

2021

Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

Secretária Executiva

Marisete Fátima Dadald Pereira

**Secretário de Planejamento e
Desenvolvimento Energético**

Paulo César Domingues

Secretário de Energia Elétrica

Christiano Vieira da Silva

**Secretário de Petróleo, Gás Natural e
Combustíveis Renováveis**

José Mauro Ferreira

**Secretário de Geologia, Mineração e
Transformação Mineral**

Alexandre Vidigal De Oliveira



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

Heloísa Borges Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Angela Regina Livino de Carvalho

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - Ministério de Minas e Energia - Sala 744 - 7º andar - 70065-900 - Brasília - DF

Escritório Central

Praça Pio X, 54, Centro

20091-040 - Rio de Janeiro - RJ

Nota Técnica

Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio

Coordenação Geral

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Coordenação Executiva

Giovani Vitória Machado

Assessor de Diretoria

Jeferson Borghetti Soares

Superintendentes

Carla Achão

Elisângela Medeiros de Almeida

Superintendentes Adjuntos

Glauce Maria Lieggio Botelho

Gustavo Naciff de Andrade

Equipe Técnica

Gustavo Pires da Ponte

Luciano Basto Oliveira

Marcelo Costa Almeida

Mariana Lucas Barroso

Rodrigo Vellardo Guimarães

Nº EPE-DEA-NT-003/2021 rev01

14 de junho de 2021

Edição original: 23 de fevereiro de 2021

Índice

<u>1</u>	<u>Introdução</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>Panorama do Mercado de Hidrogênio</u>	<u>2</u>
<u>3</u>	<u>Rotas Tecnológicas e Processos de Geração de Hidrogênio</u>	<u>5</u>
<u>4</u>	<u>Custos e Aspectos Competitivos do Hidrogênio</u>	<u>10</u>
<u>5</u>	<u>Desafios para Desenvolvimento do Mercado de Uso Energético do Hidrogênio</u>	<u>16</u>
<u>6</u>	<u>Papel do Hidrogênio na Transição Energética</u>	<u>18</u>
<u>7</u>	<u>Considerações Finais e Implicações para Políticas Públicas</u>	<u>26</u>
<u>8</u>	<u>Referências</u>	<u>27</u>

1 Introdução

Após décadas sendo tratado como uma fonte de energia de grande potencial e disruptiva para o futuro, mas com significativos desafios tecnológicos e de mercado, o hidrogênio tornou-se um objetivo estratégico de governos e empresas em todo o mundo. Em particular, o mercado de hidrogênio ganhará *momentum* a partir de políticas energéticas pós-pandemia para a retomada da economia e para acelerar a transição energética em diversos países.

O hidrogênio já é relevante em termos econômicos atualmente. O mercado mundial de hidrogênio em valor econômico, em 2019, correspondeu à monta de USD 118 bilhões (GRAND VIEW RESEARCH, 2020) a USD 136 bilhões (MARKETS AND MARKETS, 2020). Ademais, espera-se um crescimento significativo desse mercado já nos próximos anos, que poderá alcançar montantes de USD 160 bilhões (GLOBAL MARKET INSIGHTS, 2020) a quase USD 200 bilhões (MARKETS AND MARKETS, 2020). A força motriz deste crescimento é a visão de governos e empresas do hidrogênio como necessário para viabilizar a descarbonização profunda da economia mundial, requerida para a consecução das metas do Acordo de Paris no horizonte 2050.

Assim, além dos mercados já tradicionais de fertilizantes, refino e outros usos (gases industriais e hospitalares), novos mercados para o hidrogênio poderão ser desenvolvidos nos segmentos de transporte, geração elétrica, armazenamento de energia e processos industriais, entre outros.

O hidrogênio pode ser utilizado diretamente como fonte de energia de baixo ou nulo carbono (a depender de seu processo de produção) em setores de difícil eletrificação e como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada de renováveis variáveis como a eólica, a solar etc. Nesse sentido, o hidrogênio é visto como um recurso com capacidade de promover o acoplamento dos mercados de combustíveis, elétrico, industrial e outros.

O objetivo dessa Nota Técnica é abordar aspectos conceituais e fundamentais para a construção da estratégia brasileira de hidrogênio. Para facilitar sua exposição, essa Nota foi dividida adicionalmente nas seguintes seções principais: panorama do mercado de hidrogênio; rotas tecnológicas e processos de geração de hidrogênio; custos e aspectos competitivos do hidrogênio; desafios para desenvolvimento do mercado de uso energético do hidrogênio; papel do hidrogênio na transição energética; e considerações finais e implicações de políticas públicas.

2 Panorama do Mercado de Hidrogênio

Em 2018, a demanda mundial por hidrogênio foi de 115 Mt, sendo 73 Mt de hidrogênio puro (IEA, 2019a). A produção de amônia para fertilizante e o refino do petróleo responderam por 96% da demanda de hidrogênio puro. Já a demanda por hidrogênio em misturas com outros gases foi de 42 Mt, sendo que a produção de metanol respondeu por 29%, a redução direta na indústria do aço respondeu por 7% e o restante em outros usos diversos. A Figura 1 mostra a evolução da demanda de hidrogênio puro e em mistura com outros gases, por aplicação.

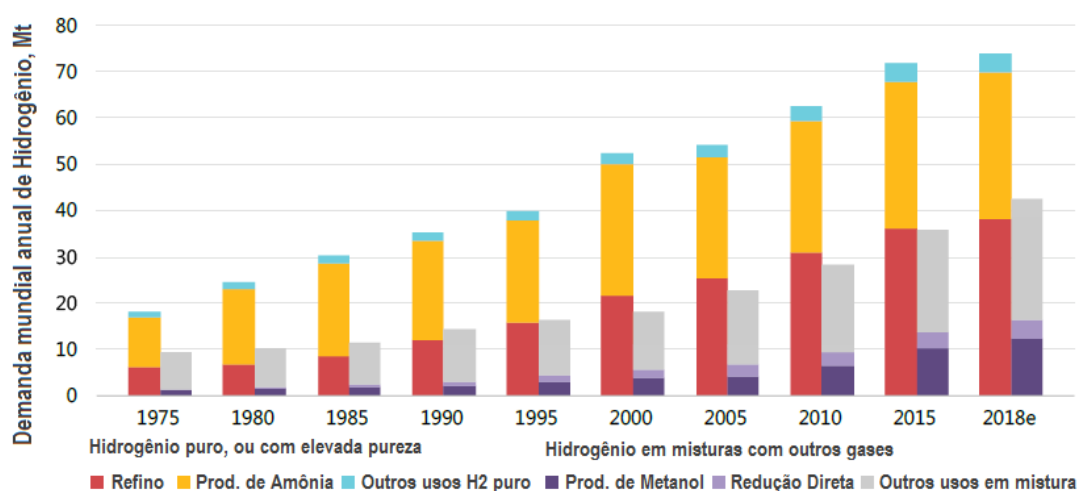


Figura 1 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio

Fonte: IEA (2019a)

O principal processo de produção de amônia (NH_3), intermediário importante para a produção de fertilizantes nitrogenados, é conhecido como processo Haber-Bosch, utilizando nitrogênio usualmente obtido a partir do ar e hidrogênio que pode ser oriundo de unidades de reforma a vapor do metano.

No refino, o hidrogênio é utilizado tanto no hidrocrackeamento de correntes de petróleo para a obtenção de maiores rendimentos em derivados mais nobres (leves e médios), quanto no hidrotreatamento para a especificação de combustíveis (particularmente, na remoção de enxofre, oxigênio, nitrogênio e metais). A demanda de hidrogênio nas refinarias cresceu nas últimas décadas à medida que: i) se buscou “destruir” a produção de óleo combustível nas refinarias (perda de mercado para o gás natural) e “recuperar” mais derivados leves e médios (maior crescimento dos mercados de gasolina, óleo diesel e QAV – querosene de aviação); e ii) regulações ambientais e de combustíveis mais severas para poluentes locais (SO_x , NO_x , metais etc.) requereram que as refinarias aumentassem a qualidade dos derivados de petróleo, removendo contaminantes para enquadrar os combustíveis nas normas de especificação.

O perfil de suprimento de hidrogênio para o refino varia por região, como mostra a Figura 2, ainda que se concentre na produção em unidades de craqueamento do refino, como coproduto do processo, e de reforma a vapor do gás natural (SMR - *Steam Methane Reforming*) no próprio sítio da refinaria.

Também se usa a gaseificação do carvão para a produção de hidrogênio nas refinarias, em particular na China. A produção de hidrogênio a partir de carvão também é importante na Austrália, que, inclusive, exporta para o Japão.

O fornecimento “*merchant*” (quando outro agente é responsável pela produção de hidrogênio, seja “*on site*” ou “*off site*”) para refinarias também é relevante no mundo, sobretudo nos EUA.

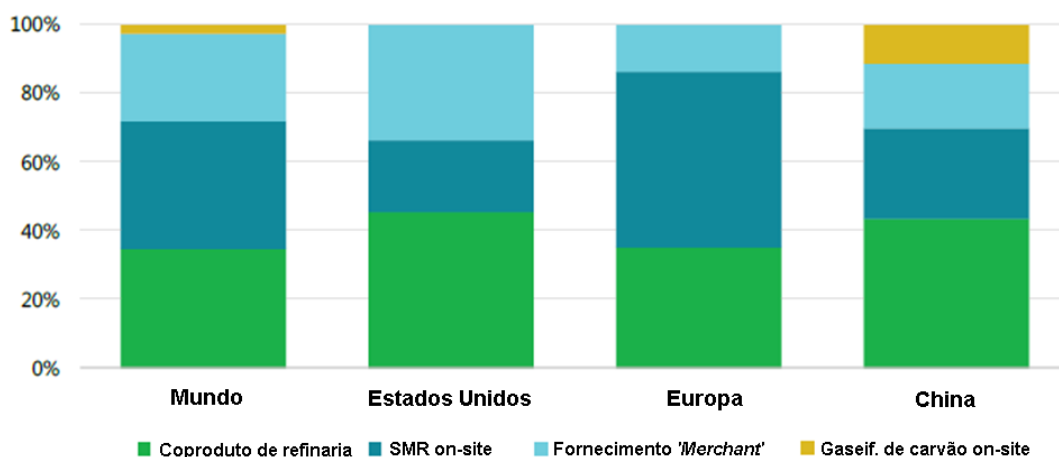


Figura 2 – Fontes de suprimento de hidrogênio para refinarias em 2018

Nota: SMR (*Steam Methane Reforming*): Reforma a vapor de metano

Fonte: IEA (2019a)

A existência de um mercado “*merchant*” para fornecimento de hidrogênio revela que existem agentes qualificados para atender qualquer novo mercado, e não apenas os autoprodutores. A atual capacidade instalada “*merchant*” é de 8,6 Mt/ano. A distribuição por regiões é mostrada na Figura 3.

