



GESEL

Grupo de Estudos do Setor Elétrico

UFRJ

Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro

Nivalde de Castro
Sérgio Braga
Sayonara Eliziário
Maurício Moszkowicz
Eduardo Serra
Ana Carolina Chaves
Adely Branquinho
Florian Pradelle
Caroline Chantre
Rodrigo Campello
Vinicius Botelho

TDSE

Texto de Discussão do Setor Elétrico

Nº 100

junho de 2021
Rio de Janeiro

TDSE

Texto de Discussão do Setor Elétrico N° 100

Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro

Nivalde de Castro
Sérgio Braga
Sayonara Eliziário
Maurício Moszkowicz
Eduardo Serra
Ana Carolina Chaves
Adely Branquinho
Florian Pradelle
Caroline Chantre
Rodrigo Campello
Vinicius Botelho

ISBN: 978-65-86614-25-1

Junho de 2021

Sumário

Introdução.....	3
1 O hidrogênio como recurso energético do Século XXI	5
2 Produção e uso do hidrogênio.....	11
2.1. Principais aplicações do hidrogênio verde	13
3 Aspectos econômico-financeiros do mercado do hidrogênio.....	16
3.1. Perspectivas de investimentos	18
3.2. Custos de produção	20
3.3. Custos de transporte e distribuição.....	23
3.4. Receitas	25
3.5. Estruturas financeiras dos projetos	26
4. Perspectivas e oportunidades para o Brasil.....	28
4.1. Oportunidades e nichos de inserção.....	29
4.2. Desafios ao desenvolvimento	32
5. Considerações Finais.....	34
6. Referências Bibliográficas.....	36

Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro¹

Introdução

O hidrogênio verde (H2V) irá assumir um papel de vetor energético fundamental e estratégico para viabilizar a transição energética, nas próximas décadas, em direção a uma economia de baixo carbono, como se pode constatar pela quantidade e qualidade das políticas públicas e dos projetos firmados nos últimos anos (IRENA, 2019). Este processo de predominância do H2V decorrerá, principalmente, de três *drivers*:

- i. Redução de custos do hidrogênio (H2);
- ii. Compromissos nacionais de descarbonização; e
- iii. Possibilidade de uso diversificado.

Os países com disponibilidade e potencial de recursos energéticos renováveis apresentam pré-condições para serem criadas cadeias produtivas de H2V, gerando oportunidades econômicas e ampliando a segurança energética e a capacidade de descarbonização dos setores de difícil redução de emissões (ESMAP, 2020). Ademais, em alguns países com grande potencial de energia renovável em relação à capacidade instalada de geração de energia elétrica, como no Brasil, parte da produção de H2V poderá ser direcionada para o mercado externo, a fim de atender a demanda de países onde a transição de fontes fósseis para renováveis não pode ser atendida somente por recursos nacionais, como é o caso típico da União Europeia e, em especial, da Alemanha.

Diante deste cenário mundial instigante e promissor para o H2V, pode-se afirmar que a economia do hidrogênio irá configurar um novo paradigma energético mundial, no qual este recurso irá se transformar em um vetor energético central, permitindo a redução da dependência histórica de recursos não renováveis, como o carvão no Século XIX e o petróleo no Século XX (CASTRO *et al.*, 2021). Em suma, a centralidade da descarbonização no processo de transição energética

¹ Este estudo foi desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, vinculado ao projeto de pesquisa APLPED00498_PROJETOPED_2001_S01-2020 que está sendo executado, com o apoio financeiro da empresa Guascor, pelo GESEL e pela PUC-Rio. Os autores agradecem as contribuições dadas pelos pesquisadores: João Azevedo, Renata Nohra, José Vinícius Freitas, Allyson Oliveira, Kalyne Brito e Luana Bezerra. No entanto, merece ser destacado que a análise e as opiniões formuladas não expressam, necessariamente, a posição das instituições envolvidas e dos pesquisadores citados, sendo da responsabilidade exclusiva dos autores.

e os objetivos de mitigação das mudanças climáticas e de sustentabilidade evidenciam o H2V como um recurso energético central para a economia, em um futuro próximo.

Posto isto, o presente estudo tem como objetivo central analisar as principais oportunidades para o desenvolvimento tecnológico, a produção e o consumo do H2V, identificando, também, os desafios para a sua difusão, a partir da coleta de elementos das experiências internacionais e da análise da dinâmica nacional. Como objetivos específicos, são analisadas suas principais aplicações e usos, as perspectivas da economia do hidrogênio e, por fim, um panorama internacional deste mercado.

O texto está dividido em seis seções, sendo a primeira esta introdução. Na segunda seção, são sistematizadas as principais motivações para a consolidação do H2V como o recurso energético do Século XXI. A Seção 3 examina as rotas tecnológicas mais relevantes de produção do H2, com destaque para o H2V, suas aplicações e usos, que justificam o crescente interesse neste vetor energético no contexto da transição energética. A análise econômica é realizada na Seção 4, com foco nas variáveis de custos e investimentos, bem como no potencial do mercado de H2 no contexto global. Na Seção 5, são examinadas as perspectivas e oportunidades para o Brasil e, por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais.

1 O hidrogênio como recurso energético do Século XXI

À medida que a necessidade de mitigação da mudança climática se acentua, formuladores de políticas públicas, agências reguladoras, centros de pesquisa e grupos econômicos buscam maneiras efetivas de atingir a neutralidade das emissões de gases do efeito estufa (GEE) até 2050, com base em compromissos firmado por vários países no contexto do Acordo de Paris.

