geológicas no subsolo. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3wqpfuf

Tipo	Processo	Definição didática
H ₂ cinza	Reforma a vapor do gás natural, sem CCUS.	Reação química entre o gás natural e o vapor d'água (H ₂ O) em reatores industriais, na presença de calor e catalisadores. O gás natural, após a reação, é convertido em outros gases, tais como: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO ₂) e H ₂ cinza. Durante o seu processo produtivo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H ₂ azul	Reforma a vapor do gás natural, com CCUS.	Reação química entre o gás natural e o vapor d'água (H ₂ O) em reatores industriais, na presença de calor e catalisadores. O gás natural, após a reação, é convertido em outros gases, tais como: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO ₂) e H ₂ azul. Neste processo, a técnica de CCUS é utilizada para diminuir as emissões de gases poluentes.
H ₂ verde	Eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia.	Reação eletroquímica em que energia elétrica renovável (solar, eólica, biomassa ou hidráulica) é aplicada em equipamentos eletrolisadores, com objetivo de separar as moléculas presentes na água (H ₂ O), gerando-se H ₂ verde e O ₂ .
H ₂ branco	Extração natural ou de origem geológica.	Extração de hidrogênio natural localizado no solo ou em poços mais profundos (jazidas). O H ₂ branco é produzido naturalmente em reservatórios, mediante a decomposição de suas formações geológicas em gases.
H ₂ turquesa	Pirólise de gás metano, sem geração de CO ₂ .	Quebra da molécula de metano (CH ₄) por meio da aplicação de calor, proveniente de fontes limpas, como a eólica ou solar, e de catalisadores, para melhorar a taxa de conversão da reação. No processo, o gás metano é convertido em H ₂ turquesa e carbono na forma sólida – pode ser utilizado na indústria siderúrgica e na produção de pneus, grafite, corante e condicionadores de solo. Durante este processo, a técnica de CCUS não é utilizada.
H ₂ musgo	Gaseificação de plásticos residuais, gaseificação de biomassa ou biodigestão de biomassa, com ou sem CCUS.	Conversão termoquímica de plásticos residuais ou biomassa, a partir da aplicação de fonte de calor com a presença de oxigênio, transformando-os em gases, tais como: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO ₂) e H ₂ musgo. Considera-se, também, o hidrogênio obtido a partir da decomposição de material orgânico (biomassa) por microrganismos. Durante estes processos, a técnica de CCUS é facultativa.
H ₂ rosa	Eletrólise da água utilizando fonte de energia nuclear.	Reação eletroquímica em que a energia nuclear é aplicada em equipamentos eletrolisadores, com objetivo de separar as moléculas presentes na água (H ₂ O), gerando-se H ₂ rosa e O ₂ .

Fonte: EPE (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 09 mar. 2023. Link de acesso: bit.ly/3wqpufu

A rota mais utilizada para produzir hidrogênio é a de origem fóssil, no qual o H₂ é extraído de fontes não renováveis, tais como carvão mineral, petróleo e gás natural. Dados da IEA⁷ indicam que a produção global de hidrogênio em 2021, por rota tecnológica, dividiu-se em: 81,82% de fontes fósseis sem CCUS; 17,51% de subprodutos de procedimentos, como no refino de petróleo; 0,64% de fontes fósseis com CCUS; e 0,03% de bioenergia, demonstrando que mais de 99% do H₂ produzido globalmente carrega emissões de GEE associadas. O **Infográfico 1** demonstra as demais tecnologias envolvidas para obtenção de hidrogênio, de acordo com a citada caracterização por cor.





Fonte: EPE (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 24 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3wqpufu

Processos produtivos de hidrogênio mais limpos vêm sendo induzidos em maior escala pela busca por responsabilidade ambiental nas indústrias, aliada às metas de descarbonização global – compactuadas no Acordo de Paris.^f Tais metodologias ambientalmente corretas se sobressaem no mercado de energias alternativas por permitirem a entrega de um combustível eficiente e praticamente neutro em carbono em toda a sua cadeia produtiva. Um exemplo é o H₂ produzido a partir da eletrólise da água com a utilização de energia renovável, chamado de **hidrogênio renovável** ou **hidrogênio verde**, por cumprir requisitos de sustentabilidade.

O hidrogênio renovável é um combustível alternativo promissor para o setor transportador, pois pode ser utilizado como forma de propulsão limpa para os veículos do modo rodoviário, com emissão nula em relação aos já consolidados combustíveis fósseis, no que concerne às emissões de escapamento. Em seu processo produtivo, gera-se hidrogênio (H₂) como produto principal. Como secundário, gera-se o oxigênio (O₂), que pode ser utilizado em aplicações na medicina, processos industriais e aeroespaciais.^g

^f Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o Acordo de Paris é um tratado global adotado em 2015 pelos países partícipes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, na sua sigla em inglês). O acordo regulamenta as medidas para reduzir as emissões de CO₂, e exige a formulação das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sua sigla em inglês) pelos países signatários. Acesso em: 24 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3kuBNoo

Para ser caracterizado como hidrogênio renovável ou verde, o processo supracitado deve receber corrente elétrica produzida a partir de fontes renováveis, tais como o vento (eólica), o sol (solar) e a água (hidráulica). Deste modo, o combustível que chega ao consumidor final não possui rastros de emissões de GEE significantes em sua cadeia produtiva, acelerando a transição para um transporte de emissão nula no segmento dos veículos pesados.

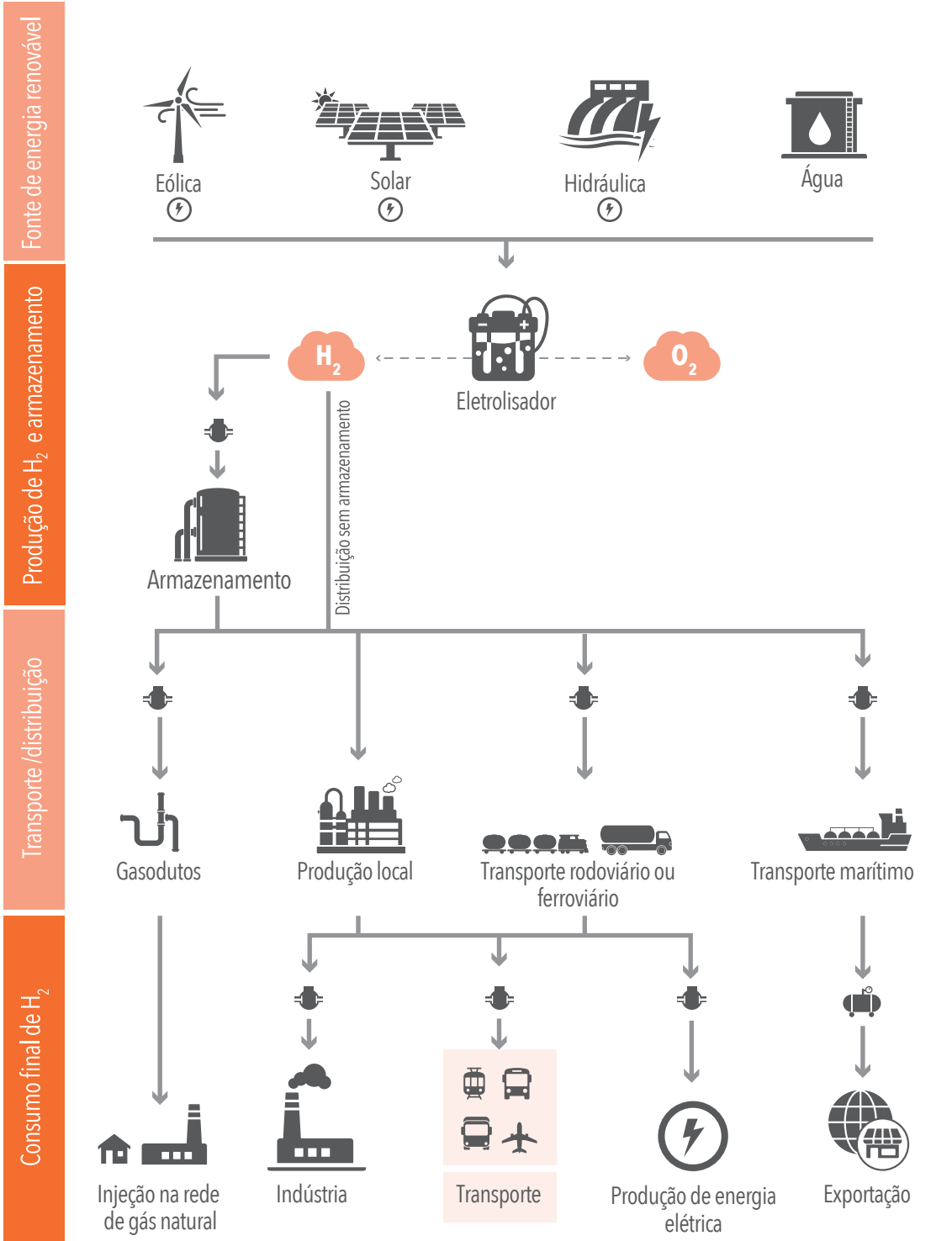
No **Infográfico 2**, é possível observar todas as etapas da cadeia de produção do hidrogênio renovável, desde a fonte primária – com a produção de H₂ em eletrolisadores – até o consumo final, com **aplicações no setor transportador como combustível**, uso em indústrias, produção de energia elétrica, injeção em gasodutos ou exportação. É importante destacar que o H₂ passa por etapas de **armazenamento**, podendo ser estocado por longo período mantendo a qualidade **durante a sua distribuição**, sendo capaz, inclusive, de ser transportado por longas distâncias em modos de transporte distintos, gerando oportunidades à multimodalidade do setor.⁸