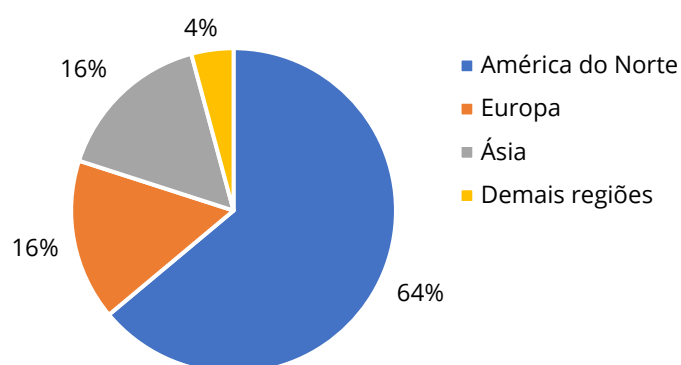


Figura 3 – Distribuição da capacidade instalada “*merchant*” para produção de hidrogênio

Nota: Dados de novembro de 2015 para Europa e de janeiro de 2016 para demais regiões

Fonte: Elaborados a partir de PNNL (2020a)

Entre os países, os Estados Unidos se destacam com 58% do total de capacidade de produção “merchant”. Canadá e China, cada, têm 6% e a Alemanha tem 4%. As principais empresas são a Air Products (36%), a Praxair (21%), a Air Liquide (21%) e a Linde (13%) (PNNL, 2020a).

Em termos de rota tecnológica para produção de hidrogênio, a reforma a vapor de metano é a tecnologia dominante com 73% da capacidade instalada mundial, como será retomado na próxima seção. E a principal forma de fornecimento do hidrogênio ao consumidor final é no estado gasoso (83%). Ressalte-se ainda que o hidrogênio comprimido responde por 16% (PNNL, 2020a).

Cabe destacar também que já há um mercado internacional de hidrogênio, embora esse represente menos de 10% do mercado total de hidrogênio em valor econômico. Em 2017, segundo dados do “*Observatory of Economic Complexity*” (OEC, 2020), o comércio internacional de hidrogênio movimentou cerca de USD 11,75 bilhões. Os maiores exportadores foram os Estados Unidos (USD 2,22 bilhões), a China (USD 1,75 bilhão), a Alemanha (USD 1,33 bilhão), a Coreia do Sul (USD 1,29 bilhão) e a Noruega (USD 580 milhões). Os maiores importadores, por sua vez, foram a China (USD 2,78 bilhões), o Japão (USD 1,71 bilhão), a Alemanha (USD 921 milhões), a Coreia do Sul (USD 789 milhões) e outros países asiáticos (USD 800 milhões). A participação do Brasil foi de USD 335 milhões de exportação e USD 61 milhões de importação.

Face às perspectivas de crescimento do mercado de hidrogênio para uso energético, espera-se também um significativo aumento do comércio internacional desse recurso. A União Europeia, em geral, e a Alemanha, em particular, já anunciaram políticas para financiar investimentos em plantas de hidrogênio em outros países a fim de contribuir para a consolidação do mercado mundial de hidrogênio para fins energéticos.

Por fim, vale destacar que as aplicações energéticas ainda são muito limitadas, por diversos fatores, como desafios tecnológicos de fontes de geração de hidrogênio de baixo carbono, custos de produção, custos dos equipamentos para uso energético do hidrogênio (inclusive aspectos relacionados à segurança), a dificuldade de transporte e armazenamento, necessidade de desenvolvimento de arcabouços institucionais, legais e regulatórios (desenho de mercado, normatização etc.), entre outros.

3 Rotas Tecnológicas e Processos de Geração de Hidrogênio

O hidrogênio pode ser obtido a partir de diversas matérias-primas e, também, de ocorrências naturais (geológico), através de variadas rotas tecnológicas. A Figura 4 ilustra, simplificada, estas rotas desde a produção até o uso do hidrogênio.

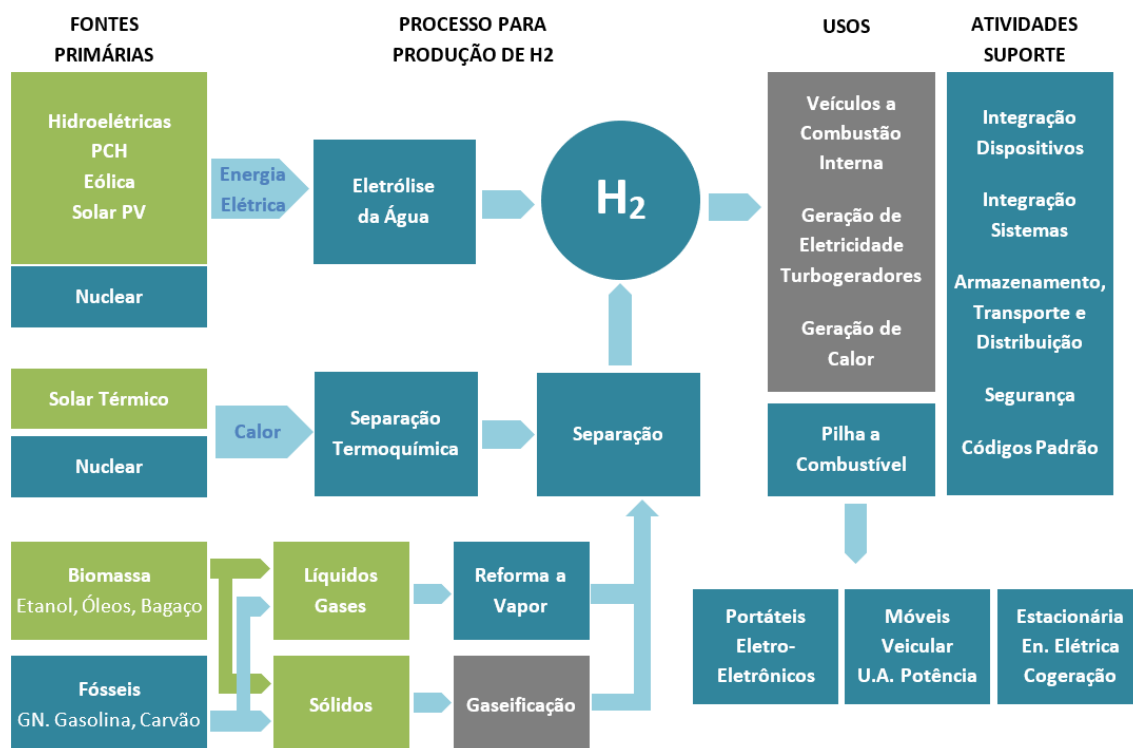


Figura 4 – Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio

Fonte: Elaborado a partir de CGEE (2010)

Entre as matérias-primas renováveis fornecedoras de átomos de hidrogênio, podem ser utilizadas a água (H₂O), a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano, por exemplo.

A conversão da água em hidrogênio é feita, principalmente, a partir da eletrólise. A eletricidade utilizada no processo pode ser de origem renovável (por exemplo, eólica, solar ou hidráulica), obtendo hidrogênio com baixo ou nulo teor de carbono. Duas tecnologias de eletrólise se destacam: a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM – *Polymer Electrolyte Membrane*).

Ciclos termoquímicos também podem ser utilizados para quebrar a molécula da água e produzir hidrogênio. Estas tecnologias exigem elevadas temperaturas e uso de substâncias intermediárias que podem ser regeneradas. As fontes de altas temperaturas cogitadas para esta aplicação são a nuclear e a solar concentrada. Esta tecnologia ainda está em desenvolvimento (IAEA, 2013; GUBAN et al., 2020).

A conversão de biomassa e biocombustíveis em hidrogênio, por sua vez, pode se dar através de processos de gaseificação, reforma ou processos biológicos. As características da biomassa, como menor conteúdo energético e maior umidade, tornam o processo de gaseificação mais desafiador que quando aplicado ao carvão mineral. Mas o processo é tecnicamente viável, como provam os veículos a gás que já transitaram pelas ruas no passado. O gás de síntese resultante da gaseificação, além do hidrogênio, também é rico em monóxido de carbono, requerendo uma etapa de separação para se obter hidrogênio puro.

A reforma de biocombustíveis é outra opção para produção de hidrogênio. Em especial, a reforma a vapor do etanol é bastante desenvolvida. Esta é uma opção relevante para o setor de transportes, pois evita as dificuldades associadas ao armazenamento do hidrogênio (MARIN NETO et al., 2004).

Dentre os processos biológicos, a biodigestão pode disponibilizar o metano a ser reformado, como ocorre com o gás natural, ou ser controlada para evitar a metanogênese, total ou parcialmente, e disponibilizar hidrogênio (SILVA et al, 2017).

A gaseificação e a reforma podem, igualmente, ser aplicadas às fontes não renováveis portadoras de hidrogênio. A gaseificação do carvão mineral e, principalmente, a reforma do metano são utilizadas, sobretudo, para atender refinarias, plantas de fertilizantes e de metanol. Como dado relevante, atualmente no mundo, a produção dedicada de hidrogênio é de 70 Mt por ano, sendo 76% a partir do gás natural e 23% do carvão mineral. A eletrólise da água responde por menos de 0,1% da produção dedicada. Entretanto, considerando também a produção de hidrogênio como coproduto, a eletrólise no processo cloro-álcali responde por cerca de 2% da produção global total de hidrogênio (IEA, 2019a).

Além das rotas tecnológicas de obtenção de hidrogênio mencionadas anteriormente, cabe destacar também a descoberta de reservatórios geológicos de hidrogênio natural em Mali (PRINZHOFER et al., 2018). Na natureza, diversos processos naturais podem resultar na produção geológica de hidrogênio, entre eles a radiólise da água, a serpentinização e a oxidação do minério de ferro (ZGONNIK, 2020). Ainda que já haja uma importante literatura científica sobre o tema, essa opção ainda é pouco conhecida e discutida no tocante ao seu aproveitamento econômico no mercado.

Uma descrição bastante rica dos diversos processos de produção de hidrogênio pode ser acessada em IAEA (2013), HOU et al. (2015), LÓPEZ et al. (2013), PARNELL & BLAMEY (2017), SILVA (2017) e CGEE (2010). Estas rotas, por sua vez, distinguem-se quanto à sua eficiência de conversão em hidrogênio, sendo apresentados, na Figura 5, os valores para os principais processos de produção de hidrogênio.