Diante deste cenário mundial, o H₂ vem se configurando como um dos principais pilares para garantir o sucesso do processo de transição energética mundial, dada a capacidade de viabilizar os múltiplos objetivos e metas de descarbonização (EL-EMAM; ÖZCAN, 2019). Apesar de ser um elemento abundante na natureza, a obtenção do H₂, enquanto recurso energético, ainda enfrenta dificuldades, especialmente no que tange a sua produção e transporte (ABDIN *et al.*, 2019; LIU *et al.*, 2020).

O termo “economia do hidrogênio” vem sendo utilizado para descrever o paradigma econômico emergente, baseado no uso em larga escala do H₂ como vetor energético central para atender a demanda crescente por energia e reduzir as emissões de GEE (CGEE, 2010; PANDEV *et al.*, 2017). A economia do hidrogênio pressupõe, portanto, o gradativo uso do H₂, em escala comparável aos combustíveis fósseis, no sistema energético vigente até o início do Século XXI (EL-EMAM; ÖZCAN, 2019).

Em função das projeções de oferta crescente de energia proveniente de recursos renováveis, a produção do H₂V, via eletrólise da água, vem recebendo atenção analítica no contexto internacional (ABDIN *et al.*, 2019). Reitera-se, assim, que o H₂V tende a ser decisivo para atingir as metas de redução de emissões de GEE, especialmente em setores produtivos de maior complexidade energética, como os setores da indústria e de transporte, os quais, juntos, correspondem a cerca de 45% das emissões relacionados à energia em todo o mundo (SGOBBI *et al.*, 2016; IEA, 2020a).

Adicionalmente, o hidrogênio, enquanto vetor energético, amplia as possibilidades para flexibilização da operação dos sistemas elétricos, permitindo o uso mais eficiente de ativos de geração convencionais e renováveis (PANDEV *et al.*, 2017). No processo de transição atual, a estabilização e a flexibilidade fornecidas pelo H₂ tornam-se importantes ativos para a segurança energética. Ademais, as sinergias do H₂ com outras alternativas de baixo carbono também representam uma oportunidade para que a transição para sistemas energéticos descarbonizados seja mais eficiente e competitiva (BRANDON; ZURBAN, 2017).

Ainda inserido no contexto da transição, a busca da neutralidade climática resulta no reconhecimento de uma abordagem sistêmica que inclua as principais fontes de emissões de GEE, como a geração de energia, o transporte, os processos industriais e o aquecimento (FRENCH, 2020). Desta maneira, o H2 poderá atuar na integração de diferentes infraestruturas energéticas, ampliando a eficiência econômica, a confiabilidade, a flexibilidade e a resiliência, bem como reduzindo possíveis impactos ambientais.

Neste sentido, há um consistente processo de ampliação nas políticas públicas acerca dos objetivos sistêmicos para os quais o H2 pode agir e contribuir de forma decisiva (IEA, 2020b). A título de exemplo, o uso da tecnologia *Power-to-X* associada ao H2 permite não apenas a redução da dependência dos consumidores finais de recursos energéticos específicos, mas também a ampliação da resiliência da oferta energética e, de modo geral, o fornecimento de uma tecnologia de armazenamento, estratégica em um mundo eletrificado e com crescente participação de fontes intermitentes (IEA, 2019).

Por outro lado, dado que o processo de descarbonização é liderado pelo setor energético, mas engloba uma variedade de estratégias que compreendem todo o sistema econômico, o desenvolvimento acelerado de novas tecnologias disruptivas é uma condição básica para a redução de emissões. Com isso, conforme projeções da Agência Internacional de Energia (IEA), espera-se que o hidrogênio de baixo carbono e as tecnologias de captura e uso de carbono (CCUS) se difundam de forma significativa durante a década de 2020, como resultado da rápida inovação e do desenvolvimento de projetos, criando novos produtos e abrindo a fronteira para novos negócios (IEA, 2020c).

Posto isto, destaca-se que o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio segue velocidades e ritmos de inserção distintos, de acordo com as particularidades econômicas, geopolíticas e socioambientais de cada país. Desta forma, nota-se que os países apresentam diferentes pontos de partida para a implementação do mercado de H2. Em geral, quanto mais sofisticada ou recente a estratégia nacional, mais abrangente são seus objetivos estratégicos.

A título de exemplo, na União Europeia, o apoio a projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) sobre hidrogênio já ocorre há cerca de duas décadas. No Reino Unido, os investimentos em estudos para descarbonizar as redes de gás são realizados há alguns anos, enquanto que, outros países, como a Alemanha e o Japão, apresentam uma longa experiência na implementação do mercado do hidrogênio.

Quanto aos setores econômicos que podem demandar H2, percebe-se que as indústrias de refino, químicas e siderúrgicas deverão representar os primeiros

mercados de H2V em larga escala, tendo em vista o consumo de energia e a importância deste insumo substituto para a descarbonização destes setores de difícil redução de emissões de GEE. Para outros setores, a previsão de demanda é ainda indefinida, haja vista que esta é uma tecnologia que envolve um mercado em desenvolvimento, que depende, dentre outras questões, de características produtivas, da disponibilidade de recursos energéticos e da formulação de estratégias para economia do hidrogênio.