Sob o aspecto econômico, o hidrogênio renovável carece de incentivos financeiros e de pesquisas de desenvolvimento para tornar-se competitivamente atrativo em relação aos outros tipos de hidrogênio, devendo ser sustentado por políticas governamentais com mecanismos e princípios que direcionem o mercado para a sua produção e venda em escala nacional. Com o avanço da descarbonização mundial e das metas de sustentabilidade ambiental, cada vez mais rigorosas, o H₂, por ser uma fonte promissora, poderá fazer parte da oferta nacional de combustíveis alternativos ao setor de transporte.

Hidrogênio Renovável

Uma das rotas para descarbonizar o transporte rodoviário

INFOGRÁFICO 2 Etapas de produção e cadeia de valor do hidrogênio renovável



Legenda: ⚡ Energia elétrica, ⚙️ Compressão/liquefação, 🚚 Regaseificação

Fonte: EDP Brasil (2023), com adaptações da CNT. Acesso em: 26 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/404YqAc

A respeito da exportação do hidrogênio, cabe ressaltar que uma medida de aumento de eficiência do transporte de H_2 vem sendo aplicada mediante a sua conversão em amônia (NH_3), permitindo, assim, que o hidrogênio chegue em demais países com menor utilização de energia, pois o transporte da amônia é menos intenso energeticamente que o transporte de hidrogênio. O composto amoníaco (NH_3) funciona como um transportador natural de hidrogênio, sendo armazenado em navios a longas distâncias. Essa conversão para amônia resolve um dos maiores problemas de transporte deste combustível, pois o H_2 é leve e tem baixa densidade, o que levaria à necessidade de utilizar tanques com alta capacidade de armazenamento e com sistemas de fechamento sob alta pressão.⁹

Para transportar o hidrogênio, é necessário liquefazê-lo previamente e essa transformação só ocorre a $-253\text{ }^\circ\text{C}$, o que demanda bastante energia. Quando o hidrogênio renovável é convertido em amônia verde – composta por três átomos de hidrogênio e um de nitrogênio –, a logística de transporte é facilitada, vez que este composto é liquefeito a, apenas, $-33\text{ }^\circ\text{C}$ e dispõe de maior densidade energética⁹ em relação ao hidrogênio puro. Após sua transformação e deslocamento, a amônia verde pode ser convertida novamente em hidrogênio renovável. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), para distâncias menores que 1.500 quilômetros, o transporte de H_2 por gasodutos locais é a opção economicamente mais vantajosa em relação aos demais modos de transporte. Em distâncias acima de 1.500 quilômetros, a liquefação e a regaseificação de hidrogênio transformado em amônia torna-se a opção econômica mais adequada.³

LEGISLAÇÃO VIGENTE

A legislação brasileira voltada à promoção do hidrogênio como fonte energética nacional começou a ser desenvolvida em 1998, com a criação do Centro Nacional de Referências em Energia de Hidrogênio (Ceneh), liderado, na época, pelo então Ministério da Ciência e Tecnologia. Em 2002, o citado ministério divulgou o **Programa Brasileiro de Células a Combustível (PROCaC)**, voltado ao desenvolvimento de pesquisas, de entidades públicas e privadas, para obtenção de conhecimento sobre o H_2 em células geradoras de energia. O PROCaC passou por uma reformulação em 2005, quando recebeu o nome de **Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH₂)**.¹⁰

Na sequência, o governo brasileiro passou a investir em projetos que visavam ao aumento da visibilidade do hidrogênio perante o setor energético. O Ministério de Minas e Energia, ainda em 2005, lançou a publicação **Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil**, quando foi possível observar as primeiras tentativas de se estabelecer leis e políticas públicas de incentivo ao uso de H₂ no Brasil. Em 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), por meio de subsídio técnico de diversos ministérios e agências governamentais, lançou a publicação intitulada **Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade – 2010-2025**, avançando no desenvolvimento tecnológico da hidrólise da água como processo produtivo de hidrogênio sustentável, mediante a realização de projetos demonstrativos; investimentos em pesquisa básica e aplicada; e continuidade na formação de recursos humanos por intermédio de bolsas de estudos.¹¹

Mais recentemente, já em 2021, ocorreram diversos eventos sobre o hidrogênio, envolvendo governos, universidades, indústria e mercado. As discussões englobavam um programa nacional para o desenvolvimento de hidrogênio verde para a América Latina e Caribe, além da criação de *Hubs*⁹ de H₂. Essas ações culminaram na promulgação de duas resoluções favoráveis à consolidação do hidrogênio no país, em 2021.

Primeiro, publicou-se a **Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) nº 02/2021**, que estabeleceu as orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia brasileiro. Em seu artigo 1º, a resolução orienta a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a priorizarem a destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação para o hidrogênio e demais fontes categorizadas como tema afeto ao setor de energia.

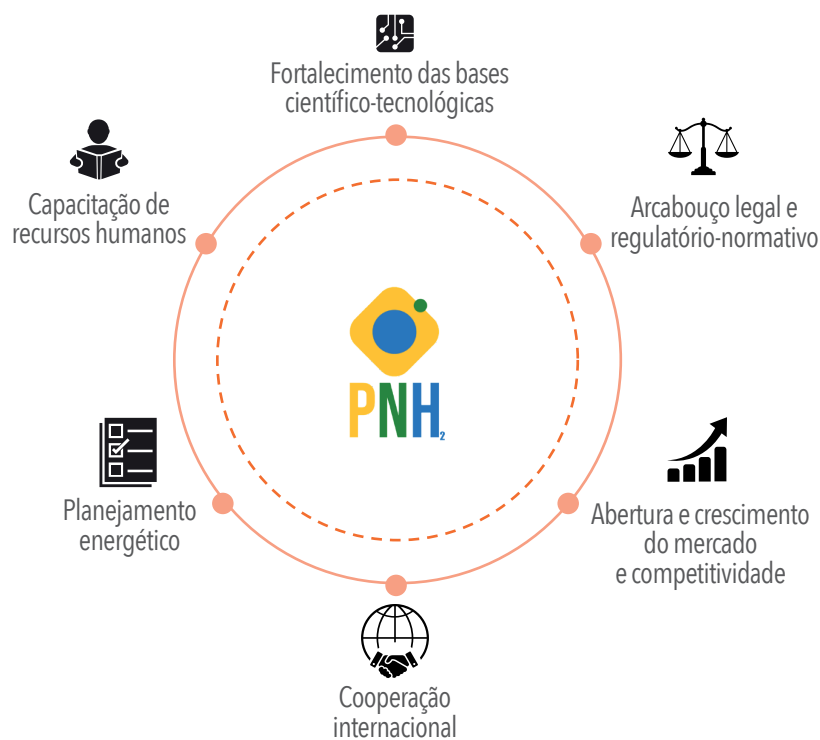
Em seguida, foi publicada a **Resolução CNPE nº 06/2021**, determinando a realização de estudos para a proposição de diretrizes para o **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)**, devendo ser efetuado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MDR), com o apoio técnico da EPE, consolidando-se, assim, o hidrogênio como fonte energética para uma matriz nacional de baixo carbono.¹¹

⁹ Ambiente que se torna referência de um determinado produto, concentrando suas atividades para o seu desenvolvimento específico.