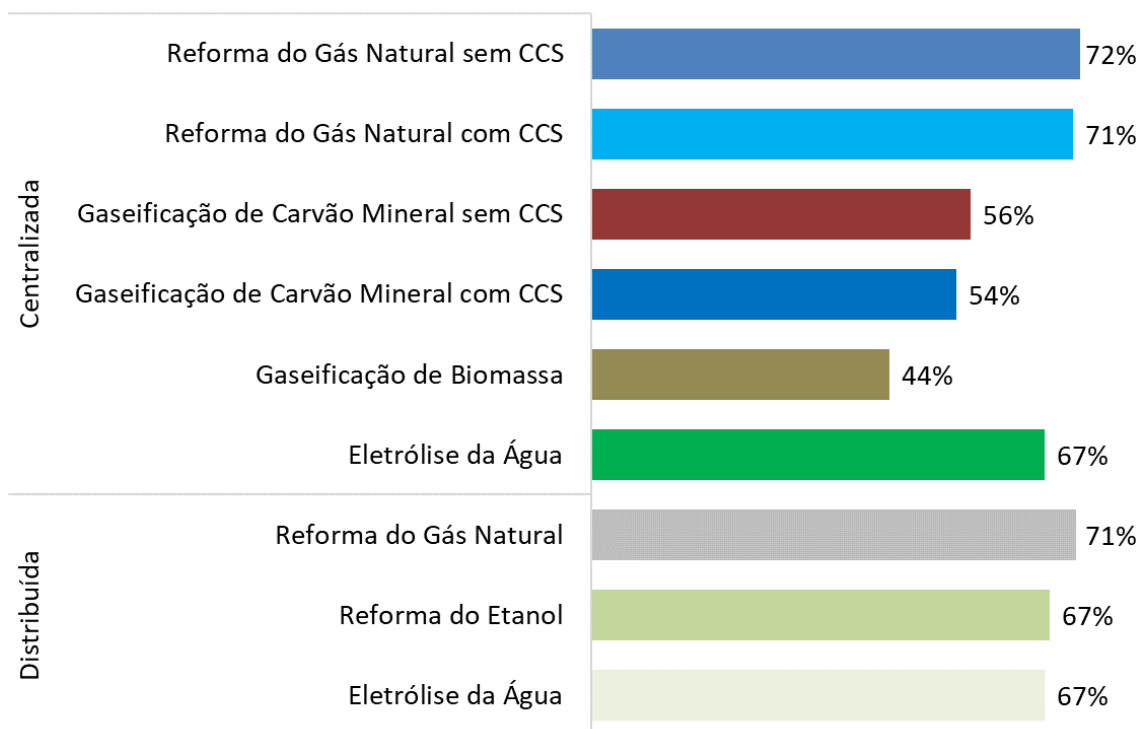


Figura 5 – Eficiências típicas de conversão em processos de produção de hidrogênio

Fonte: PNNL (2020b)

Outro aspecto importante a ser mencionado, é que no contexto da preocupação mundial com a descarbonização de sistemas de produção e consumo de energia, a sua transformação tendo o hidrogênio como principal vetor energético tem levado à busca por diferenciação do hidrogênio de acordo com a sua origem, bem como também ao eventual acoplamento ou não de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilisation and Storage*) a esses processos de produção de hidrogênio. A diferenciação das rotas tecnológicas de produção de hidrogênio, de acordo com a pegada de carbono, busca acoplar o diferencial por qualidade ambiental, possibilitando a existência de preço “prêmio”. Poder-se-ia citar, como exemplo similar, a eletricidade, cuja utilização independe da fonte de geração, mas cuja diferenciação (econômica) pode ocorrer ao se considerar a origem de sua produção como atributo para fins de políticas públicas (por exemplo: redução das emissões de gases de efeito estufa) e, também, precificação no mercado de energia elétrica. Outro exemplo é a diferenciação de preços de petróleo por diferencial de qualidade (densidade, teor de enxofre, teor de ácidos naftênicos e outros contaminantes).

Por sua vez, a diferenciação do produto hidrogênio, por pegada de carbono associada à sua produção, tem implicações diferentes em termos de contribuições à mitigação das emissões de gases de efeito estufa e prevenção das mudanças climáticas globais. Nesse contexto, ainda que sob o ponto de vista técnico possa ser mais apropriado diferenciar o hidrogênio através de um índice que reflita a pegada de carbono associada à sua produção, correntemente tem-se buscado

diferenciar essa origem de produção através do uso de jargões com referência à distinção de cores (IEA, 2019a):

- O “hidrogênio marrom ou preto” é aquele produzido de carvão mineral (de linhito é o “marrom” e de hulha ou antracito corresponde à cor “preta”) sem CCUS (captura, utilização e sequestro de carbono);
- O “hidrogênio cinza” é aquele produzido do gás natural sem CCUS;
- O “hidrogênio azul” tem se referido àquele produzido a partir de gás natural, mas com CCUS (eventualmente, se utiliza essa denominação também para o hidrogênio gerado a partir de outros combustíveis fósseis com CCUS);
- O “hidrogênio turquesa” é aquele produzido a partir da pirólise do gás natural, tendo como resultado hidrogênio e carbono sólido (também pode usar biometano, o que, quando se usa eletricidade renovável, resultaria nas chamadas “emissões negativas”);
- O “hidrogênio verde” tem sido definido, no jargão de mercado, como aquele produzido via eletrólise da água com energia proveniente de fontes renováveis variáveis (particularmente, energias eólica e solar).










Considerando que a classificação do hidrogênio em cores apresenta definições diferentes dependendo da referência, ressalta-se que o hidrogênio obtido por outras rotas renováveis não tem sido incluído no conceito de “hidrogênio verde” como, por exemplo, a eletrólise da água a partir de hidreletricidade e a pirólise, gaseificação ou a biodigestão da biomassa ou de resíduos. O mesmo ocorre com o hidrogênio gerado por rotas com fontes nulas em emissões de carbono como a energia nuclear (por vezes, chamado de hidrogênio rosa, por vezes chamado de hidrogênio amarelo). Há no mercado também menções a outras cores como o branco, referente ao hidrogênio natural ou geológico, e o turquesa, obtido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO₂ (H2-VIEW, 2020; BAKER MCKENZIE, 2020; ZGONNIK, 2020). Todavia, nem sempre os critérios são os mesmos e publicações diferentes utilizam, não raramente, certas cores para designar hidrogênio obtido por processos distintos (o amarelo, por exemplo, às vezes, é utilizado para nuclear, outras vezes para solar e outras ainda para o mix de eletricidade da rede). A Alemanha, em sua Estratégia Nacional, define o Hidrogênio Turquesa, produzido por pirólise do metano gerando C_(s) e não CO₂, como mencionado, desde que a fonte de calor seja neutra em carbono (GERMANY, 2020).

Até o momento da elaboração deste documento, não foi identificada na literatura uma taxonomia de rótulos definitiva e robusta para hidrogênio produzido por outras diferentes rotas tecnológicas, e nem jargões de mercado para todas as rotas definidas acima. Ao contrário, IEA (2019a) questiona o rigor técnico do uso de cores para definir o hidrogênio por rotas tecnológicas. Ainda assim, para facilitar a referência às outras rotas e utilizar os jargões de mercado usuais (marrom, cinza,

azul e verde), propõem-se para o hidrogênio produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica a cor musgo (com variações de tons de verde que podem ir do “amarronzado”, caso de alterações significativas do uso do solo, ao “esverdeado”, caso de carbono nulo ou negativo).

Com base no exposto acima, a Tabela 1 a seguir apresenta a síntese da classificação do hidrogênio em escala de cores.

Tabela 1 – Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: Elaborado a partir de IEA (2019a), H2-VIEW (2020), BAKER MCKENZIE (2020) e ZGONNIK (2020).

4 Custos e Aspectos Competitivos do Hidrogênio

O mercado de hidrogênio atingiu um novo *momentum* com anúncios por diversos governos de seus planos estratégicos para o aproveitamento desse recurso como elemento fundamental para a transição energética. Isto, porque o hidrogênio (H₂) tem vantagens como alta densidade energética, versatilidade de uso, ser um combustível sem carbono (*carbon-free*) e a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia.

Várias iniciativas foram criadas, então, para tentar viabilizar, em especial, o “hidrogênio verde” com foco em um duplo objetivo: recuperação da economia e aceleração da transição energética em segmentos de mercado de difícil descarbonização como, por exemplo, transportes pesados, aviação, aquaviário, siderurgia, fertilizantes, entre outros.

A União Europeia e, em particular, a Alemanha lançaram estratégias assertivas para o desenvolvimento de mercados para o “hidrogênio verde”, com a expectativa de acelerar as reduções de custos dessa rota tecnológica.

Não obstante, ao se levantar informações sobre custos e competitividade por rota tecnológica do hidrogênio, percebe-se a existência de uma escolha estratégica para o desenvolvimento de mercado:

- Por um lado, a rota tecnológica que teria maior facilidade de desenvolver novos mercados, por ser dominante e mais competitiva atualmente, é a reforma a vapor do metano do gás natural (“hidrogênio cinza”). Todavia, essa rota enfrentará riscos no futuro relacionados a eventuais restrições em um cenário de descarbonização profunda (plantas novas podem virar “ativos encalhados” – *stranded assets*) e de queda acelerada nos custos da eletrólise da água baseada em renováveis variáveis com eólica e solar, i.e., do “hidrogênio verde”;
- Por outro lado, a rota tecnológica do “hidrogênio verde” ainda é menos competitiva. Contudo, essa rota apresenta grandes oportunidades no futuro em um cenário de aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis (eólica e solar, particularmente). Os compromissos de descarbonização profunda das economias contribuem para este cenário.

De fato, os menores custos de produção de hidrogênio, atualmente, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, as quais consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. A eletrólise da água usando fontes renováveis (eólica e solar) é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado. Obviamente,

projetos em condições e locais específicas podem ser competitivos atualmente, explorando nichos específicos.

A Figura 6 apresenta faixas de custo de produção de hidrogênio, por algumas rotas tecnológicas, levantadas da literatura. Merece destaque a reforma do etanol, cujas faixas de custo de produção do hidrogênio já são competitivas com o uso do hidrogênio em estações de reabastecimento veicular (MORAES et al., 2019).

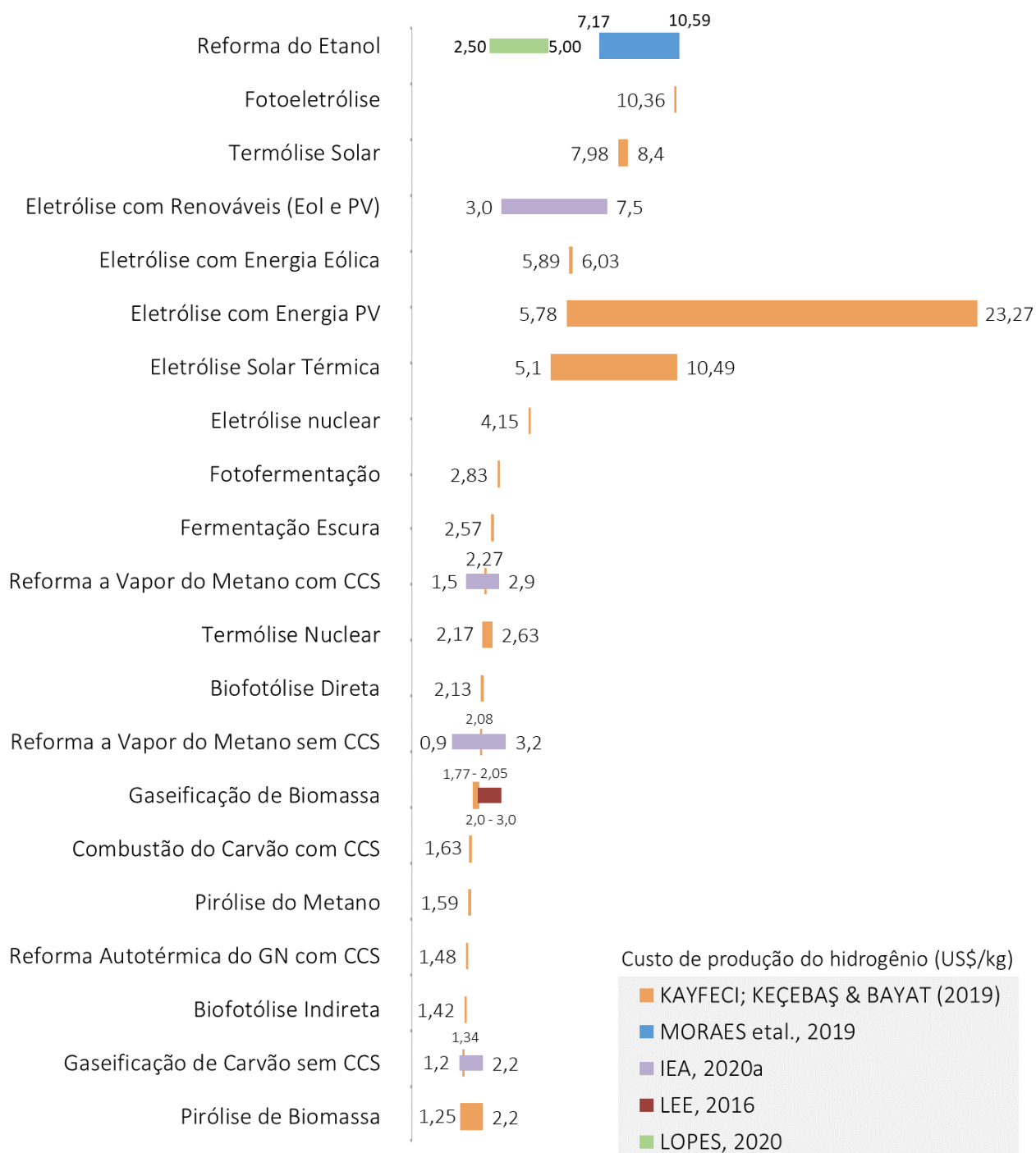


Figura 6 – Faixas de custo de produção de hidrogênio

Fonte: KAYFEÇI; KEÇEBAŞ & BAYAT (2019); IEA (2020a); LEE (2016)

É possível acompanhar a evolução dos preços do hidrogênio em alguns mercados. Recentemente, a *S&P Global Platts* iniciou o monitoramento do preço do hidrogênio por tecnologia e para algumas regiões do mundo (S&P GLOBAL PLATTS, 2020a). A Figura 7 mostra a curva de preços do hidrogênio, ao longo do primeiro trimestre de 2020, na Califórnia, para as tecnologias de Eletrólise PEM e Reforma a vapor do metano sem CCUS.