Diante das perspectivas de criação de um mercado global de hidrogênio, os desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios são de tal ordem e magnitude que as formas de estimular seu desenvolvimento do mercado de oferta e de demanda deve se dar através de:

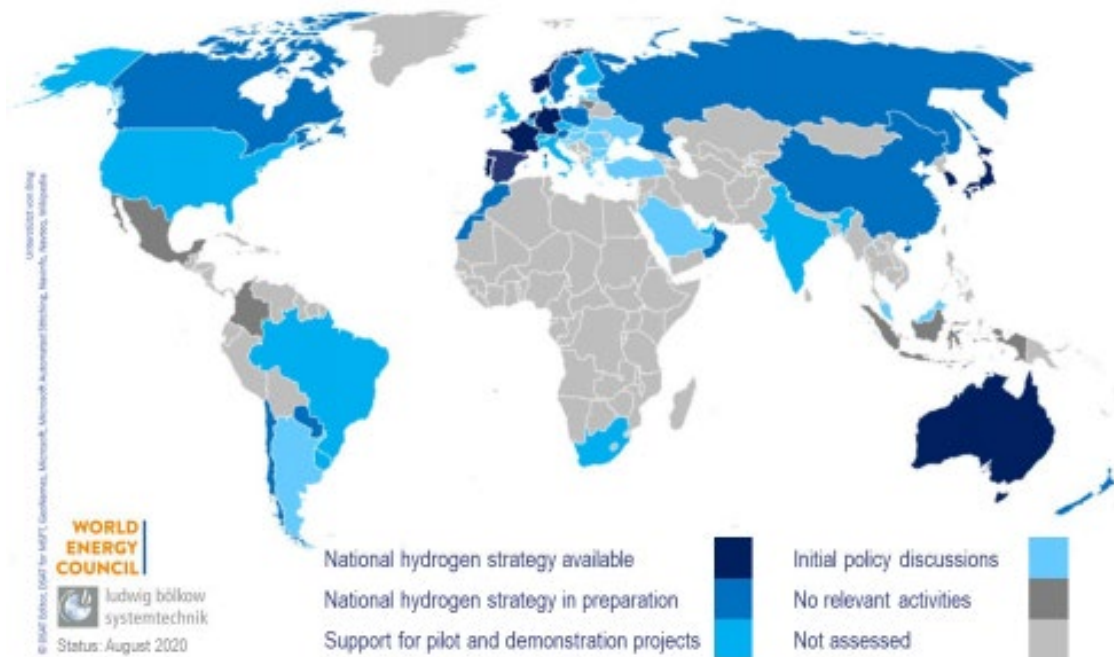
- i. Projetos de P&D;
- ii. Projetos piloto; e
- iii. Projetos demonstrativos

Através destes tipos de projetos será possível promover a validação e os testes de tecnologias e de modelos de negócios, bem como a discussão e o aprimoramento de questões normativas e regulatórias.

Entretanto, tendo em vista a transversalidade da utilização do H2V, a elaboração de estratégias nacionais de hidrogênio integrando os diversos setores e a promoção de políticas públicas específicas são essenciais para a gestão, o monitoramento e a governança do processo de transição energética, seja por meio do desenvolvimento do mercado interno, como também do mercado externo.

A Figura 1.1 apresenta, de acordo com dados de agosto de 2020, o estágio de desenvolvimento deste processo a nível mundial, com destaque para a União Europeia e o Japão, movidos por questões de segurança energética, e para a Austrália, como potencial produtor para exportação.

Figura 1.1 – Estágio de desenvolvimento da economia do hidrogênio no mundo



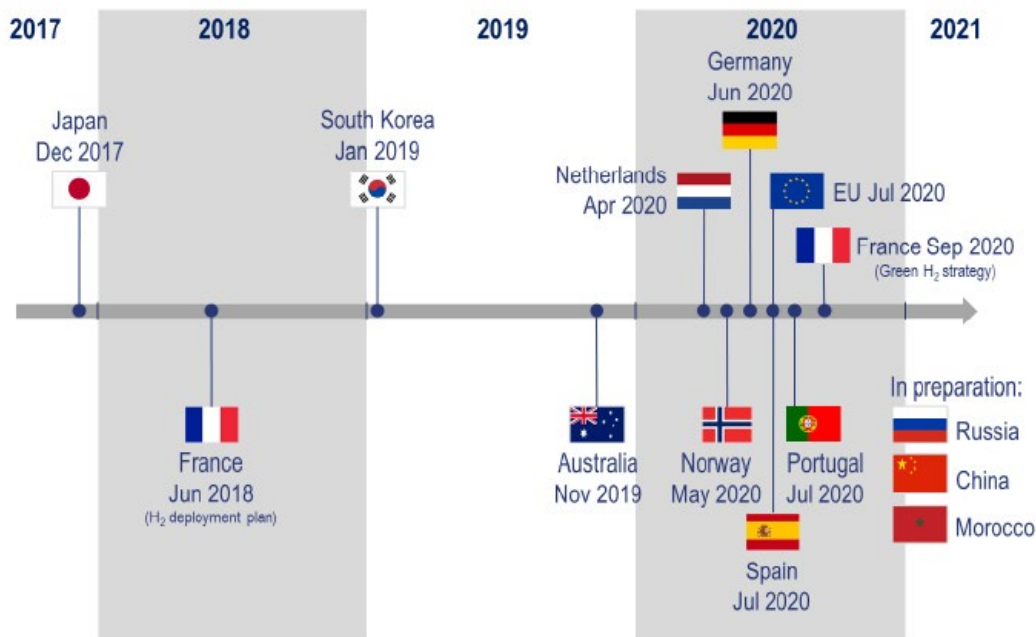
Fonte: WEC, 2020.

Diante deste quadro, apesar das diferenças associadas aos objetivos e especificidades regionais, tais estratégias apresentam o reconhecimento e o consenso compartilhado de que o H₂ é um elemento essencial e indispensável para um sistema energético descarbonizado.

Sendo assim, estima-se que, até 2025, sejam desenvolvidas e aprofundadas estratégias nacionais de hidrogênio em escala mundial (ALBRECHT *et al.*, 2020), sendo o Brasil um exemplo deste processo, com as decisões do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

Já é possível destacar a posição pioneira e de liderança de alguns países no desenvolvimento do hidrogênio e a Figura 1.2 apresenta uma linha do tempo com a evolução e o lançamento das estratégias nacionais para a estruturação de uma economia do hidrogênio.