Após a divulgação das citadas diretrizes, o Programa foi instituído, mediante a **Resolução CNPE nº 06/2022**. Seu objetivo é fortalecer a indústria do hidrogênio no Brasil, considerando, simultaneamente, o desenvolvimento de políticas públicas, de tecnologias e de mercado,¹¹ demonstrados no **Infográfico 3** e no **Quadro 2**.

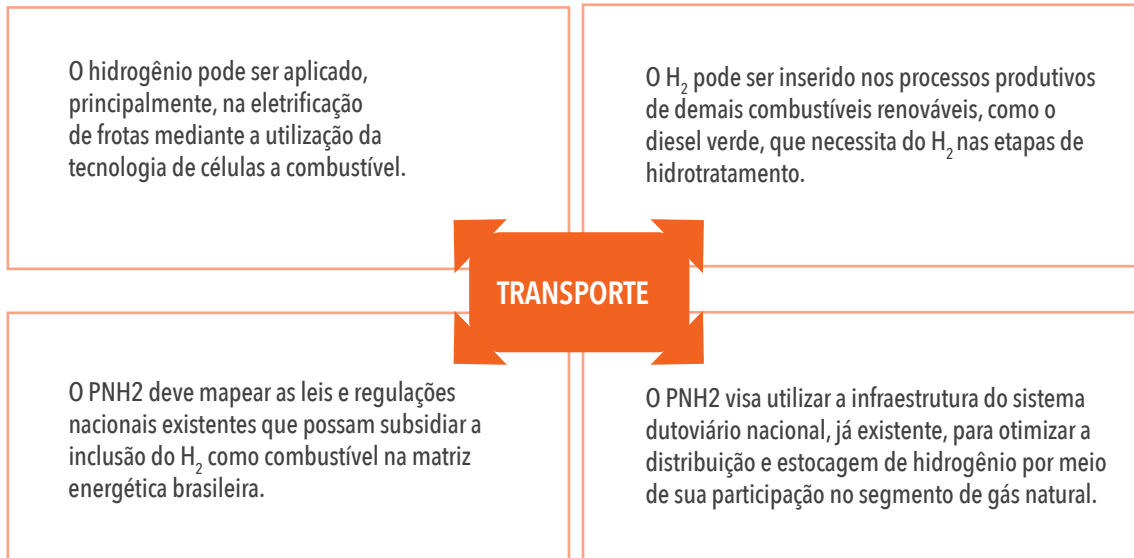
INFOGRÁFICO 3

Eixos estratégicos do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂)



Fonte: MME (2021), com adaptações da CNT. Acesso em: 01 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40fsDg2

QUADRO 2 Principais pontos do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)



Fonte: MME (2021), com adaptações da CNT. Acesso em: 05 abr. 2023. Link de acesso: bit.ly/40fsDg2

No que tange ao desdobramento legislativo sobre a utilização do hidrogênio nas esferas nacional e regional, o país já conta com leis e projetos como os mencionados adiante:

- **Projeto de Lei PL nº 725/2022:** tramita no Plenário do Senado Federal com a intenção de estabelecer **parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio renovável**. Este projeto pretende alterar a Política Energética Nacional,^h inserindo o hidrogênio verde como opção de transição para uma economia de baixo carbono. O PL sugere, ainda, a sua adição obrigatória nos gasodutos, com percentuais mínimos de 5% e 10% a partir de 2032 e 2050, respectivamente.
- **Lei nº 17.563/2021**, de São Paulo, e **lei nº 14.826/2016**, de Curitiba: estabelecem políticas municipais de incentivo ao uso de carros elétricos ou **movidos a hidrogênio**. Essas leis estimulam o uso do hidrogênio como combustível a partir de desonerações tributárias, reserva de vagas de estacionamento e geração de créditos para abatimentos do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) e do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU).

^h Instituída pela lei nº 9.478/1997.

- **Lei nº 21.767/2023, do estado de Goiás:** institui a **Política Estadual do Hidrogênio Verde** para a redução das emissões de carbono e a diversificação da sua matriz energética com a inserção do hidrogênio. Entre os seus objetivos específicos estão os estímulos do estado para desenvolver a sua cadeia produtiva, contemplando investimentos e avanços na infraestrutura de produção, distribuição e comercialização do insumo de forma regional.

PRINCIPAIS FONTES

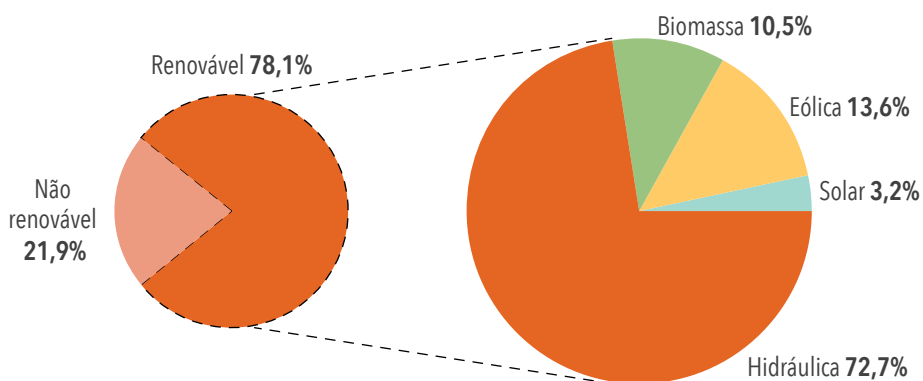
As principais fontes utilizadas atualmente para a produção de hidrogênio são de origem mineral e possuem grande potencial poluidor. Segundo dados da IEA,¹² em 2021, a produção global de hidrogênio atingiu 94 milhões de toneladas (Mt H₂), com emissões associadas maiores que 900 milhões de toneladas de CO₂. Dessas toneladas produzidas, aproximadamente 62% foram mediante a utilização de gás natural de origem fóssil (sem emprego de tecnologia de captura e reutilização de carbono – CCUS) e 19%, a partir do carvão mineral.

Além disso, 18% foram produzidos como coproduto da reforma da naftaⁱ em refinarias e 0,7% produzido diretamente do petróleo. A parcela de H₂ de baixo carbono contabilizou apenas 0,7% da produção global, do qual apenas 35 mil toneladas (0,04%) eram hidrogênio verde. Entretanto, é importante ressaltar que houve, em 2021, um incremento de 20% na produção de hidrogênio renovável em comparação com o ano anterior, refletindo progresso nessa tecnologia.

Para o Brasil, o hidrogênio renovável se mostra como uma das grandes oportunidades da transição energética, devido à matriz elétrica nacional possuir **78,1% de parcela renovável**, divulgada no Balanço Energético Nacional (BEN)¹³ 2022 (**Gráfico 1**).

ⁱ Composto proveniente do fracionamento do petróleo e utilizado como matéria-prima em indústrias petroquímicas.

GRÁFICO 1 Oferta interna de energia elétrica no Brasil, estratificada por tipo de fonte renovável (2021)



Fonte: EPE (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40JWTA3

Nota-se que a matriz elétrica brasileira conta com parcelas de fontes renováveis de origem solar, eólica ou biomassa, comumente utilizadas na produção do hidrogênio verde. Destaca-se, além disso, que o Brasil tem a energia produzida a partir da água (hidráulica) como principal fonte elétrica, o que pode elevar ainda mais o patamar nacional de produção de hidrogênio de baixo carbono, pois, apesar de possuírem problemas ambientais atrelados às suas construções e instalações, as hidrelétricas, na etapa de funcionamento, são consideradas mais limpas do que as fontes fósseis.