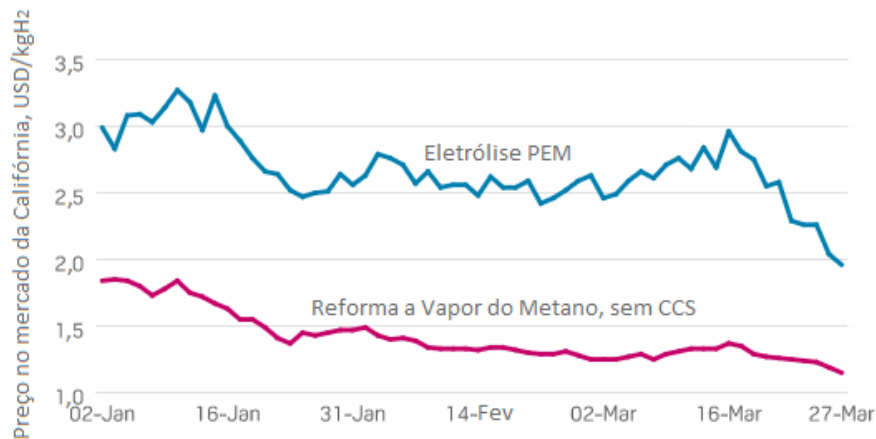


Figura 7 – Levantamento de preços do hidrogênio no mercado da Califórnia, Estados Unidos, por processo de produção, no primeiro trimestre de 2020

Fonte: S&P GLOBAL PLATTS (2020b)

Percebe-se que houve um estreitamento do diferencial de preços entre o hidrogênio obtido por eletrólise e aquele gerado por reforma a vapor do metano no final de março de 2020. Todavia, não é possível afirmar se é um efeito conjuntural relacionado, a influências assimétricas da pandemia no mercado, ou se é o início de um efeito mais estrutural relacionado à queda de custos da eletrólise.

Entretanto, estudos têm apontado para expectativas na redução significativa de custos até 2030. A *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF, 2020), por exemplo, projeta reduções de custos para a produção de hidrogênio de fontes renováveis e estima que esta tecnologia deva se tornar competitiva até 2030, ampliando sua vantagem sobre o hidrogênio de fontes fósseis até 2050, conforme apresentado na Figura 8.

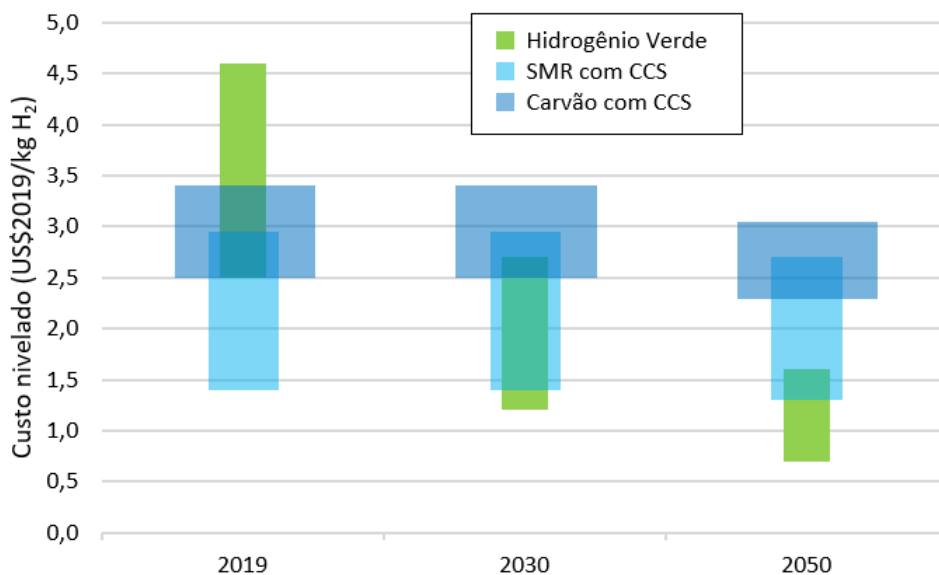


Figura 8 – Projeções das faixas de custo nivelado para projetos de grande escala.
 Fonte: Adaptado de BNEF (2020)

Neste estudo da BNEF (2020), a projeção para eletrólise com fontes renováveis considera projetos de grande porte com estimativas de redução de Capex significativas. Na produção via reforma a vapor do metano, assumiu-se um custo com gás natural de USD₂₀₁₉ 1,1 a 10,3/MMBTU. Para a gaseificação do carvão, foi adotada uma faixa de preços de USD₂₀₁₉ 30 a 116/t (BNEF, 2020).

Outro estudo aponta um potencial de redução de custos de produção de hidrogênio verde de quase 60%, até 2030. As componentes de custo Capex e Eletricidade representam as maiores oportunidades de redução (HYDROGEN COUNCIL, 2020). A Figura 9 apresenta estes valores.

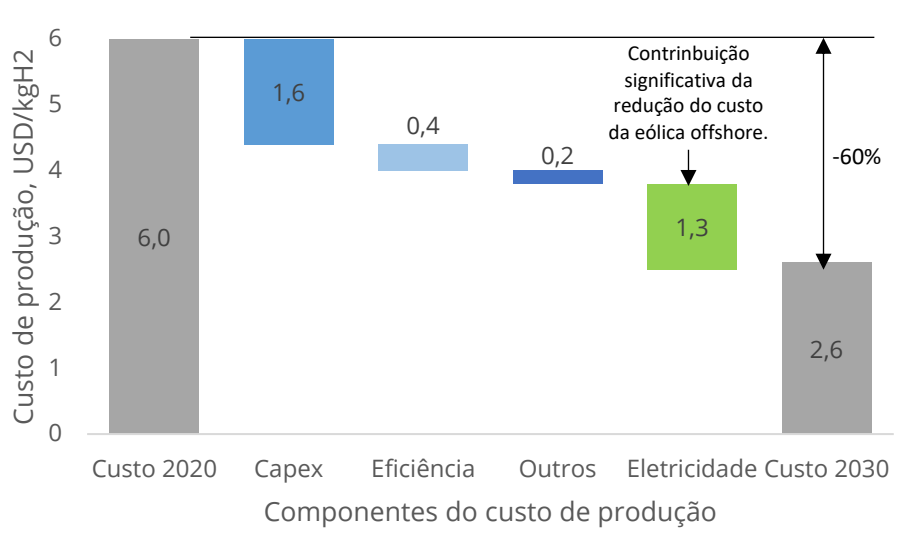


Figura 9 – Projeção de redução de custos de produção de hidrogênio a partir de eletrólise.

Fonte: HYDROGEN COUNCIL (2020)

Um estudo da IRENA (2019) também aponta a expectativa de que o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio de origem fóssil, antes de 2025, para os melhores casos. Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040. As curvas de projeção da evolução de custos são mostradas na Figura 10.

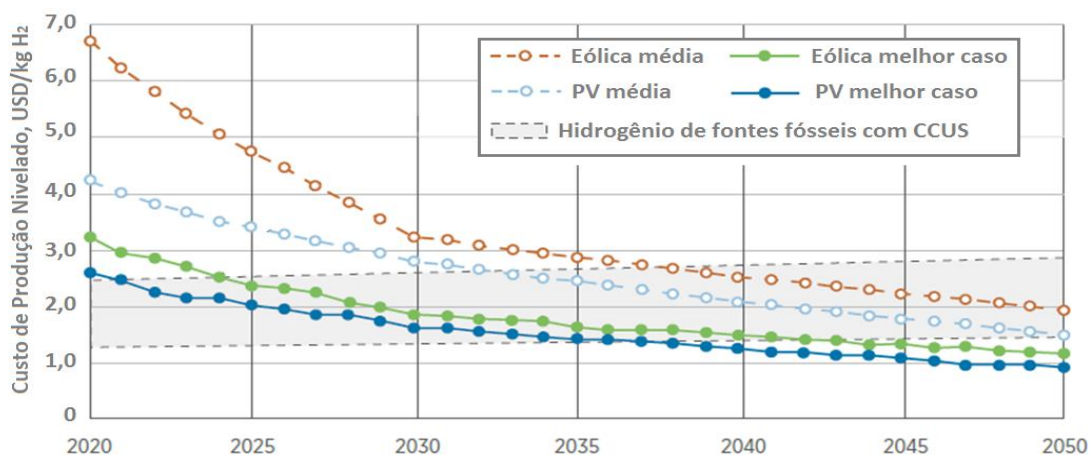


Figura 10 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio

Fonte: IRENA (2019)

A mesma trajetória de redução de custos do hidrogênio de fontes renováveis é identificada no relatório da HYDROGEN COUNCIL (2020). Este documento, que considera o Custo Total de Aquisição, Utilização e Manutenção (TCO – *Total Cost of Ownership*), analisa a competitividade do hidrogênio em 35 aplicações no horizonte de 2030. O uso do hidrogênio em 22 aplicações poderá se tornar competitivo, em condições favoráveis. Estas condições são específicas de cada aplicação e de cada região, e incluem um preço de carbono, a disponibilidade de outras fontes renováveis e a possibilidade de captura e sequestro de carbono. O documento também aponta que para acelerar a penetração do hidrogênio no mercado são necessárias ações governamentais, tais como desenvolvimento de estratégias nacionais, coordenação dos agentes do mercado para capturar oportunidades, promover uma regulação que elimine barreiras, padronização, investimento em infraestrutura e incentivos. No outro extremo, aplicações como uso em turbinas, matéria-prima para indústria e combustível sintético de aviação deverão requerer um preço de carbono de, no mínimo, USD 100/t CO₂-eq. para se viabilizarem. A Tabela 2 apresenta as 35 aplicações consideradas, agrupadas em mais ou menos competitivas, em relação a outras fontes de baixo carbono e em relação às fontes de energia convencionais utilizadas em cada aplicação.