Figura 1.2 - Linha do tempo das publicações das estratégias nacionais



Fonte: WEC (2020).

No que se refere aos investimentos, destaca-se a Alemanha, que, no âmbito de uma política pública para retomada do crescimento econômico pós-pandemia, liberou um pacote de € 130 bilhões, em junho de 2020, dos quais € 7 bilhões foram destinados a projetos P&D em hidrogênio, além de € 2 bilhões para projetos de produção de H₂ em países parceiros.

Adicionalmente, menciona-se o comprometimento de países como o Japão, a Coreia do Sul e a Austrália, bem como da Califórnia, estado norte-americano, com investimentos em torno de US\$ 200 e 400 milhões, cada. Na Austrália, por exemplo, com foco em investimentos em renováveis para impulsionar a recuperação pós-pandemia, foram aprovados US\$ 70 milhões para um *hub* de exportação de H₂, além de US\$ 74,5 milhões para o *Future Fuels Fund*, incentivando veículos elétricos, de hidrogênio ou biocombustíveis. Esses pacotes são utilizados para subsidiar incentivos e financiamentos, conforme Ito *et al.* (2020) elencaram em seu estudo.

Neste contexto internacional, a produção e difusão em larga escala do H₂ não será possível sem políticas adequadas que impulsionem a expansão do seu mercado nos diferentes setores, assim como uma política industrial que permita a sua produção em escala centralizada e descentralizada, associada a uma infraestrutura capaz de conectá-la aos consumidores e usuários finais (HYDROGEN EUROPE, 2019).

Verifica-se, portanto, que o H2 está no centro de um novo e emergente paradigma, focado no processo de descarbonização, apoiado e que depende firmemente de inovações tecnológicas no setor energético e em outros setores econômicos. Nestes termos, a seção seguinte sistematiza, em linhas gerais, os principais métodos de produção do H2, com destaque para o H2V, prevista como rota prioritária no contexto das políticas energéticas recentes.

2 Produção e consumo do hidrogênio

Do ponto de vista tecnológico, os três principais segmentos da cadeia do H₂ – produção, armazenamento e uso – têm sido amplamente analisados na literatura internacional. A utilização do hidrogênio na sua forma molecular requer elevado consumo de energia, com destaque à variedade de métodos de produção, como a reforma a vapor, a eletrólise e a gaseificação (PARRA *et al.*, 2018). O grande desafio reside, portanto, em qualificar a sua produção a partir de tecnologias sustentáveis e com baixo custo. O Quadro 2.1 apresenta os insumos e as características das três principais rotas tecnológicas no atual estado das artes, conhecidas como hidrogênio cinza, azul e verde.

Quadro 2.1 - Principais rotas de produção do H₂

Terminologia	Fonte primária	Processo para produção
Hidrogênio Cinza	Combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural)	Reforma (a vapor, oxidação parcial ou autotérmica) Gaseificação
Hidrogênio Azul	Gás natural	Reforma a vapor com CCUS
Hidrogênio Verde	Eletricidade (fontes renováveis)	Eletrólise da água

Fonte: Elaboração própria, a partir de CGEE (2010) e IRENA (2020a).

No estágio tecnológico atual, o H₂ mais competitivo é produzido majoritariamente a partir de combustíveis fósseis, destinando-se para produção de amônia, refinarias de petróleo e produção de metanol. Contudo, a produção de H₂ nesta rota, denominada hidrogênio cinza, é responsável pela emissão anual de cerca de 800 milhões de toneladas de dióxido de carbono (IEA, 2020b).

Nota-se que a maior parte do hidrogênio atualmente produzido no mundo se dá através da reforma do vapor do metano, conhecido como hidrogênio cinza, na qual o gás natural é convertido em H₂, CO e CO₂ (FRENCH, 2020). Posteriormente, o CO reage com a água para a produção adicional de H₂. As análises e projeções indicam que o H₂ cinza é uma alternativa mais competitiva para produção de hidrogênio no curto e médio prazo. E está sendo considerado como uma etapa intermediária e transitória na direção da produção do hidrogênio verde, que utiliza fontes de energia renováveis. Esta transição é necessária e determinante para que as metas de carbono zero sejam efetivamente atingidas até 2050.

Destaca-se que a reforma a vapor é um método já comercialmente viável em todo o mundo, sendo utilizado, principalmente, para fins industriais. Vantagens, como a baixa temperatura de processo, a alta eficiência e o baixo custo, tornam este método mais comum para produção de hidrogênio. Porém, a elevada emissão de CO₂ é uma grande desvantagem deste processo (ALVES *et al.*, 2013), o que tornará este produto pouco competitivo frente às metas de descarbonização.

O hidrogênio de baixo carbono engloba as rotas de produção azul e verde, em que as emissões associadas aos combustíveis fósseis são evitadas com o uso de tecnologias de CCUS, de modo a permitir, segundo IEA (2020c):

- i. Reaproveitamento do CO₂ capturado e armazenado, injetando-o em poços de petróleo;
- ii. Venda direta do CO₂ para empresas de refrigerante;
- iii. Produção de extintores de incêndio; e
- iv. Produção de metanol via hidrogenação do dióxido de carbono ou a eletricidade utilizada para a eletrólise da água ser originária de fontes renováveis.

De acordo com a análise da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as rotas de produção de H₂ com menores emissões de GEE apresentam, também, desafios associados aos custos. No caso do H₂ azul, o custo adicional do CCUS resulta em menor competitividade. O H₂V, por sua vez, enfrenta o desafio de custos elevados associados à eletrólise e, em menor grau, de dependência dos preços da eletricidade (EPE, 2020).