É importante ressaltar que o potencial de crescimento desta fonte tende a aumentar nacionalmente, pois governos estaduais têm buscado a transição energética. Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE), espera-se que, em 2050, o perfil da capacidade instalada de energia elétrica seja composto por eólica (33%); solar (15%); e demais fontes.¹ Este possível cenário fortalecerá a produção de hidrogênio renovável no país, mediante a implementação de centrais eletrolíticas^k de água em cidades estratégicas.¹⁴

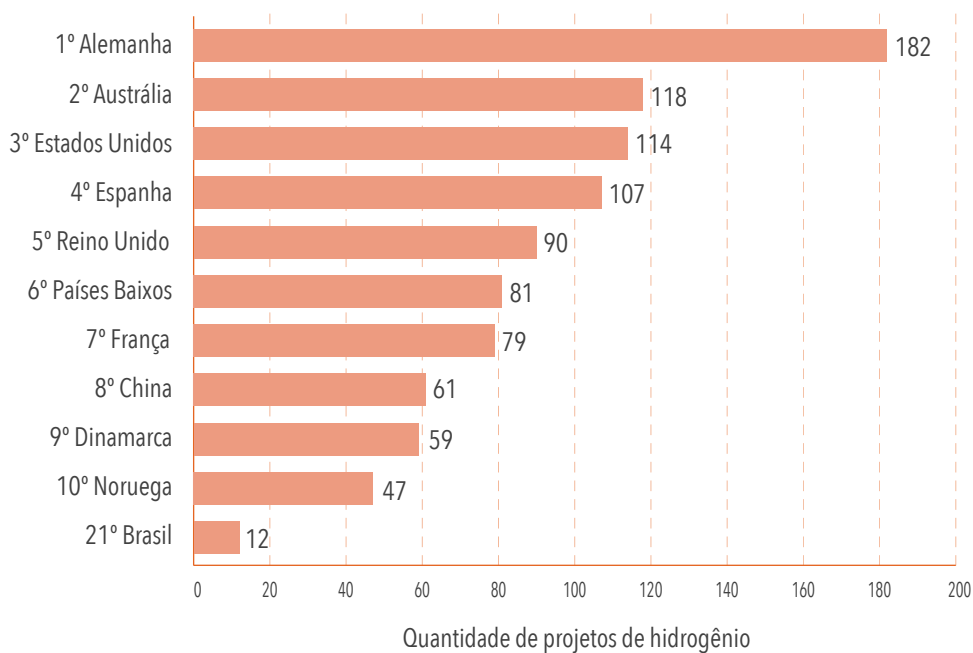
¹ Considerando o terceiro cenário do PNE, com expansão a partir de tecnologias não emissoras de GEE.

^k Unidades produtoras de hidrogênio renovável.

MAPEAMENTO DO HIDROGÊNIO

A produção de hidrogênio renovável no mundo ainda é incipiente e, de modo geral, encontra-se nas fases de desenvolvimento, avaliação da viabilidade e definição de investimentos. De acordo com os registros de projetos para produção de hidrogênio (**Gráfico 2**)¹⁵ de diversos países, a Alemanha se destaca em termos quantitativos, totalizando 182 projetos.

GRÁFICO 2 Quantitativo de registros de projetos de produção de hidrogênio em diferentes países



Fonte: IEA (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3JJ5psG

Desses 182 projetos alemães, cerca de 28% (52) já estão em fase de operação no país e apenas 16 possuem produção dedicada ao hidrogênio renovável. É importante ressaltar que a Europa é pioneira na produção de H₂, com 7 países entre os 10 mais bem classificados. Contudo, a maioria de seus registros é de projetos em que o hidrogênio é utilizado para fazer parte de processos industriais produtivos.¹ Apenas 4,6%

¹ Utilização do hidrogênio para o refino de petróleo e nas produções de amônia, metanol e aço.

(30 de 645 registros) dos projetos dos países da Europa do Gráfico 2 são dedicados à produção exclusiva de hidrogênio renovável e estão em fase de operação.

Entre os 86 países considerados, o Brasil encontra-se na 21ª colocação, com 12 projetos de produção de hidrogênio. Apesar de não estar entre as 10 nações mais avançadas, 100% dos projetos brasileiros utilizam a tecnologia de eletrólise, **alimentada com energia renovável**,^m para a produção de hidrogênio verde (75% dos registros) e amônia verde (25% dos registros). A lista dos projetos e suas características pode ser visualizada no **Quadro 3**, com predominância de instalações de fábricas de hidrogênio verde no estado do Ceará. O local foi escolhido estrategicamente para permitir a exportação rumo ao mercado internacional, vez que os portos do referido estado possuem conexão direta com importantes portos internacionais, como o de Roterdã, nos Países Baixos. Além disso, o Ceará é um dos cinco maiores estados geradores de energia elétrica renovável do país, propiciando energia limpa ao processo de eletrólise.¹⁶

QUADRO 3 | Projetos brasileiros de produção de hidrogênio renovável (H₂) e amônia verde (NH₃)

Nome do projeto (estado)	Status	Tecnologia	Tipo de eletricidade	Tipo de renovável	Produto	Capacidade energética por projeto
Porto do Pecém (CE)	Sob estudo de viabilidade	Eletrólise	Renovável dedicada	Hidráulica	H ₂	600 Kt H ₂ /ano
Porto do Açu (RJ)	Sob estudo de viabilidade	Eletrólise	Renovável dedicada	Diversas fontes	NH ₃	300 MW
Fortescue - Porto do Pecém (CE)	Sob concepção	Eletrólise	Renovável dedicada	Eólica offshore ³	H ₂	15 Mt H ₂ /ano
Qair - Marítimo Dragão (CE)	Sob concepção	Eletrólise	Renovável dedicada	Eólica offshore	H ₂	296 Kt H ₂ /ano
Cactus Energia - Porto do Pecém (CE)	Sob concepção	Eletrólise	Renovável dedicada	Diversas fontes	H ₂	10,5 Kt H ₂ /mês
Ingenostrum - Total Eren (CE)	Sob concepção	Eletrólise	Renovável dedicada	-	H ₂	-
White Martins (RS)	Sob concepção	Eletrólise	Renovável dedicada	Eólica offshore	H ₂	-
Unigel Fase I (BA)	Sob decisão final de investimento	ALK ¹	Renovável dedicada	Eólica onshore ⁴	NH ₃	60 MW

^m Advinda de plantas exclusivamente dedicadas ou da matriz elétrica nacional.

Nome do projeto (estado)	Status	Tecnologia	Tipo de eletricidade	Tipo de renovável	Produto	Capacidade energética por projeto
Unigel Fase II (BA)	Sob estudo de viabilidade	ALK	Renovável dedicada	Eólica <i>onshore</i>	NH ₃	240 MW
Shell Fase I – Porto de Açu (RJ)	Sob concepção	Eletrólise	Rede elétrica	-	H ₂	10 MW
Shell Fase II – Porto de Açu (RJ)	Sob concepção	Eletrólise	Rede elétrica	-	H ₂	100 MW
EDP – Porto do Pecém (CE)	Sob construção	PEM ²	Renovável dedicada	Solar	H ₂	3 MW

¹ALK = eletrólise alcalina de água; ²PEM = eletrólise com membrana de eletrólito polimérico; ³Força do vento em alto mar; e ⁴Força do vento em terra.

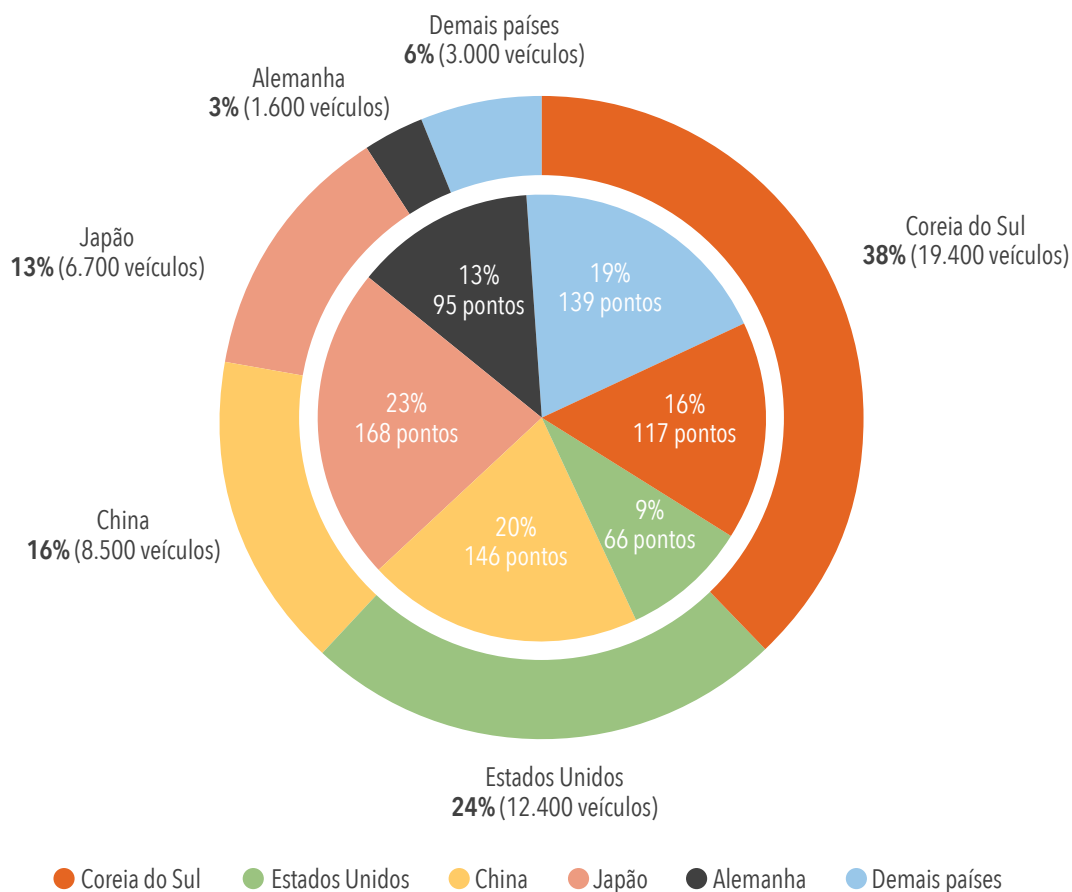
Fonte: Base de dados de projetos de hidrogênio da IEA (2022). Acesso em: 06 fev. 2022. Link de acesso: bit.ly/3JJ5psG