Tabela 2 – Competitividade de aplicações do hidrogênio até 2030

Competitividade do hidrogênio Em relação às fontes de baixo carbono	H ₂ é mais competitivo	<ul style="list-style-type: none"> • Gerador de Back-up • Geração de vapor com rede de H₂ existente • Embarcações regionais de pequeno porte • Transporte de médio porte a longa distância • Adição à rede de gás natural • Turbina para carga flexível • Produção de metanol* • Produção de fertilizantes* • Refino de petróleo* • Turbina em ciclo combinado** • Aquecimento a médias temperaturas na produção de plásticos** • Aquecimento a altas temperaturas na produção de cimento** • Produção de ferro e aço** 	<ul style="list-style-type: none"> • Ferrovias regionais • Veículos Esportivos Utilitários • Frotas de táxi • Veículos de passageiros de grande porte • Empilhadeiras • Caminhões de médio e grande portes • Ônibus urbanos de longa distância • Transporte rodoviário de passageiros de longa distância
	H ₂ é menos competitivo	<ul style="list-style-type: none"> • Geração remota • Combustíveis sintéticos para aviação • Cogeração em prédios pequenos • Veículos urbanos compactos • Veículos médios de curta distância • Cargueiros <i>Ro-Pax</i>¹ • Geração de vapor com rede de H₂ nova • Turbina em ciclo combinado • Aquecimento a médias temperaturas na produção de plásticos • Aquecimento a altas temperaturas na produção de cimento • Produção de ferro e aço 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilitários para entregas urbanas • Ônibus urbanos de curta distância
		H ₂ é menos competitivo	H ₂ é mais competitivo
Competitividade do hidrogênio Em relação às fontes energéticas convencionais de cada aplicação			

Nota: * O hidrogênio é a única alternativa, e o hidrogênio renovável e o de baixo carbono (melhores casos) competem com o hidrogênio cinza. ** Sendo o CCUS não disponível para as emissões de fontes fósseis.
 Fonte: HYDROGEN COUNCIL (2020)

Posteriormente, HYDROGEN COUNCIL (2021) reafirmou as trajetórias identificadas em seu relatório de 2020, apontando aceleração da tendência de queda nos custos de produção de hidrogênio de fontes renováveis (60% de redução de 2020 a 2030). Segundo o documento, ao se introduzir os custos de carbono (USD 50/tCO₂ eq. em 2030, USD 150/tCO₂ eq. em 2040 e USD 300/tCO₂ eq. em 2050), o preço de indiferença (*breakeven*) entre o hidrogênio verde e o cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034.

¹ São embarcações para transporte simultâneo de veículos e passageiros (NORSHIPSALE, 2021).

5 Desafios para Desenvolvimento do Mercado de Uso Energético do Hidrogênio

A produção e usos industriais do hidrogênio no Brasil se encontram relativamente consolidados. Entretanto, o aproveitamento mais amplo de projetos energéticos baseados em hidrogênio demandará um aporte mais continuado de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, para que o país seja um ator relevante na Economia do Hidrogênio que se apresenta no horizonte. A difusão de novas tecnologias, o desenvolvimento de uma infraestrutura de produção, armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio inserem-se como tópicos de destaque a serem endereçados nesse contexto. Avanços na padronização e certificação de indústrias, e parcerias com países com tecnologias mais desenvolvidas também fazem, por certo, parte desta pauta (CÉSAR et al., 2019).

Para além da normatização de condições de segurança e do desenho e regulação de mercado, o principal desafio para o desenvolvimento do uso energético do hidrogênio é alcançar os níveis de competitividade com outras fontes a partir da redução de seus custos, em linha com as projeções dos estudos citados anteriormente.

No aspecto tecnológico, ao longo de todas as rotas há inúmeros desafios a serem superados, embora sua produção e utilização já seja realidade em nichos específicos, como no caso das empilhadeiras. Mas, o armazenamento do hidrogênio é um desafio à parte. Sendo a substância química mais leve que existe, aumentar a densidade energética por volume exige elevadas pressões para armazenamento no estado gasoso, ou criogenia para armazenamento no estado líquido. Tecnologias de armazenamento por adsorção requerem, atualmente, baixas temperaturas e elevadas pressões. Adicionalmente, o hidrogênio é um gás explosivo, o que afeta a percepção de risco.

Em relação à logística, a decisão entre produção centralizada ou distribuída do hidrogênio pode contornar a inexistência de uma rede de transporte e de distribuição. Eletrolisadores ou reformadores podem ser instalados próximos ao local de abastecimento ou consumo. Entretanto, o modelo de negócio deve ser decidido pelo mercado.

É essencial compreender o modelo de difusão do hidrogênio na matriz energética: 1) para se revelar a sequência de desenvolvimento de mercado, que catalisará sua indústria; 2) para evitar trancamentos tecnológicos em segmentos que poderão ser atendidos pelo hidrogênio no futuro, à medida que sua competitividade aumente (vide Figura 11); e, 3) para identificar o perfil de mercado atual do hidrogênio, por segmento.

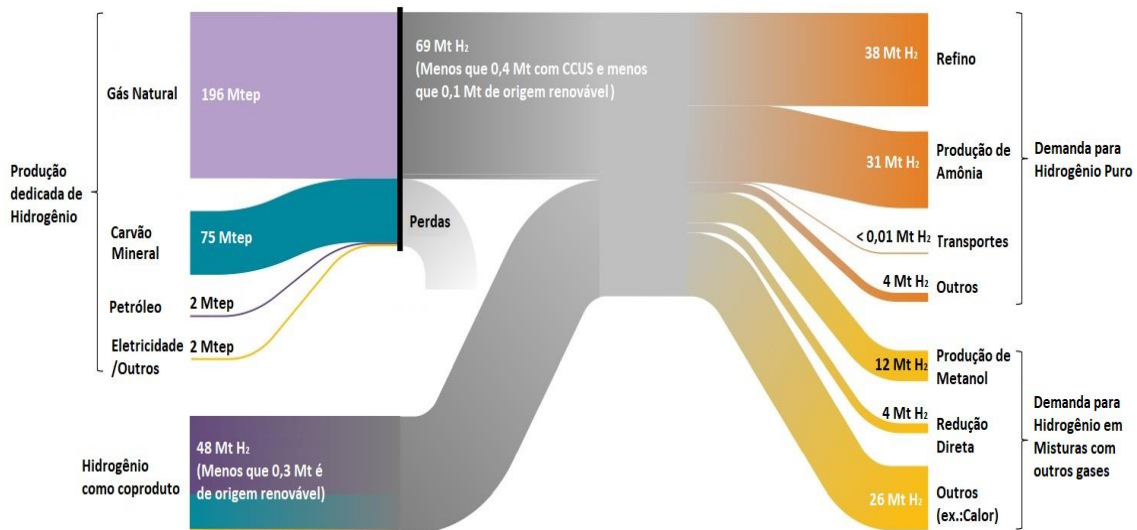


Figura 11 – Cadeia de valor do hidrogênio

Fonte: IEA (2019a)

A possível competição entre células² a combustível e baterias (e mesmo, ultracapacitores), especialmente no setor de transportes, suscita algumas questões. Por exemplo, haverá saltos tecnológicos (*leap frogging*) nos veículos a células a combustível e, conseqüente, superação de veículos elétricos a bateria (*forging ahead & falling behind*)? Ou, o padrão tecnológico dos veículos leves será a eletromobilidade a bateria?

O mesmo se aplica à armazenagem de energia para o setor elétrico. Além das usinas hidrelétricas (reservatório ou reversíveis) existentes no mundo, que outra tecnologia proverá a armazenagem de energia? Hidrogênio? Baterias? Ou combinações dessas tecnologias?

Um arcabouço institucional, legal e regulatório adequado ao uso energético do hidrogênio, ainda inexistente, também será necessário para dar segurança à indústria e aos consumidores. Qual será a governança institucional e legal? Quem regulará e fiscalizará o mercado? Quais normativos serão requeridos para assegurar condições de segurança, certificação de processos, de recursos humanos e especificação do combustível? Haverá trancamento tecnológico em rotas específicas de geração de hidrogênio? Todas essas questões precisarão ser equacionadas nos próximos anos, não só no Brasil, mas em todo mundo.

² Neste documento, se adota o termo “células a combustível”, em vez de “pilhas a combustível”, por ser mais comumente encontrado nos jargões de mercado e nos programas de governo.

6 Papel do Hidrogênio na Transição Energética

O mercado de hidrogênio, como já mencionado, tem ganhado *momentum* a partir de políticas energéticas pós-pandemia para a retomada da economia e para acelerar a transição energética em diversos países (IEA, 2020b).

Além de poder ser utilizado diretamente em setores de difícil eletrificação, como fonte de energia de baixo ou nulo carbono (a depender do processo), o hidrogênio também pode ser utilizado como vetor para armazenamento de energia, viabilizando maior entrada de renováveis variáveis como a eólica, a solar etc. Por sua versatilidade de uso e capacidade de armazenar energia, o hidrogênio é considerado um recurso com capacidade de promover o acoplamento entre os mercados de combustíveis, de eletricidade, industrial, entre outros. Nesse sentido, o hidrogênio poderá não apenas contribuir para a descarbonização profunda da economia mundial, mas também promover uma maior dinâmica competitiva, ampla e descentralizada ao acoplar os diferentes segmentos de mercado.

Não por outro motivo, a partir de 2018, vários governos nacionais anunciaram ou reforçaram estratégias e políticas para o hidrogênio (IEA, 2019b). Destaca-se que as estratégias enfatizam como desafio central para o hidrogênio verde a necessidade de redução dos custos.

Os EUA, que já tinham lançado, em 2002, sua visão (*A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy — to 2030 and Beyond*) e seu *roadmap* (*The National Hydrogen Energy Roadmap*) e, posteriormente, seus planos (*Hydrogen Posture Plan*, em 2006, e *The Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Plan*, em 2011), atualizaram e ampliaram sua estratégia em 2020, lançando o documento *The Department of Energy Hydrogen Program Plan*. O plano de 2020 definiu metas para que o hidrogênio e suas tecnologias relacionadas se tornem competitivas no mercado frente a seus concorrentes a partir dos avanços técnicos necessários para tal ao longo do horizonte 2050.

O Japão organizou o primeiro encontro Ministerial sobre Hidrogênio Energético, que resultou na Declaração de Tóquio definindo quatro áreas principais para acelerar o progresso da tecnologia do hidrogênio. Em março de 2019, o Japão alterou seu Mapa Tecnológico para Células a Combustível e Hidrogênio, definindo metas de custo mais quantitativas. A Austrália, em agosto de 2018, publicou um Mapa Tecnológico do Hidrogênio e anunciou planos de lançar sua Estratégia para o Hidrogênio em dezembro de 2019.

A Coreia do Sul anunciou seu Mapa Tecnológico do Hidrogênio, em janeiro de 2019, tendo como metas a capacidade de produção de 6,3 milhões de veículos elétricos a células a combustível e 1.200 estações de reabastecimento em 2040.

A França anunciou o Plano de Desenvolvimento do Hidrogênio para a Transição Energética em junho de 2018. O plano francês inclui metas de 20% a 40% de uso de hidrogênio de baixo carbono em aplicações industriais, e uma redução no custo da eletrólise para alcançar a faixa de 2 a 3 €/kg H₂ em 2028.