Ademais, desafios de armazenamento e transporte envolvendo as plantas de produção e de consumo final deverão ser superados para o desenvolvimento e a expansão da economia do hidrogênio. Armazenar hidrogênio de forma segura e eficaz é um desafio tecnológico extremamente desafiador, devido à baixa densidade volumétrica de energia, exigindo elevadas pressões para o hidrogênio comprimido (300 - 700 bar) ou baixas temperaturas no caso de hidrogênio liquefeito (-252,8°C). Assim, para atingir o ponto de equilíbrio entre a oferta e a demanda, novos métodos de armazenamento se fazem necessário (AUSFELDER; BEILMANN; BERTAU *et al.*, 2017).

Apesar da diversidade de métodos e rotas de produção, o H₂V é apontado como prioridade das principais estratégias nacionais e, notadamente, da União Européia, em função de sua convergência e aderência com os objetivos da transição energética. Adicionalmente, dado que o H₂ azul possui custos

reduzidos de produção e emissões de GEE, em razão do uso prioritário do gás natural e da adição da tecnologia de CCUS, ele é considerado um importante elemento para a rápida descarbonização de setores energo-intensivos, atuando como uma rota de transição do H2 cinza para o H2V.

2.1. Principais aplicações do hidrogênio verde

Conforme destacado anteriormente, o H2 é um vetor energético flexível, com um amplo conjunto de aplicações que pode beneficiar diferentes tipos de consumo final, como transporte, indústria, aproveitamentos residenciais, geração de energia e sistemas de aquecimento e resfriamento (ACAR; DINCER, 2019; FRENCH, 2020).

Atualmente, a maior parte do H2 produzido destina-se para produção de fertilizantes, sendo a amônia o principal composto, para refinarias de processamento do petróleo bruto, em função da redução do teor de enxofre no diesel, e para síntese de metanol, composto químico que pode ser usado como combustível, na fabricação de plástico e, até mesmo, diretamente em células a combustível (HYDROGEN EUROPE, 2020).

Inicialmente, os estudos no campo da economia do hidrogênio foram direcionados para as tecnologias de células a combustível. Entretanto, no período recente, a diversidade de aplicações e usos do H2 é o elemento chave para que este recurso energético adquira uma função estratégica nas políticas energéticas nacionais e substitua, gradativamente, o papel do petróleo como a principal *commodity* do Século XXI.

No contexto do crescente número de estratégias nacionais e políticas públicas em torno da economia do hidrogênio, o setor industrial apresenta destaque. De fato, a “Estratégia Europeia de H2” objetiva o desenvolvimento da cadeia de H2 para, simultaneamente, reduzir emissões de GEE nos setores industriais e de transporte e, de forma mais geral, ser um instrumento para a recuperação econômica pós-pandemia. No caso do Japão, a Estratégia do H2 possui metas de desenvolvimento e redução de custos do hidrogênio e das células a combustível (IEA, 2020c).

De maneira similar, as metas de redução de emissões de GEE no setor de transporte têm motivado a prospecção de projetos de P&D voltados à adaptação de motores convencionais à combustão interna (MCI), funcionando com misturas de H2 e gás natural (HCNG), diesel ou biocombustível (etanol, metanol e biogás) (STAFFEL *et al.*, 2019), e ao desenvolvimento de células a combustível,

apontadas, há décadas, como uma solução para a descarbonização e para a ampliação da eficiência no setor de mobilidade (PARRA *et al*, 2018).

Estima-se que o mercado de H2V para veículos pesados e ônibus tem um grande potencial de crescimento, na medida em que possibilitará reduzir, de forma significativa, o banco de baterias e, conseqüentemente, o seu peso, aumentando a capacidade de transporte de carga ou passageiros. O período de abastecimento é outro aspecto relevante a ser considerado, pois o tempo de recarga para os veículos a hidrogênio é equivalente ao de veículos à combustão. Por outro lado, os veículos a H2 apresentam tempo de vida útil e custo de manutenção, associado à maior densidade de energia, como elementos competitivos muito positivos.

Segundo projeções da IEA, em um cenário de desenvolvimento sustentável, o H2 e as tecnologias de CCUS corresponderiam a cerca de metade da redução cumulativa de emissões de GEE nos setores de aço, cimento e químico, beneficiando-os com práticas menos agressivas ao meio ambiente. No setor de transportes, especialmente nos veículos pesados, navegação e aviação, estima-se que o uso de combustíveis alternativos, como o H2, combustíveis sintéticos e biocombustíveis, esteja entre 55% e 80% do consumo, até 2070 (IEA, 2020c). No caso específico da aviação, destaca-se que os combustíveis sintéticos derivados do hidrogênio representam a única solução de descarbonização direta viável no momento (FCH 2 JU).

No setor energético, o potencial de uso do H2 é muito amplo, dada a capacidade de integração de fontes renováveis intermitentes aos sistemas elétricos, ampliando a flexibilidade, a resiliência e a eficiência destas fontes. O Quadro 2.2 apresenta os principais impactos deste vetor no setor energético em transição.

Quadro 1.2 - Papéis fundamentais do H2 na transição energética

Integração de fontes de geração renováveis	Descarbonização de sistemas energéticos
Flexibilidade do sistema	Mobilidade sustentável
Aumento da acessibilidade	Processos industriais mais limpos
Ampliação da resiliência	Produção mais limpa para atender a demanda
Integração a sistemas multigeração	Matéria-prima renovável para todos os setores
Redução do monopólio	Impacto ambiental reduzido
Aumento da eficiência	Aumento da sustentabilidade

Fonte: Elaboração própria, adaptado de ACAR e DINCER (2019).