No mundo, existem 51.600 registros de VECC, conforme **Gráfico 3**, com concentração em países asiáticos – Coreia do Sul, China e Japão – somando mais de 60% da frota global. Destacam-se, também, os Estados Unidos, com 12.400 veículos registrados, e a Alemanha, único país europeu entre os maiores usuários de veículos movidos a hidrogênio, com 1.600 veículos.¹⁷ No Brasil, o uso desses veículos ainda está em fase piloto e seu único registro refere-se a um ônibus híbrido (bateria e célula de combustível) testado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.¹⁸

Concernente à infraestrutura disponível para abastecimento dos veículos utilizadores de hidrogênio, independentemente de sua fonte, existem 731 pontos de abastecimento, demonstrados no **Gráfico 3**, onde é possível observar a dominância do Japão (168 pontos), China (146 pontos) e Coreia do Sul (139 pontos), que possuem 59% das estações de abastecimento no mundo.

GRÁFICO 3

Registros de veículos leves e pesados movidos a célula de combustível (círculo externo) e de pontos de abastecimento de hidrogênio (círculo interno) (2021)



Fonte: IEA (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 08 fev. 2022. Link de acesso: bit.ly/40Hu2MI

No que se refere ao tempo de reabastecimento das estações de H₂, existe uma semelhança quando comparados aos de veículos reabastecidos nas estações tradicionais de diesel – de 3 a 5 minutos. Inevitavelmente, até que ocorra a consolidação desta tecnologia, o número de estações no Brasil terá uma presença tímida. A partir do aumento da demanda de H₂, uma cobertura maior de pontos de reabastecimento será necessária, o que, conseqüentemente, aumentará a disponibilidade de estações de carregamento para o modo rodoviário.¹⁹

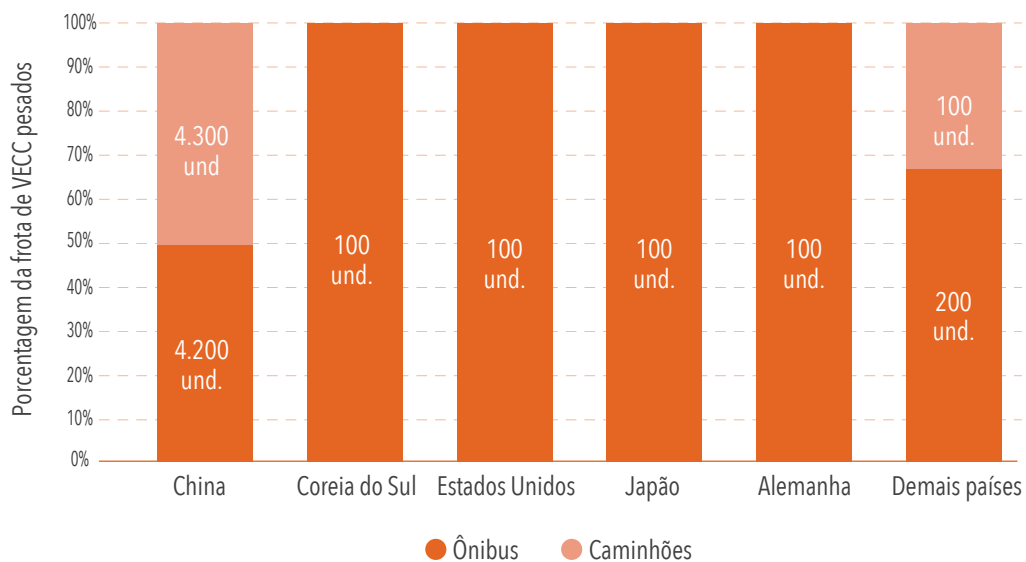
Quanto à segurança de uso desta fonte energética, as indústrias fabris já produzem o insumo em grandes escalas dispondo, inclusive, de padrões bastante seguros de armazenamento que podem ser replicados nos demais setores, como o do transporte. Seus riscos de periculosidade são considerados,

por especialistas, equivalentes aos de demais combustíveis inflamáveis (diesel, gasolina, etanol e gás natural). Essa equivalência pode ser explicada pelo fato de o conteúdo energético do hidrogênio nos tanques dos sistemas de motor do veículo ser menor em comparação ao volume utilizado por combustíveis convencionais.¹⁹

Considerando os veículos pesados movidos a hidrogênio verde, pode-se observar, conforme o **Gráfico 4**, que a China é o país com maior número de caminhões e ônibus com tecnologia de célula de combustível, contendo 4.300 unidades de caminhões (50,6%) e 4.200 unidades de ônibus (49,4%), contemplando 100% de sua frota de VECC. Já Coreia do Sul, Estados Unidos, Japão e Alemanha possuem apenas registros de ônibus movidos a hidrogênio, com 100 unidades cada, representando toda a sua frota. Os registros das demais nacionalidades indicam a predominância do transporte coletivo de passageiros na utilização de hidrogênio como fonte energética (200 unidades).¹⁷

GRÁFICO 4

Registros (unidades) de veículos pesados movidos a célula de combustível do modo rodoviário (VECC)



Fonte: IEA (2022), com adaptações da CNT. Acesso em: 08 fev. 2022. Link de acesso: bit.ly/3JYSKC6

APLICAÇÕES NO MODO RODOVIÁRIO

A comercialização de caminhões e ônibus pesados movidos a H₂ já ocorre em alguns países, oferecendo, assim, mais uma opção de tecnologia automotiva para os transportadores que buscam diversificar suas frotas. No Brasil, por exemplo, como forma precursora de hidrogênio na indústria automobilística, foi lançada para testes, em 2010, a primeira versão do ônibus H2+2.

Este veículo (**Foto 1**) é equipado com motor híbrido movido a hidrogênio e eletricidade, com capacidade para 69 passageiros e autonomia de 330 quilômetros, equivalente a modelos semelhantes movidos a diesel. O desenvolvimento da **carroceria Urbanuss Pluss**, da fabricante Busscar, foi realizado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe/UFRJ), em parceria com Furnasⁿ e Tracel,^o cujo preço de venda do ônibus era de R\$ 2 milhões, em 2017. Os testes demonstraram consumo médio de 6,7 quilogramas de H₂ a cada 100 quilômetros rodados com ar-condicionado ligado.²⁰ Com a conclusão dos testes, a UFRJ pretende lançar a sua versão comercial nos próximos anos.

Outro protótipo de ônibus movido a H₂ foi apresentado pela Marcopolo em 2022, no Salão Internacional do Automóvel (IAA, na sua sigla em inglês) realizado na Alemanha (**Foto 2**). A empresa desenvolveu a carroceria do veículo compatível com o modelo **Audace 1050**, cuja parte tecnológica das células de combustível com quatro baterias elétricas foi fornecida pela produtora Sinosynergy e o chassi, pelas fornecedoras Feichi Bus e Allenbus. O ônibus tem capacidade para transporte de até 53 passageiros e autonomia que pode chegar a 600 quilômetros, sendo fornecido nas versões com 11,9 e 12,6 metros de comprimento.²¹ O seu peso bruto total é de 19 toneladas e o seu motor entrega a potência de 143 kWh, devido aos quatro tanques de hidrogênio de 700 bar cada que alimentam as células de combustível, conferindo viagens silenciosas e estáveis.²²

Em relação ao transporte rodoviário de cargas, a montadora Daimler Truck, em 2023, com sua marca Mercedes-Benz, finalizou a realização de testes em seu primeiro veículo pesado movido a hidrogênio, chamado de **GenH2 Truck (Foto 3)**, inspirado no veículo convencional de longa distância Mercedes-

ⁿ Furnas Centrais Elétricas é subsidiária da Eletrobras, empresa privada de capital aberto. Atua na geração, transmissão e comercialização de energia elétrica e está presente em 15 estados e no Distrito Federal.