A Alemanha, que consolidou sua Estratégia Nacional do Hidrogênio em junho de 2020, reforçou o financiamento de mais de € 1 bilhão a ser aplicado em hidrogênio no âmbito do Programa de Descarbonização da Alemanha, entre 2020 e 2023, com adicionais € 7 bilhões para acelerar o desenvolvimento do mercado alemão e € 2 bilhões para dar suporte às parcerias internacionais, reconhecendo que o país necessitará de importações de grandes volumes para alcançar as metas estabelecidas de redução de emissões de carbono de sua economia (GERMANY, 2020).

Portugal aprovou, em agosto de 2020, o Plano Nacional de Hidrogênio que exhibe o hidrogênio verde como vetor relevante para a transição energética no país (PORTUGAL, 2020). Entre os objetivos até 2030, citados no documento, estão: 1) injeção de 10 a 15% de hidrogênio verde na rede de gás natural; 2) construção de 50 a 100 postos de abastecimento de hidrogênio; e, 3) construção de 2 a 2,5 GW de capacidade instalada de eletrolisadores.

6.1 As Oportunidades do Hidrogênio Brasileiro para a Transição Energética

O Brasil também tem demonstrado interesse no desenvolvimento do hidrogênio. Em 2002, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) lançou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível (inicialmente denominado PROCAC). Posteriormente, em 2005, este programa passou a ter nova denominação, passando a se chamar Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio, com a sigla PROH₂ (LINARDI, 2008).

Também em 2005, o Ministério de Minas e Energia (MME) coordenou o chamado “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”. Este foi um amplo estudo realizado juntamente com o Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT, dezenas de especialistas do Brasil e do exterior, empresas nacionais e estrangeiras, institutos e centros de pesquisa, agências reguladoras e institutos de metrologia (MME, 2005). Os temas tratados neste estudo foram:

- Bases para o Desenvolvimento do Mercado de Hidrogênio
- Produção de Hidrogênio
- Logística do Hidrogênio
- Sistemas de Conversão
- Aplicações do Hidrogênio como Vetor Energético

- Desenvolvimento Tecnológico e Formação de Recursos Humanos
- Metrologia, Normalização, Regulamentação Técnica, Avaliação da Conformidade, Regulação e Fiscalização

Em cada um destes temas foi feita uma contextualização e descrição da situação atual, descrita uma visão de futuro e de barreiras à sua implantação, avaliação da maturidade tecnológica e ações a serem implementadas.

O “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” (MME, 2005) já estabelecia algumas premissas relevantes para a orientação da estratégia nacional, entre as quais:

- A valorização de diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas, como: o etanol (não só pela reforma, mas também por oxidação direta em células a combustível), a eletrólise da água (utilizando-se a eletricidade secundária de hidroelétricas), e outras biomassas, além da cana de açúcar, incluindo-se o biogás.
- O reconhecimento do papel do gás natural para facilitar a transição para uma fase dominada por hidrogênio verde.
- A definição de uma lógica de difusão de mercado para o hidrogênio: a geração distribuída de energia, a produção de energia em regiões isoladas e os ônibus urbanos.

O documento também estabelecia um cronograma de 20 anos para o alcance de metas, relativo a cada tema proposto, e previa o lançamento de um Programa Governamental de Produção e Uso do Hidrogênio no Brasil após 2007. Posteriormente, o lançamento de um Programa Governamental foi previsto para após 2010, conforme mostra a Figura 12 (MME, 2009).

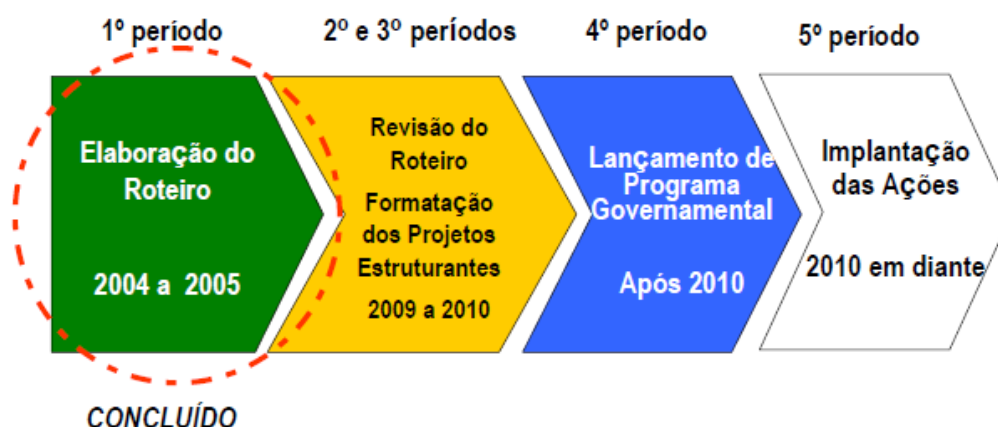


Figura 12 – Passos para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil
Nota: Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil - março 2005 (revisado)
Fonte: MME (2009)

A Figura 13 apresenta as principais prioridades do “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, com previsão do uso comercial do hidrogênio.

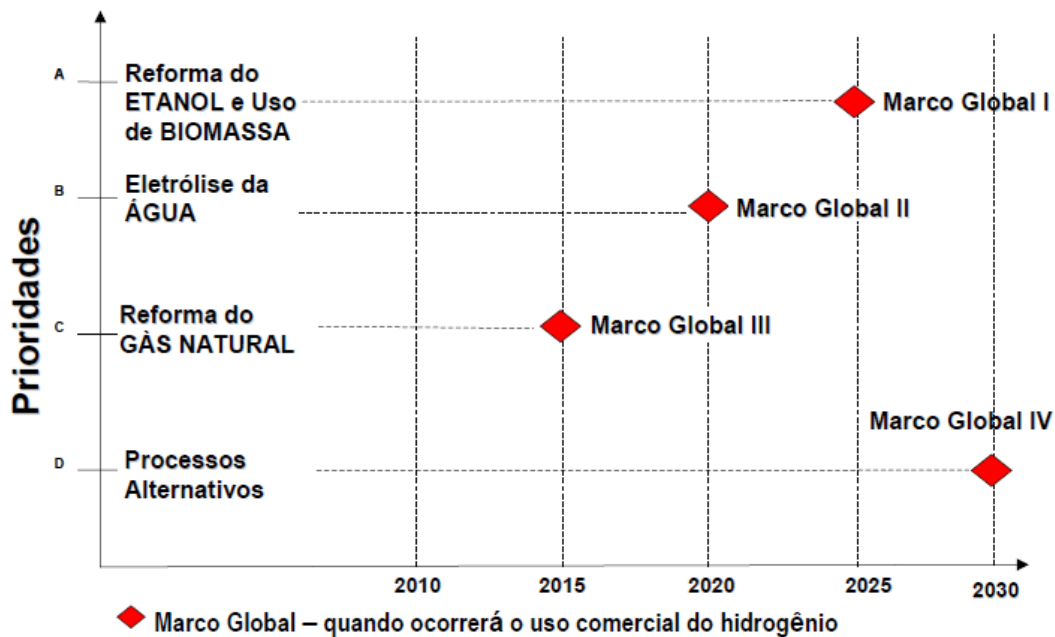


Figura 13 – Prioridades do Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil

Fonte: MME (2009)

Com as descobertas do Pré-Sal, em 2006, houve alteração de prioridades na agenda da política energética e o Programa Governamental de Produção e Uso do Hidrogênio no Brasil não foi lançado, ainda que diversos projetos associados ao hidrogênio continuassem sendo desenvolvidos.

De qualquer forma, é importante ressaltar que vários projetos tecnológicos, associando universidades, institutos de pesquisa e empresas, lograram desenvolver aplicações para a geração de hidrogênio. Exemplos desses projetos são: 1) CEMIG-Clamper, a Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), com a FIPAI-EESC-USP (Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial), a EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos) e o IQSC-USP (Instituto de Química de São Carlos), ambos da USP campus de São Carlos, e a UNITECH; 2) Itaipu Binacional-PTI (Parque Tecnológico Itaipu) em parceria com a UFPR (Universidade Federal do Paraná) e o TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná), através do CERBIO (Centro Brasileiro de Referência em Biocombustíveis); 3) o IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), que incubou a Eletrocell e mantém colaborações com o CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica) da Eletrobras, o CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello) da Petrobras, o INT (Instituto Nacional de Tecnologia), o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), a UNICAMP (Universidade

de Campinas), o IQSC-USP, e a UNESP (Universidade Estadual de São Paulo) campus de Bauru; 4) COPPE/UFRJ, que estruturou o Laboratório de Hidrogênio e o Núcleo de Referência em Tecnologia e Economia do Hidrogênio, com abrangência nacional, em parceria com o CEPEL/Eletronbras (VARGAS et al., 2006).

Ressalte-se também que, fruto do investimento em Pesquisa e Desenvolvimento em hidrogênio nas universidades Brasileiras, ao longo das últimas décadas, empresas inovadoras, incubadas em centros de pesquisa ou fundadas por pesquisadores, têm atuado com destaque na cena nacional e, também fora do país. Entre elas se destacam a Hytron³, a Ergostech, a BASE-Energia Sustentável⁴, a Electrocell e a Novocell (VALOR ECONÔMICO, 2019; MACEDO & VELA, 2020). Adicionalmente, o país conta com diversas empresas na cadeia automotiva, na indústria de gases e de energia que já desenvolvem soluções e produtos relacionados ao hidrogênio.

Cabe ainda destacar a relevância dos investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração (PD&D) no setor de energia, incluindo hidrogênio, os quais passaram a ser consolidados e mapeados a partir do projeto *Energy Big Push*, uma parceria entre EPE, MME, CGEE, CEPAL e diversos parceiros nacionais e internacionais, com destaque para a Agência Internacional de Energia (IEA). Um dos eixos do projeto dedicou-se à construção de uma base de dados de investimentos em PD&D públicos e publicamente orientados (regulados pela ANEEL e ANP), no período de 2013 a 2018, seguindo a classificação tecnológica já adotada pela IEA. Os resultados disponíveis nos recém lançados relatórios do projeto (CEPAL & CGEE, 2020) demonstram que o hidrogênio ainda apresenta uma parcela muito tímida dos investimentos em PD&D. Em 2018, foram apenas 0,9% dos investimentos públicos e 0,2% dos publicamente orientados.

A base de dados do *Energy Big Push* também permite aferir o perfil dos projetos de hidrogênio para algumas instituições (ANEEL, ANP e FNDCT). De 2013 a 2018, foram identificados 91 projetos associados a hidrogênio e células a combustível que acessaram recursos dessas origens da ordem de 34 milhões de reais. Pela análise dos resultados, percebe-se uma característica de projetos semelhantes nos programas da ANEEL e da ANP, tanto em termos de duração do projeto (~44 meses), quanto de volume financeiro acessado (na faixa de R\$ 1,5 milhão a R\$ 1,9 milhão). Já os financiamentos relacionados ao FNDCT são de menor prazo (~26 meses), mais numerosos (74 projetos), de menor porte financeiro (média de R\$ 76

³ A Hytron foi constituída em 2003, como uma *spin-off* da Unicamp, atuando em soluções na área de engenharia e integração de sistemas de energia e gás com foco em hidrogênio. E 2020, a Hytron foi adquirida pelo A NEUMAN & ESSER GROUP de Aachen na Alemanha (NEA GROUP).