Como resultado dos benefícios associados a estas tecnologias, o desenvolvimento da economia do hidrogênio vem ganhando prioridade nas políticas energéticas de Japão, Reino Unido, Estados Unidos, União Europeia e diversos outros países. Estas políticas nacionais são reforçadas por análises internacionais de *roadmap* tecnológico e pelos investimentos em larga escala pela indústria (CHAPMAN *et al.*, 2019). De fato, a flexibilidade proporcionada pelo H2, em conjunto com sua participação na descarbonização de setores de difícil redução de emissões, fundamenta os esforços de inúmeros países em desenvolver políticas de suporte ao hidrogênio de baixo carbono (IEA, 2020c).

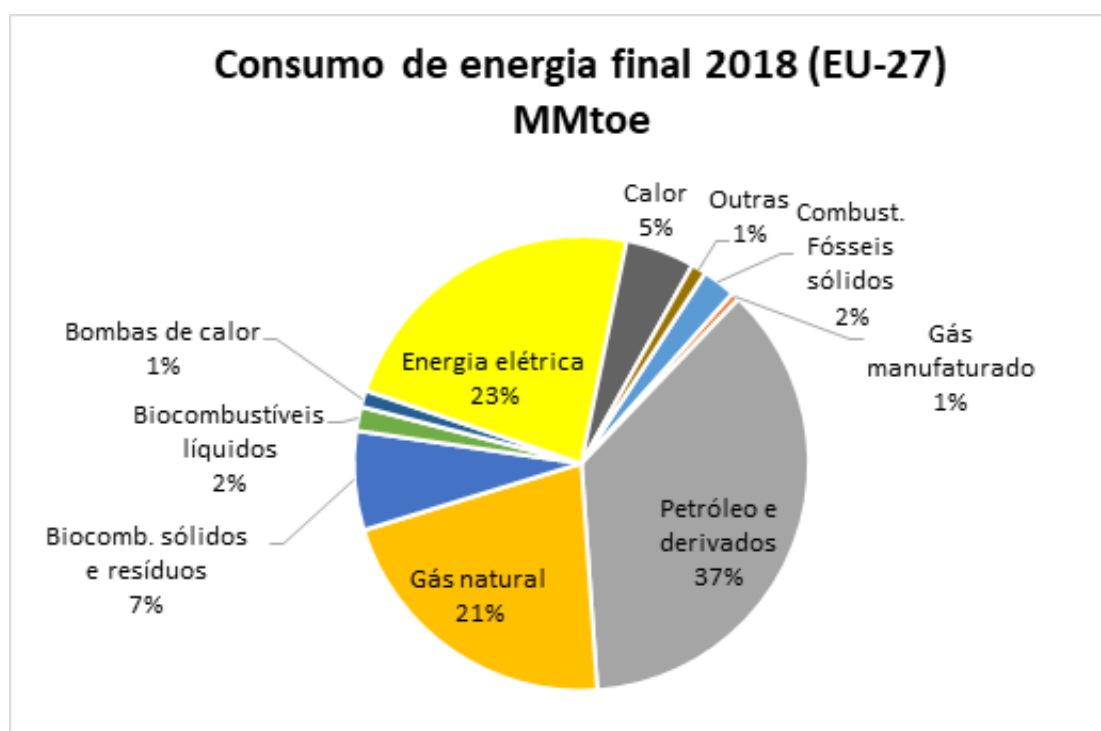
Além disso, os avanços das tecnologias de hidrogênio e o desenvolvimento de uma série de parcerias público-privadas ampliaram a compreensão do papel do H2 como um vetor dinâmico de uma transição energética competitiva para um sistema de baixo carbono (BRANDON; KURBAN, 2017). Deste modo, a seção seguinte analisa os principais elementos das políticas públicas da União Europeia, que tem se destacado na priorização do H2V como elemento estratégico para as próximas décadas.

3 Aspectos econômico-financeiros do mercado do hidrogênio

Os países do grupo de possíveis exportadores de hidrogênio caracterizam-se pela grande oferta potencial de energias renováveis, como aqueles da América do Sul, com destaque para o Brasil, a Austrália e do norte da África. Os países importadores de hidrogênio, por outro lado, caracterizam-se pelo grande consumo e pela dependência da importação de combustíveis fósseis, caso de Europa, Japão e outros países da Ásia.

Conforme mostra o Gráfico 3.1, a União Europeia apresenta uma grande dependência de derivados de petróleo e gás natural, dos quais 49% e 81%, respectivamente, são importados. Portanto, além da redução de emissões, a estratégia europeia foca na diversificação de fontes de energia, com o consequente aumento estratégico da segurança energética.

Gráfico 3.1 - Consumo de energia final na EU-27 em 2018



Fonte: Elaboração própria, a partir de dados da EU Commission, DG Energy.

A constituição de um novo setor econômico, como o do H2V, traz perspectivas positivas tanto para os países importadores como exportadores deste tipo de hidrogênio, considerando o potencial de impulsionar o crescimento econômico, com o desenvolvimento de atividades no setor industrial relacionadas à sua

cadeia de produção, incluindo equipamentos e sistemas ligados à sua logística, típico do conceito de indústria de autopeças (CASTRO; SANTOS, 2021).

Além disso, o desenvolvimento do seu mercado de consumo trará novas oportunidades e serviços, que demandarão, também, a produção de bens e serviços a eles associados, criando-se, assim, um círculo virtuoso de crescimento. Ademais, o setor elétrico também deverá experimentar um maior dinamismo, em função da demanda por geração de energias renováveis, notadamente fotovoltaica e eólica, dos países exportadores.

Essas novas atividades exigirão mão-de-obra qualificada, o que estimulará atividades de capacitação e a geração de empregos qualificados, dada a densidade tecnológica desta nova cadeia produtiva. Adicionalmente, trata-se de um vetor dinâmico para a recuperação e o crescimento econômico mundial no contexto pós-pandemia, especialmente em razão dos efeitos multiplicadores destes investimentos. Esta capacidade dinâmica explica, em grande parte, o fato de mais de 30 países terem firmado estratégias, determinando novos enquadramentos econômicos, como produtores e compradores de hidrogênio, produtores de equipamentos e provedores dos serviços em toda a cadeia de valor do H2.