^o Tracel pesquisa e desenvolve equipamentos para a geração distribuída de energia solar, projetos de eficiência energética, microgeração hidroelétrica e grupos motor-gerador.

Benz Actros. O caminhão semirreboque com células de combustível passou por programas de testes em grandes altitudes, percorrendo vias públicas e atravessando o Passo do Brennero (localizado entre Áustria e Itália), uma das principais rodovias de tráfego mercantil da Europa. Nos testes, ficou comprovado que a **única emissão presente durante a trajetória foi vapor d'água**. A marca pretende lançar o veículo em 2027, comportando carga útil de 25 toneladas e peso bruto de 40 toneladas. A fabricante indicou que a autonomia do veículo poderá chegar a 1.000 quilômetros. Em seu interior, o protótipo conta com dois tanques de hidrogênio líquido, que somam 80 kg de capacidade, permitindo o transporte por longas distâncias.²³



Foto 1. Divulgação: CNN. 18 nov. 2021.
Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso:
bit.ly/3x8o21V



Foto 2. Transporte Mundial. 15 set. 2022.
Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso:
bit.ly/3YyMdlY



Foto 3. Tecnológica. 16 jan. 2023.
Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso:
bit.ly/3Yn6D1t

A Volvo também adicionou em seu portfólio a opção de veículo de emissão zero movido a hidrogênio renovável, com início de testes comerciais previsto para 2025. O caminhão (**Foto 4**) está sendo desenvolvido para operar com autonomia de mais de 1.000 quilômetros e tempo de abastecimento de 15 minutos. O peso bruto total do caminhão será de 65 toneladas, com duas células de combustível que gerarão 300 quilowatts de eletricidade.²⁴ Outro modelo de caminhão a H₂ foi projetado pela Cummins e apresentado na IAA 2022 (**Foto 5**). O modelo-conceito é de porte médio e tem a característica de possuir **motor a combustão interna de hidrogênio (B6.7H | H2-ICE)**, com peso bruto total na faixa de 10 a 26 toneladas e autonomia de até 500 quilômetros. O projeto foi idealizado de acordo com as características do caminhão **Mercedes-Benz Atego 4x2**, contando com 290 cavalos-vapor e armazenamento de hidrogênio a 700 bar. Os testes demonstram equivalência de performance ao de um motor a diesel de cilindradas semelhantes, com benefício adicional de um funcionamento silencioso durante a combustão.²⁵



Foto 4. Volvo Truck. 20 jun. 2022. Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3xaGMh5



Foto 5. Garagem360. 20 set. 2022. Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3xae0Cc

Em relação à eficiência, é importante ressaltar que os VECC dependem do tamanho dos tanques de armazenamento e seu material utilizado, tipo de trem de força e eficiência da célula de combustível para definir seus parâmetros de consumo e autonomia. Um estudo com caminhões tratores, realizado pelo Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT, na sua sigla em inglês), comparou a eficiência energética do tanque a roda (TTW, na sua sigla em inglês) entre veículos movidos a células de combustível, elétricos a bateria e diesel.

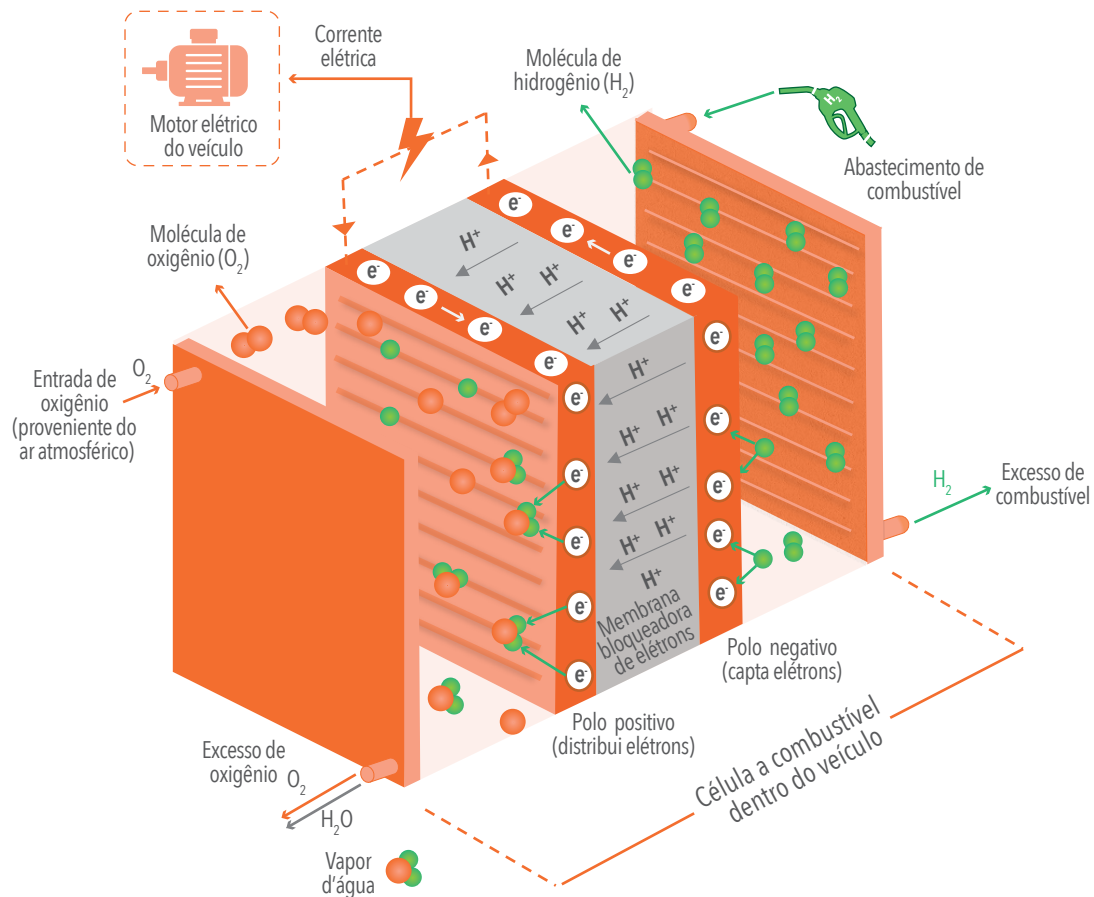
Nas simulações, os veículos passaram por ciclos de longas distâncias – carga útil^p de 19,3 toneladas e autonomia de 500 quilômetros – e de entregas locais – carga útil de 12,9 toneladas e autonomia de 300 quilômetros. Os resultados demonstraram que o consumo energético (kWh/km) dos veículos movidos a hidrogênio **foi 10% menor que o dos movidos a diesel**, com mesmas especificações, no cenário de longas distâncias. Quando considerado o cenário de entregas locais, o caminhão a hidrogênio passou a ter **redução de 20% de energia por quilômetro rodado** em comparação ao do ciclo diesel. As simulações mostraram, também, que os veículos elétricos a bateria apresentaram melhor eficiência entre os três modelos do estudo, cujo motivo foi explicado pela perda de eficiência energética associada aos processos de conversão de H₂ e diesel para energia útil.²⁶

Com base nos exemplos de modelos já existentes, é esperado que os transportadores no Brasil tenham, no futuro próximo, acesso à pronta-entrega de veículos pesados movidos a hidrogênio, tanto no modelo de combustão direta deste gás quanto no de células de combustível, cujo funcionamento é demonstrado no **Infográfico 4**.

^p Capacidade máxima de carga que um veículo consegue transportar, incluindo o peso do condutor, expressa em quilogramas.