⁴ A BASE-Energia Sustentável desenvolve projetos e presta serviços de consultoria em soluções de sustentabilidade, inclusive em projetos envolvendo hidrogênio como o da UHE Itumbiara, de Furnas.

mil) e mais vinculados à pesquisa básica. A Figura 14 apresenta os valores máximos, médios e a mediana de desembolsos para estes projetos, por fonte de recursos.

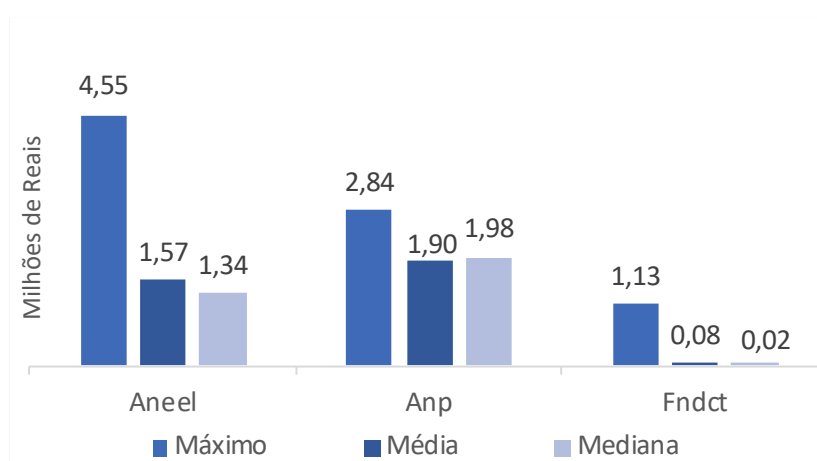


Figura 14 – Desembolsos para projetos em hidrogênio dos programas de P&D da Aneel, ANP e FNDCT.

Fonte: Banco de dados do projeto Energy Big Push Brasil (CEPAL & CGEE, 2020).

Em 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), sob comissionamento do MCTI, lançou o documento “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”, da série Tecnologias Críticas e Sensíveis em Setores Prioritários”. Nesse documento, foram apresentados os cenários internacional e nacional, considerações e discussões dos gargalos e propostas sobre quatro temas: 1) Economia do Hidrogênio; 2) Produção de Hidrogênio; 3) Desenvolvimento da Logística do Hidrogênio; e, 4) Sistemas de Utilização do Hidrogênio (CGEE, 2010). O documento apresenta um diagnóstico detalhado acerca dos gargalos, consistindo em um ponto de partida importantíssimo para a consolidação de um arcabouço institucional, legal e regulatório que precisa ser estabelecido para o florescimento de uma economia do hidrogênio.

Tanto o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, do MME, publicado em 2005, quanto o documento “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”, do CGEE, publicado em 2010, trazem elementos necessários para a consolidação da estratégia nacional de hidrogênio. Particularmente, apontam para uma estratégia que aproveite as vantagens competitivas do Brasil (etanol, hidreletricidade, eólica, solar, gás natural, nuclear, biogás e outras biomassas) para desenvolver novas vantagens competitivas na transição energética com foco no papel do hidrogênio. Uma estratégia na qual todas as cores importam, uma estratégia de Hidrogênio “Arco-íris”. Obviamente, haverá destaque para as rotas de baixo ou zero-carbono à medida que avance a transição energética e haja redução de custos nessas rotas e/ou precificação do carbono, alterando as participações de mercado e a competitividade das rotas tecnológicas.

Ressalte-se também que, no país, a ABNT vem discutindo a normatização de tecnologias de hidrogênio, da produção ao uso final, no âmbito da Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio - ABNT/CEE-067 (ABNT, 2021).

Em complemento às ações governamentais anteriormente citadas, podem ainda ser destacadas iniciativas de parcerias internacionais e projetos, visando acelerar a formalização da estratégia nacional de hidrogênio:

- Participação na Parceria Internacional para o Hidrogênio e as Células a Combustível na Economia (IPHE, na sigla em inglês), tendo sido o MME o primeiro representante do país e, atualmente, essa representação é exercida pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI);
- A partir da divulgação da Estratégia Alemã para o Hidrogênio em 2020, as parcerias desenvolvidas pelo MME com a Alemanha começaram a incorporar atividades voltadas para a identificação de possibilidades de cooperação em hidrogênio, especialmente no que se refere à oferta de hidrogênio verde para suprimento da demanda futura da Alemanha, tais como:
 - No âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha, o Estudo de Mapeamento Setorial do Hidrogênio Verde no Brasil pretende identificar os principais agentes da cadeia de valor do hidrogênio e oferecer uma visão das principais tecnologias para produção de hidrogênio verde e “Power-to-X” em desenvolvimento no país.
 - No âmbito do Projeto de Cooperação em Tecnologias para Armazenamento de Energia, está sendo desenvolvido um estudo para o levantamento do potencial de produção de hidrogênio verde no Brasil, a fim de subsidiar o desenvolvimento de um novo roteiro para a economia do hidrogênio no Brasil.
- Composição de Grupo de Trabalho Brasil-Chile para realização de estudo técnico-exploratório sobre o potencial de cooperação bilateral em hidrogênio. Destaca-se o interesse daquele país na produção local do denominado “hidrogênio verde”, com intenções de investimento nesse campo, da ordem de US\$ 200 bilhões nos próximos 20 anos.

Outras iniciativas de cooperação internacional estão em curso, seja em âmbito bilateral, seja em âmbito multilateral, a exemplo da *Hydrogen Initiative* (H2I) que se insere na *Clean Energy Ministerial* (CEM). Arranjo de diversos países com foco na promoção de energias limpas, do qual o Brasil participa.

Por fim, em fevereiro de 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) apontou o hidrogênio como um dos temas prioritários para pesquisa e desenvolvimento no país, visando à aplicação de recursos publicamente orientados. Posteriormente, em maio de 2021, foi publicada a Resolução CNPE nº 06/2021, que determinou a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, com prazo de 60 dias. O trabalho,

coordenado pelo MME, envolve também o MCTI, o MDR (Ministério do Desenvolvimento Regional) e a EPE.

Tal *momentum* tem gerado um ambiente de negócios bastante favorável, engajando diversos agentes para o desenvolvimento do mercado do hidrogênio. Em particular, face a significativa competitividade das renováveis variáveis (eólica e solar), no Brasil, tem havido especial interesse, por parceiros estrangeiros (destaque para a Alemanha) e empreendedores nacionais e internacionais, em desenvolver o hidrogênio verde no país. Boa parte do foco é no desenvolvimento de projetos para exportação do hidrogênio, diretamente ou indiretamente, na forma de amônia e metanol.

Nesse contexto, ressaltem-se anúncios de projetos de hidrogênio verde no Brasil. Em 19 de fevereiro de 2021, o Governo do Ceará tornou pública a parceria com a Federação das Indústrias do Estado Ceará (FIEC), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Complexo do Pecém (CIPP S/A), com a finalidade de desenvolver políticas públicas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável e para a configuração do HUB de hidrogênio verde no Estado do Ceará, bem como a assinatura de um Memorando de Entendimentos com a Energix para construir um planta de hidrogênio verde no Porto de Pecém, no Estado do Ceará (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2021). Em 16 de março de 2021, a Fortescue Future e o Porto do Açú tornaram público a assinatura de um Memorando de Entendimentos para desenvolver projetos industriais verdes baseados em hidrogênio, no Estado do Rio de Janeiro (PORTO DO AÇU, 2021). Em 31 de maio de 2021, o grupo Qair anunciou o início de estudos de viabilidade técnica e econômica para implementar uma unidade de produção de hidrogênio verde no Porto de Suape, no Estado de Pernambuco (VALOR ECONÔMICO, 2021).

6.2 O Hidrogênio no Plano Nacional de Energia 2050

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), aprovado em dezembro de 2020 pelo Ministério de Minas e Energia, tem o hidrogênio como parte da estratégia energética brasileira.

De fato, o hidrogênio é apontado no PNE 2050 como uma tecnologia disruptiva e é mencionado como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, da inserção dos recursos energéticos distribuídos, da busca por ampliação das formas de armazenamento e gestão da flexibilidade, das perspectivas de aplicação da energia nuclear e do gás natural.

No caso da inserção de veículos elétricos no setor de transportes, o PNE 2050 aponta como perspectiva tecnológica o uso de células a combustível, com hidrogênio produzido a partir de biocombustíveis líquidos, de metano do gás natural ou do biometano.

Outro ponto trazido no PNE 2050 é a perspectiva de mistura de hidrogênio nas redes de gás natural, em porcentagens e com pressões limitadas, para fins de

transporte e armazenamento, como forma de melhor utilizar essa infraestrutura e de disponibilizar volumes importantes de hidrogênio para fins energéticos.

No contexto do processo de descarbonização e da inserção do hidrogênio, o PNE 2050 destaca como recomendação para a política energética:

- Estimular as possibilidades que o uso do hidrogênio permite para a descarbonização de setores, tais como: indústria (química, siderurgia etc.), transportes, setor energético (inclusive pelos benefícios do armazenamento de energia), entre outros.
- Desenhar aprimoramentos regulatórios relacionados à qualidade, segurança, infraestrutura de transporte, armazenamento e abastecimento, bem como para incentivo e utilização de novas tecnologias.
- Articular iniciativas com instituições internacionais na área de hidrogênio.

O presente documento é um esforço de aprofundamento e atualização sobre o papel do hidrogênio na política energética brasileira e na determinação das ações requeridas nesse contexto, incorporando acontecimentos e desenvolvimentos recentes no cenário internacional.

7 Considerações Finais e Implicações para Políticas Públicas

O presente estudo buscou realizar um panorama da indústria do hidrogênio, seus desafios e oportunidades, incluindo os mais recentes documentos sobre a evolução tecnológica, de custos e das estratégias nacionais, bem como do levantamento do histórico de iniciativas no Brasil relativas ao Hidrogênio.

É notório que o Brasil tem um relevante histórico de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de produção e uso de hidrogênio. Ademais, o governo brasileiro já dispõe de importantes estudos estruturantes para formalizar sua estratégia nacional para o desenvolvimento do hidrogênio no país.

O país conta com atividades de pesquisa e desenvolvimento no tema, com vários grupos de pesquisas, em muitas universidades e outras instituições. Possui também empresas que já atuam no mercado de hidrogênio e uma associação que reúne empresas do setor e demais interessados (a Associação Brasileira do Hidrogênio - ABH2), a qual pode contribuir para o engajamento de agentes interessados na estruturação do arcabouço institucional, legal e regulatório, e de políticas públicas para promover uma economia do hidrogênio.

Mais do que estabelecer uma estratégia brasileira de hidrogênio, que já existe na prática desde 2002-2005, cabe consolidar e formalizar a estratégia nacional em um plano de ação específico do governo federal neste tema, atualizando as diretrizes e superando os desafios já identificados nos documentos elaborados no âmbito do MME e do MCTI. Por fim, como já mencionado, na estratégia brasileira do

hidrogênio todas as cores devem importar, em uma estratégia de Hidrogênio “Arco-íris”, que permita ao país aproveitar ao máximo suas vantagens competitivas existentes e construir novas vantagens competitivas em benefício de sua sociedade e em consonância com o desenvolvimento de uma economia com neutralidade líquida de carbono.