Essas estratégias envolvem regulações, ações, normas e incentivos, inclusive financeiros, e visam estabelecer sinais de longo prazo para dar confiança aos investidores, possibilitando, de acordo com a IEA (2019):

- i. A criação de novos mercados,
- ii. O estímulo à demanda por H2 em diversos segmentos produtivos,
- iii. A contribuição à mitigação de riscos não controláveis na sua cadeia de valor,
- iv. A disseminação de conhecimento tecnológico; e
- v. A criação de normas e inovações regulatórias sobre o tema.

Em suma, firmam-se as bases para a criação de um novo paradigma energético em escala mundial, tanto para países exportadores como importadores de H2V.

3.1. Perspectivas de investimentos

Tendo em vista que a produção do H2V envolve tecnologias ainda em desenvolvimento e a sua implantação em escala produtiva competitiva necessita da criação e da ampliação de mercados até hoje praticamente inexistentes, uma grande ênfase está sendo dada, em um primeiro momento, à prospecção de projetos de pilotos. Estes projetos possuem a finalidade de testar a eficiência e determinar parâmetros de escala que possibilitem substituir as fontes de energia utilizadas atualmente pelo H2, de modo a abrir mercados, criar novos segmentos e ampliar a capacitação da indústria.

Nota-se que os projetos pilotos, em geral, são patrocinados pelos fabricantes da tecnologia, pelo Estado, pela Academia, no âmbito de projetos de P&D, ou por provedores de serviços locais. Um dos primeiros projetos mais representativos foi o *Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) Pilot Project*, que contempla a cadeia produtiva do H2 cinza, desde a sua produção a partir do carvão marrom, na Austrália, até o seu transporte marítimo para o Japão (COAG, 2019).

Atualmente, mais da metade de todos os projetos na cadeia de valor do H2 anunciados estão na Europa (105 projetos), verificando-se, também, projetos na Austrália, no Japão, na Coreia do Sul, na China e nos EUA. Estima-se que os projetos desenvolvidos até 2030 envolvem investimentos que devem somar mais de US\$ 300 bilhões, em diversos níveis de maturidade. Deste total, cerca de US\$ 80 bilhões referem-se a projetos maduros.

Em linhas gerais, as empresas tendem a direcionar seus investimentos em três áreas específicas (HC, 2021), quais sejam, Capex, P&D e atividades de fusões e aquisições.

Os exemplos são inúmeros e tendem a crescer. Até 2030, são previstos 4,5 milhões de veículos à célula de combustível (FCEV, do termo em inglês *fuel cell electric vehicle*), com China, Japão e Coreia do Sul liderando o lançamento, em paralelo a metas de implantação de 10.500 postos de abastecimento de H2V, neste período, para abastecer tais veículos (HC, 2021).

Na União Europeia, são estimados investimentos de cerca de € 60 bilhões até 2030, sendo 40% para aplicação na infraestrutura e em equipamentos para produção de H2, 25% à distribuição e ao aquecimento residencial e industrial, 14% ao seu transporte e 13% no setor de transporte. Outros 15% serão destinados ao desenvolvimento de plantas industriais para a produção de veículos e distintos meios de transporte à célula a combustível de H2 e os 7% restantes serão aplicados na implantação de equipamentos e processos (FCH 2 JU, 2020).

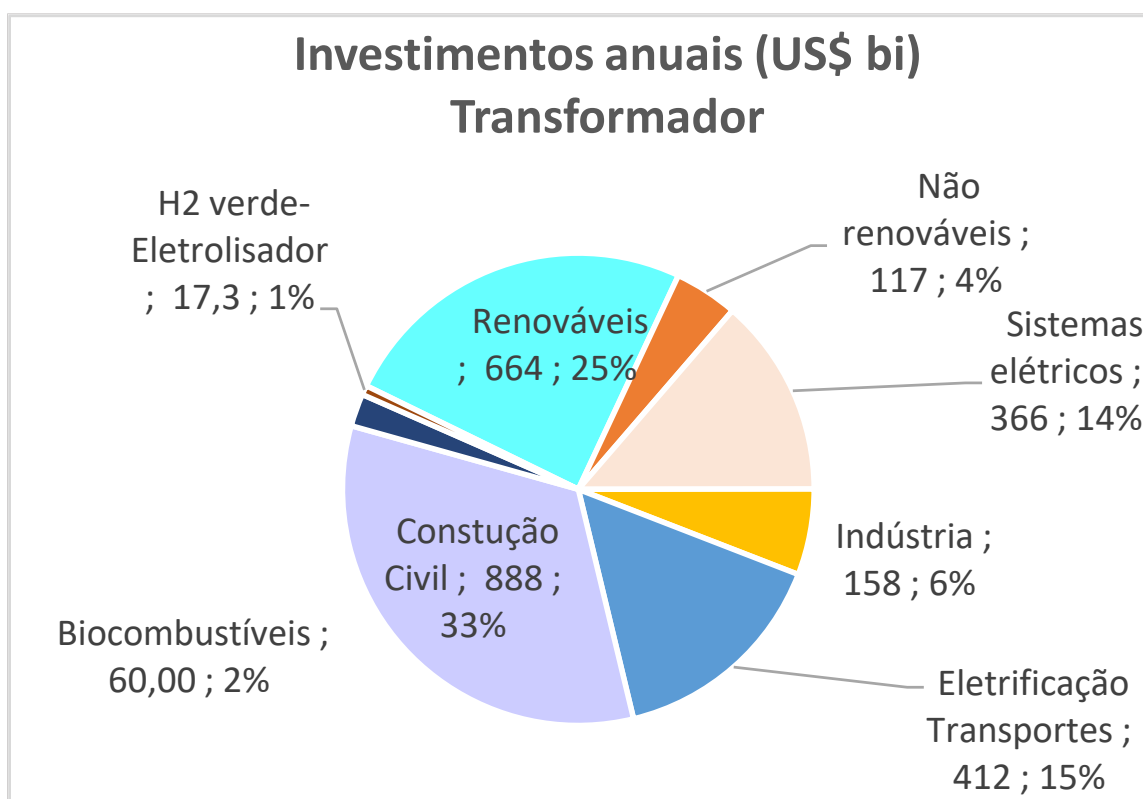
Além disso, como a produção de H₂V é intensiva na geração de eletricidade de fontes renováveis, serão intensificados os investimentos no setor elétrico, especialmente em energia solar e eólica. Estima-se que, em 2050, 16% da geração de energia elétrica será dedicada à produção de H₂ (IRENA, 2019).