INFOGRÁFICO 4

Funcionamento de uma célula de combustível movida a hidrogênio renovável inserida no sistema de motor do veículo



Fonte: *Hydrogen Forward* (2021), com adaptações da CNT. Acesso em: 14 mar. 2023. Link de acesso: bit.ly/3YQKasS

O esquema anterior demonstra que há processos eletroquímicos em dois ambientes da célula: na membrana bloqueadora de elétrons e nos polos positivo e negativo. Dentro deste sistema, as reações químicas separam os elétrons (e^-) do hidrogênio, responsáveis pela corrente elétrica alimentadora da bateria que fornecerá energia ao motor do veículo, permitindo, assim, que ocorra o seu movimento. Os prótons separados do hidrogênio (H^+) e os seus respectivos elétrons (e^-) reagem com o oxigênio (capturado pelo sistema do motor), formando moléculas de água (H_2O). A água gerada é expelida na forma de vapor, devido ao calor gerado a partir das reações ocorridas na célula.²⁷

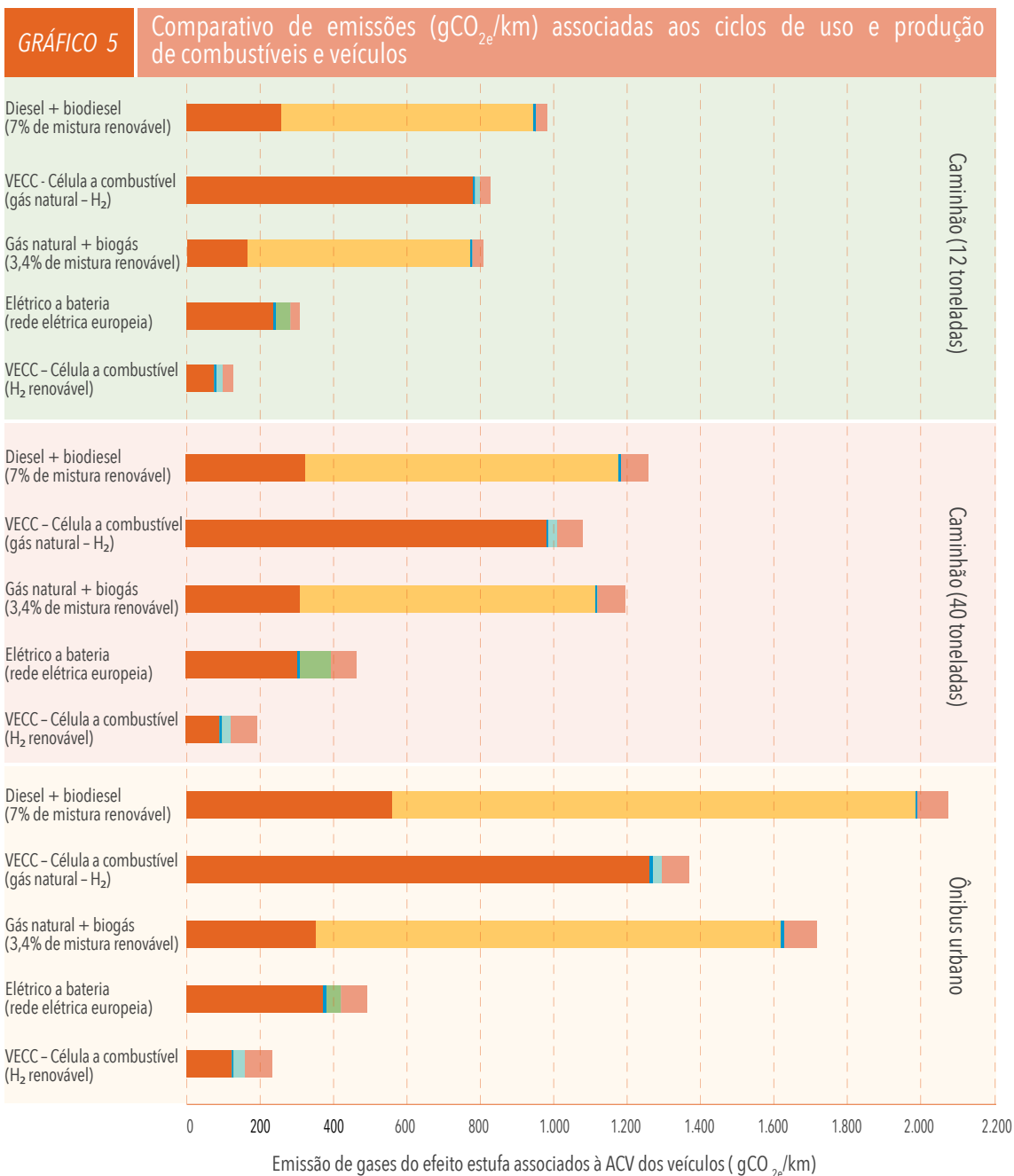
SALDO DE EMISSÕES

Veículos movidos a **hidrogênio renovável** têm emissão nula de escapamento, tornando-se uma fonte com grande **potencial para descarbonizar** o setor de transporte.

Para as análises do saldo de emissões, destaca-se a importância de se ter como base as matrizes energéticas. As parcelas de energia elétrica limpa ditam o caráter sustentável do processo de eletrólise para produzir hidrogênio. Países como o Brasil, cuja a matriz elétrica é majoritariamente composta por fontes renováveis, conta com vantagens na produção de hidrogênio verde, pois se posiciona como um dos grandes fornecedores de energia limpa possibilitando, inclusive, o seu protagonismo na exportação de renováveis.

Ainda sobre o saldo de GEE de veículos do modo rodoviário, um estudo do ICCT realizou uma comparação das emissões do ciclo de vida, demonstrada no **Gráfico 5**, considerando três tipos de veículos pesados: caminhão convencional de 12 toneladas, caminhão articulado de 40 toneladas e ônibus urbano. Além disso, considerou, também, os combustíveis utilizados para abastecimento, incluindo: diesel misturado com 7% de biodiesel de base éster, gás natural misturado com 3,4% de biometano⁹, eletricidade da matriz europeia e hidrogênio renovável.²⁸

⁹ O biometano foi considerado como o obtido a partir de resíduos ou de silagem à base de milho (plantas que são trituradas e armazenadas em silos para a sua fermentação).



Legenda:

- Produção de combustível/eletricidade ● Consumo de combustível ● Manutenção
- Fabricação da bateria ● Fabricação do tanque de H₂ ● Fabricação do veículo (exceto bateria e tanque de H₂)

Nota: As emissões provenientes da construção e manutenção de infraestruturas de produção e reciclagem de veículos; carregadores de veículos e pontos de abastecimento; infraestrutura rodoviária; e infraestruturas de transporte e distribuição de combustíveis não foram incluídas na avaliação por serem semelhantes para os três tipos de veículos considerados ou apresentarem pouca influência nas emissões totais de GEE do ciclo de vida, de acordo com o ICCT.

Fonte: ICCT (2023), com adaptações da CNT. Acesso em: 13 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3RXQSVc

O citado estudo considerou dois ciclos de contabilização de emissões. O primeiro, chamado de **ciclo de veículo**, que avaliou as emissões de GEE do berço ao túmulo^r da produção, manutenção e descarte de veículos, incluindo as baterias de veículos elétricos, o tanque de hidrogênio (com as células de combustível), o tanque de gás natural e demais componentes do veículo. O segundo, chamado de **ciclo de combustível**, incluiu as emissões associadas à produção de combustível ou de eletricidade e as suas emissões durante a operação veicular. A associação dos dois ciclos corresponde a uma abordagem sistêmica chamada Avaliação do Ciclo de Vida (ACV, no seu acrônimo), também conhecida como avaliação do berço ao túmulo.²⁸

Observa-se no **Gráfico 5** que os três tipos de veículos, incluindo os caminhões de 12 toneladas, de 40 toneladas e ônibus urbano poluem menos do que os demais, quando são abastecidos com hidrogênio renovável em células de combustível. As reduções são de aproximadamente 87%, 85% e 89% em relação aos movidos a diesel B7, respectivamente.

Foi igualmente possível constatar a redução de emissões comparando-se os veículos com células de combustível abastecidos com H₂ 100% renovável e os abastecidos com H₂ fóssil derivado de gás natural. Os caminhões de 12 e de 40 toneladas com H₂ fóssil de gás natural, avaliados no estudo, apresentaram emissões médias de aproximadamente 950 gCO_{2e} por quilômetro rodado e, quando abastecidos com **H₂ verde**, emitiram 160 gCO_{2e} por quilômetro rodado, representando uma redução de 83%. Para o ônibus urbano, obteve-se, também, um decréscimo de 83% de emissões entre o uso de hidrogênio fóssil e renovável.

Ainda no mesmo estudo, ao considerar somente as parcelas de emissões da categoria célula de combustível com **H₂ renovável**, nota-se que mais de 50% das emissões advêm da cadeia de produção de eletricidade para realizar a eletrólise. Tais emissões são associadas à produção de energia solar e eólica, que, apesar de serem renováveis, emitem pequenas parcelas de gases poluentes. As demais parcelas de emissão são originadas nas produções dos veículos e tanques de armazenamento de H₂, além de uma pequena contribuição oriunda das manutenções veiculares.

^r Denominado como o ciclo de vida de um produto, pois engloba todas as etapas de planejamento, aquisição da matéria-prima, produção, uso e descarte final pós-consumo, fechando o seu ciclo completo de vida, "do berço ao túmulo".