Na prática, isso significa que o Brasil deve abraçar as oportunidades de desenvolvimento das diversas tecnologias de produção e uso do hidrogênio, inclusive o hidrogênio “verde”, no qual pode ser bastante competitivo, mas não se limitando, exclusivamente, a este. Essa abordagem se mostra como a mais consistente e promissora para viabilizar uma trajetória de descarbonização profunda dos sistemas energéticos, acelerando a formação de mercados, evitando trancamentos tecnológicos e tirando proveito da diversidade de recursos energéticos do país.

8 Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). ABNT/CEE-067 - Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/cee-67>. Acessado em fevereiro de 2021.

BAKER MCKENZIE (2020). **Shaping tomorrow's Global hydrogen market**. Disponível em: <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2020/01/shaping-tomorrows-global-hydrogen-market>.

BNEF – *Bloomberg New Energy Finance* (2020). **Hydrogen Economy Outlook Key messages**. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>. Acessado em 16 de junho de 2020.

CEPAL (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe) e CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), (2020). **“Panorama dos investimentos em inovação em energia no Brasil: dados para um grande impulso energético”**, Documentos de Projetos (LC/TS.2020/62; LC/BRS/TS.2020/4), Santiago, 2020.

CÉSAR, Aldara da Silva; VERAS, Tatiane da Silva; MOZER, Thiago Simonato; DOS SANTOS, Danielle da Costa Rubim Messeder; CONEJERO, Marco Antonio (2019). **Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers**. *Journal of Cleaner Production*. Vol 207, pp. 751-763.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010). **Hidrogênio energético no Brasil**. Subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025, tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

GERMANY (2020). **The National Hydrogen Strategy**. *Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Public Relations Division*, 019 Berlin. Disponível em: https://www.bmbf.de/files/bmwi_Nationale%20Wasserstoffstrategie_Eng_s01.pdf.

GLOBAL MARKET INSIGHTS (2020). **Hydrogen Generation Market to hit \$160 billion by 2026, Says Global Market Insights, Inc.**. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/04/01/2009765/0/en/Hydrogen-Generation-Market-to-hit-160-billion-by-2026-Says-Global-Market-Insights-Inc.html>. Acessado em 31 de julho de 2020.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ (2020). **Governo do Ceará e instituições parceiras lançam HUB de Hidrogênio Verde**. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/02/19/governo-do-ceara-e-instituicoes-parceiras-lancam-hub-de-hidrogenio-verde/>. Acessado em 22 de fevereiro de 2020.

GRAND VIEW RESEARCH (2020). **Hydrogen Generation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Coal Gasification, Steam Methane Reforming), By**

Systems (Merchant, Captive), By Technology, And Segment Forecasts, 2020 – 2027.

Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydrogen-generation-market>. Acessado em 31 de julho de 2020.

GUBAN, Dorottya; MURITALA, Ibrahim Kolawole; ROEB, Martin; SATTLER Christian (2020). **Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies**, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 49: pp. 26156-26165.

H2-VIEW (2020). Hydrogen: Clearing up the colours. Disponível em: <https://www.h2-view.com/story/hydrogen-clearing-up-the-colours/>. Acessado em 7 de janeiro de 2020.

HOU, Tengfei; ZHANG, Shaoyin; CHEN, Yongdong; WANG, Dazhi; CAI, Weijie. (2015). **Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 44 pp. 132–148.

HYDROGEN COUNCIL (2020). **Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective**. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.

HYDROGEN COUNCIL (2021). **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf>.

IAEA – International Atomic Energy Agency (2013). **Hydrogen Production Using Nuclear Energy**. — Vienna: *International Atomic Energy Agency*.

IEA – International Energy Agency (2019a). **The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan**. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>.

IEA – International Energy Agency (2019b). **Tracking Energy Integration 2019**. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2019>. Acessada em 20 de junho de 2020.

IEA – International Energy Agency (2020a). **Hydrogen production costs by production source, 2018**. IEA, Paris. disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018> <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>. Última atualização em 6 de março de 2020.

IEA – International Energy Agency (2020b). **Tracking Energy Integration 2020**. IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration-2020>.

IRENA – International Renewable Energy Agency (2019). **Hydrogen: A renewable energy perspective**. (Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan). Abu Dhabi.

KAYFECI, Muhammet; KEÇEBAŞ, Ali; BAYAT, Mutlucan (2019). **Chapter 3 - Hydrogen production. Pages 45-83. In: Solar Hydrogen Production**. Editor(s): Francesco Calise, Massimo Dentice D'Accadia, Massimo Santarelli, Andrea Lanzini, Domenico Ferrero. Academic Press, ISBN 9780128148532, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000035>).

LEE, D. (2016). **Cost-benefit analysis, LCOE and evaluation of financial feasibility of full commercialization of biohydrogen**. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 42, número 41, Pages 4347-4357. Resumo disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915023575>.

LINARDI, Marcelo (2008). **Hidrogênio e Células a Combustível**. *Economia & Energia*. Disponível em: https://ecen.com/eee66/eee66p/hidrogenio_e_celulas_a_combustivel.htm. ISSN 1518-2932. Ano XI - No 66. Fevereiro - Março

LOPES, Daniel. (2020) (Sócio e Diretor da Hytron). **Produção de hidrogênio verde a partir de biocombustíveis pode acelerar a descarbonização do setor de transportes**. Entrevista ao Portal Mecânica Online durante BW Expo, Summit e Digital 2020. Disponível em: <http://mecanicaonline.com.br>. 20 de novembro de 2020.

LÓPEZ, Eduardo; DIVINS, Nuria J.; ANZOLA, Andrés; SCHBIB, Susana; BORIO, Daniel; LLORCA, Jordi (2013). **Ethanol steam reforming for hydrogen generation over structured catalysts**. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 38, número 11, pp 4418-4428. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319913003066>.

MACEDO, Gustavo Sigal; VELA, Jorge Alberto Alcalá (2020). **Prospecção e Rotas Tecnológicas Para a Energia do Hidrogênio no Brasil** (Capítulo 23). In: *Engenharia na prática: importância teórica e tecnológica*. Organizadora Franciele Braga Machado Tullio. – Ponta Grossa, PR: Atena.

MARIN NETO, Antonio José; DA SILVA, Ennio Peres; CAMARGO, João Carlos; NEVES JR., Newton Pimenta; PINTO, Cristiano Da Silva (2004). **Produção de Hidrogênio Através da Reforma-Vapor do Etanol para Aplicações em Células a Combustível. Protótipo de Primeira Geração**. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2004/Fscommand/PDF/Wicac/13-%20AntonioJMarinNeto.pdf>. AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída.

MARKETS AND MARKETS (2020). **Hydrogen Generation Market by Generation, Application (Petroleum Refinery, Ammonia Production, Methanol Production, Transportation, Power Generation), Technology (Steam Reforming, Water Electrolysis, & Others), Storage, and Region - Global Forecast to 2023**. (Acesso apenas à página na internet do documento). Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-generation-market-494.html>. Acessado em 31 de julho de 2020.

MME - Ministério de Minas e Energia (2005). **Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil**. (Coordenação geral: MME - Ministério de Minas e Energia; Integração Técnica: MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia; Operação: LACTEC/UFPR; Sub-coordenações: UNICAMP, CENPES, COPPE/UFRJ e INMETRO). Versão Beta.

MME - Ministério de Minas e Energia (2009). **Cenários para a estruturação da Economia do hidrogênio no Brasil**. Apresentação realizada por Marco Antonio Martins Almeida, Diretor do Departamento de Gás Natural da Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis do Ministério de Minas e Energia.

MORAES, Tamara Siqueira; DA SILVA, Hector Napoleao Cozendey; ZOTES, Luiz Perez; MATTOS, Lisiane Veiga; BORGES, Luiz Eduardo Pizarro; FARRAUTO, Robert; NORONHA, Fabio Bellot. (2019). **A techno-economic evaluation of the hydrogen production for energy generation using an ethanol fuel processor**. International journal of Hydrogen Energy. Vol 44, pp. 21.205-21.219.

NORSHIPSALÉ (2021). **Functionality and Uses of Roro And Ropax Vessels**. Disponível em: <https://www.norshipsale.com/functionality-and-uses-of-ro-ro-and-ropax-vessels/>.

OECD - The Observatory of Economic Complexity (2020). **Hydrogen**. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/hs92/2804/>.

PARNELL, John & BLAMEY, Nigel (2017). **Global hydrogen reservoirs in basement and basins**. Geochemical Transactions. Vol 18 (2) 2017.

PNNL - The Pacific Northwest National Laboratory (2020a). **Hydrogen Production**. (Planilhas: Merchant Hydrogen Plant Capacities in Asia, Merchant Hydrogen Plant Capacities in Europe, Merchant Hydrogen Plant Capacities in North America e Merchant Hydrogen Plant Capacities in the Rest of the World). The Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC). Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>.

PNNL - The Pacific Northwest National Laboratory (2020b). **Hydrogen Production**. (Planilha: Hydrogen Production Energy Conversion Efficiencies). The Hydrogen Analysis Resource Center (HyARC). Disponível em: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-production>. Acessado em 27 de maio de 2020.

PORTO DO AÇU (2021). **Fortescue Future Industries e Porto do Açu unem forças para desenvolver planta de hidrogênio verde no Brasil**. Disponível em: <https://portodoacu.com.br/fortescue-future-industries-e-porto-do-acu-unem-forcas-para-desenvolver-planta-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>

PORTUGAL (2020). **Plano Nacional do Hidrogênio**. Disponível em: <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc22/comunicacao/documento?i=plano-nacional-do-hidrogenio>. Acessado em 22 de fevereiro de 2020.

PRINZHOFER, Alain; CISSÉ, Cheick Sidy Tahara; DIALLO, Aliou Boubacar (2018). **"Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali)"**, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 42: 19315-19326. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319918327861>.

S&P GLOBAL PLATTS (2020a). **Hydrogen Price Assessments**. Disponível em: <https://www.spglobal.com/platts/plattscontent/assets/files/en/our-methodology/methodology-specifications/hydrogen-factsheet.pdf>. Acessado em 16 de junho de 2020.

S&P GLOBAL PLATTS (2020b). **Green hydrogen costs 'can hit \$2/kg benchmark' by 2030**. BNEF. Disponível em: <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/coal/033020-green-hydrogen-costs-can-hit-2kg-benchmark-by-2030-bnef>. Acessado em: 02 de junho de 2020.

SILVA, F.M.S; OLIVEIRA, L.B.; MAHLER, C.F.; BASSIN, J.P. (2017). **Hydrogen production through anaerobic co-digestion of food waste and crude glycerol at mesophilic conditions**. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 42, número 36, Pages 22720-22729. Resumo disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319917329956>.

SILVA, Fabrícia Maria Santana (2017). **Avaliação da Produção de Hidrogênio e Metano a Partir da Codigestão Anaeróbia de Resíduos**. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

VALOR ECONÔMICO - Empresas (2019). **Startups desenvolvem tecnologia para atender futura demanda pelo hidrogênio combustível**. (Por Andrea Vialli, Para o Valor, de São Paulo). 28 de março de 2019.

VALOR ECONÔMICO (2021). **Qair produzirá hidrogênio verde em PE**. (Por Marina Falcão, Para o Valor, do Recife). 31 de maio de 2021.

VARGAS, Reinaldo A; CHIBA, Rubens; FRANCO, Egberto G.; SEO, Emília S. M. (2006). **Hidrogênio: O Vetor Energético do Futuro?** Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2006/eventos/15435.pdf>.

ZGONNIK, Viacheslav (2020). "***The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review***", Earth-Science Reviews, Volume 203, 2020, 103140.

Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825219304787>.