O **Gráfico 5** demonstra, também, que a maior parte das emissões em cada categoria de combustível é originada dos processos atrelados à produção e combustão da fonte energética. De modo geral, o ônibus urbano apresentou mais emissões de poluentes em relação aos demais tipos de veículo, em virtude de sua autonomia reduzida.²⁸

O estudo do ICCT constatou, ainda, que a eletricidade (de fonte renovável) tem um melhor desempenho de eficiência energética quando passa pela rede de transmissão elétrica, a fim de abastecer os veículos elétricos a bateria (VEB).²⁸ Já a mesma eletricidade utilizada na produção de hidrogênio verde e no abastecimento de VECC tem grandes perdas de energia, podendo ser três vezes maior que a utilizada nos veículos VEB, devido aos seus processos inerentes de produção, que envolvem a eletrólise, a compressão, o transporte, o armazenamento e o seu uso final.²⁹

Mediante o citado estudo, percebe-se que é muito importante o aumento da oferta de energias renováveis como a solar, eólica e hidráulica para a produção dedicada de hidrogênio verde no Brasil. O acréscimo de energia limpa na matriz nacional pode ser utilizado para abastecer VECCs, pois a parcela atual de renováveis (78,1%, conforme **Gráfico 1**), a princípio, é melhor aproveitada nos veículos elétricos a bateria, considerando a ineficiência energética atrelada à toda cadeia da tecnologia de hidrogênio.

Sob todo o exposto nesta edição, conclui-se que o hidrogênio verde será de suma importância para o desenvolvimento ambiental do setor de transporte, pois permite a redução considerável das emissões de GEE do segmento rodoviário, além de estimular a oferta de energia renovável para a eletromobilidade. Adicionalmente, o hidrogênio pode ser inserido em processos produtivos de demais fontes limpas, como o diesel verde, e utilizar a infraestrutura existente do sistema dutoviário nacional para a sua distribuição.

A fim de viabilizar o devido aumento da produção e uso de hidrogênio verde no Brasil é fundamental que haja, inicialmente, subsídios financeiros tanto aos produtores quanto ao setor de transporte, por meio de incentivos fiscais, empréstimos mediante financiamento com baixa taxa de juros e extensão de prazos, além de investimentos em estudos com o intuito de aumentar a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação do hidrogênio em suas aplicações nos veículos pesados de cargas e de passageiros no país.

VANTAGENS

- diminui as emissões de GEE do segmento rodoviário e pode levar à redução do aquecimento global e das mudanças climáticas;
- aumenta a oferta de novas fontes renováveis para abastecimento de caminhões e ônibus;
- expande as opções de veículos mais limpos para o transportador;
- possui mais energia por quilograma quando comparado aos demais combustíveis;
- impulsiona o Brasil em termos de liderança na produção e exportação de energia limpa;
- expande a economia verde nacional;
- aproveita as infraestruturas dutoviárias existentes;
- dispõe de tecnologias já existentes para a sua produção;
- estimula o aumento de oferta de energia renovável na produção de eletricidade;
- emite apenas vapor d'água em sua utilização veicular;
- permite viagens silenciosas e estáveis, por poder ser aplicado em veículos elétricos;
- exige apenas água e eletricidade em seu processo produtivo; e
- permite a produção de outros insumos comercializáveis, como a amônia.

DESAFIOS

- demanda grande quantidade de energia renovável, ainda em crescimento no país;
- necessita de quantidade considerável de água como matéria-prima;
- faltam regulamentações quanto às suas especificações e comercialização;
- enfrenta um mercado energético dominado pelos combustíveis fósseis;
- apresenta alto custo associado à sua produção, podendo ser repassado no preço final aos transportadores;
- depende de eletricidade limpa para categorizá-lo como renovável;
- conta com pouca oferta nacional;
- apresenta perdas energéticas na sua cadeia de produção, distribuição e utilização;
- demanda processo de liquefação para facilitar o seu armazenamento, o que aumenta o seu saldo de emissões e custos associados;
- exige infraestrutura de abastecimento ainda não consolidada no país;
- possui tecnologia de produção (eletrólise) ainda de baixa escala;
- conta com veículos pesados ainda na fase de testes; e
- requer elevado nível de segurança, por ser muito inflamável.

REFERÊNCIAS

- [1] KUMAR, S. S.; LIM, H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Reports**, v. 8, p. 13793-13813, 2022. Acesso em: 20 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3J5xb2m
- [2] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Hidrogênio turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. (Nota Técnica EPE/DPG/SPG/03/2022). Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3HOWTT9
- [3] IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Texto para discussão (TD) 2787. Rio de Janeiro: IPEA, 2022. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3H0K0Z5
- [4] MME. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2050**. Relatório final. Brasília: MME, 2020. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3iUjJnt
- [5] IEA. International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2023**. Flagship report. Paris: IEA, 2023. Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3D5puFK
- [6] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. (Nota Técnica EPE/DPG/SPG/02/2022). Acesso em: 23 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3wqpufu
- [7] IEA. International Energy Agency. **Hydrogen – Energy system overview**. Paris: IEA, 2022. Acesso em: 24 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3kDpEh7
- [8] CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2022. Acesso em: 25 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3kFi9Go
- [9] THYSSENKRUPP. **O potencial da amônia verde para o nosso clima**. Brasil: Thyssenkrupp, 2022. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3HFj29A

[10] PHV. Portal de Hidrogênio Verde. **No Brasil – Políticas públicas**. PHV, 2023. Acesso em: 31 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3DtZPGF

[11] MME. Ministério de Minas e Energia. **PNH2 – Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de Diretrizes**. Brasília: MME, 2021. Acesso em: 31 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/40fsDg2

[12] IEA. International Energy Agency. **Global Hydrogen Review 2022**. Paris: IEA, 2022. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3l2ebYw

[13] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2022**. Ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40JWTA3

[14] EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Oferta de Energia Elétrica: PNE 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. (Nota Técnica PR 003/22). Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3X1NVul

[15] IEA. International Energy Agency. **Hydrogen Projects Database**. Paris: IEA, 2022. Acesso em: 06 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3JJ5psG

[16] PHV. Portal de Hidrogênio Verde. **Por que o Ceará pode se tornar a capital do hidrogênio verde?** PHV, 2023. Acesso em: 31 jan. 2023. Link de acesso: bit.ly/3l8h2s3

[17] IEA. International Energy Agency. **Data and Statistics**. Paris: IEA, 2022. Acesso em: 08 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40Hu2MI

[18] IPHE. International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy. **Brazil**. IPHE, 2023. Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3li3y41

[19] HME. Hydrogen Mobility Europe. **Hydrogen Refuelling Infrastructure**. HME, 2023. Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40FXrGX

[20] DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Após cinco anos e R\$ 10 milhões, ônibus a hidrogênio do Rio está apto a operar comercialmente** (2017). Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3H0ldYH

[21] AUTOMOTIVE BUSINESS. **Marcopolo apresenta ônibus a hidrogênio na Alemanha** (2022). Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3YIMAjZ

[22] TRANSPORTE MUNDIAL. **Ônibus a hidrogênio: Marcopolo apresenta projeto internacional** (2022). Acesso em: 09 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3YyMdly

[23] BANCO MERCEDES-BENZ. **Mercedes-Benz Trucks apresenta perspectivas sobre o GenH2 Truck baseado em hidrogênio no IAA Transportation 2022, em Hannover** (2022). Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/40IDBe9

[24] VOLVO GROUP. **Volvo apresenta caminhão com células de combustível a hidrogênio na Europa** (2022). Acesso em: 10 fev. 2022. Link de acesso: bit.ly/40I3E5c

[25] GARAGEM360. **Conheça o caminhão conceito alimentado por motor a hidrogênio** (2022). Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3xaeOCc

[26] ICCT. International Council on Clean Transportation. **Fuel cell electric tractor-trailers: Technology overview and fuel economy**. USA: ICCT, 2022. Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3YjN1Ln

[27] CUMMINS. **O que é uma célula de combustível?** (2021). Acesso em: 10 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3JY0Hr5

[28] ICCT. International Council on Clean Transportation. **A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels**. USA: ICCT, 2023. Acesso em: 13 fev. 2023. Link de acesso: bit.ly/3RXQsvC

[29] BOSSEL, U. Does a hydrogen economy make sense? **Proceedings of the IEEE**, v. 94, n. 10, p. 1826-1837, 2006. Acesso em: 04 abr. 2023. Link de acesso: bit.ly/3K2mP28