Com o objetivo de diluir seus custos, estão sendo desenvolvidos projetos conhecidos como *hubs*, que consistem na concentração geográfica da cadeia de valor (geração de energias renováveis, produção de H₂V, consumidores industriais, armazenagem e transporte), de modo a reduzir os custos de infraestrutura, estimular o aumento de escala, fornecer hidrogênio a vários consumidores finais e concentrar mão-de-obra especializada. Quando localizado próximo a um porto ou a um gasoduto, o *hub* traz, ainda, a vantagem de acesso ao transporte marítimo ou terrestre para consumo interno e, principalmente, para exportação.

Em 2019, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) traçou cenários de desenvolvimento do setor, dentre os quais se destaca o TES (*Transforming Energy Scenario*), que se baseia em energias renováveis e ganhos de eficiência energética, visando limitar o aumento da temperatura global entre 1,5 e 2° C neste século. No Gráfico 3.2, que apresenta os dados sobre os investimentos anuais previstos para o TES, é possível observar o ganho de importância das energias renováveis, dos biocombustíveis, da eletrificação dos transportes e do eletrolisador neste cenário de expansão.

Estima-se que o total dos investimentos nos 35 anos do cenário analisado será superior a US\$ 90 trilhões. Cabe registrar que, embora represente uma pequena proporção nos gastos totais, o investimento anual projetado para a implantação de eletrolisadores é da ordem de US\$ 17 bilhões.

Gráfico 3.2- Investimentos anuais no cenário TES



Fonte: Elaboração própria, a partir da consolidação de dados da IRENA.

3.2. Custos de produção

Grosso modo, a competitividade do H2V está relacionada em grande medida ao custo da energia elétrica utilizada para a sua produção. Atualmente, destaca-se, este único custo representa 95% dos custos para a sua produção. Deste modo, qualquer redução do custo da energia elétrica, insumo essencial, é primordial para dar mais competitividade ao H2V.

Esta redução pode ser obtida mediante a utilização de fontes de energias renováveis, cujos custos vêm caindo nos últimos anos, e o aumento da eficiência energética dos eletrolisadores. Em relação às outras fontes de energia, a competitividade dependerá dos custos de toda a cadeia de produção e logística, que compreende as tecnologias em desenvolvimento, as quais estão sofrendo intenso processo de inovação tecnológica. Os destaques nesta comparação são a maior eficiência do hidrogênio e, nos casos do H2 azul e principalmente do H2V, os benefícios que trazem para a sustentabilidade ambiental.

A redução contínua dos custos da energia elétrica proveniente de fontes renováveis vem ocorrendo em função da maturação destas tecnologias e dos ganhos de escala mundial das gerações eólica e solar. O melhor indicador deste

argumento analítico são os patamares de preço, até 2019, das energias eólica e solar, em US\$ 0,045/kWh e US\$ 0,048/kWh, respectivamente (IRENA, 2019).

Para o H2V, o segundo maior componente do custo de produção é o custo de capital (Capex). O processo de eletrólise da água envolve uma unidade produtiva, além dos sistemas que lhe dão suporte, como de suprimento de energia elétrica, de captação e tratamento de água, de compressão e armazenagem de H2V, dentre outros.

Estima-se que o custo do eletrolisador seja reduzido de US\$ 1.120/kW, verificado em 2020, para cerca de US\$ 230/kW, em 2030 (HC, 2021). Esta redução irá ocorrer por conta de dois fatores interligados:

- i. Os investimentos em projetos de P&D, com destaque para plantas de H2, abrindo novo horizonte tecnológico; e
- ii. Os ganhos de escala produtiva.

A produção de H2 a partir de processos térmicos (reforma a vapor, oxidação parcial, gaseificação e pirólise de biomassa) é a mais competitiva sob o aspecto de custos, com destaque para os dois primeiros processos citados (aproximadamente US\$ 7/GJ). Porém, aos custos de produção devem ser agregados aqueles referentes à captura e ao armazenamento de GEE, que podem elevar o custo final do hidrogênio em cerca de 20% a 30%.

Adicionalmente, os processos térmicos com emprego de biomassa requerem estudos detalhados, pois, além dos fatores de escala, dependem da logística de suprimento (IEA, 2021).

Para viabilizar a utilização do H2 produzido por reforma a vapor, é necessária a captura do CO2 emitido por meio de sistema de captura de carbono (CCS), com sistemas de monitoração, registro e verificação (MRV), para atestar a sua maximização, tendo em vista que a obtenção do H2 azul não é livre de carbono, com eficiência prevista de 85% a 95% (IRENA, 2019). Nota-se que o registro da captura é importante em um ambiente em que haja a cobrança por tonelada de CO2 emitido, como ocorre na Europa.

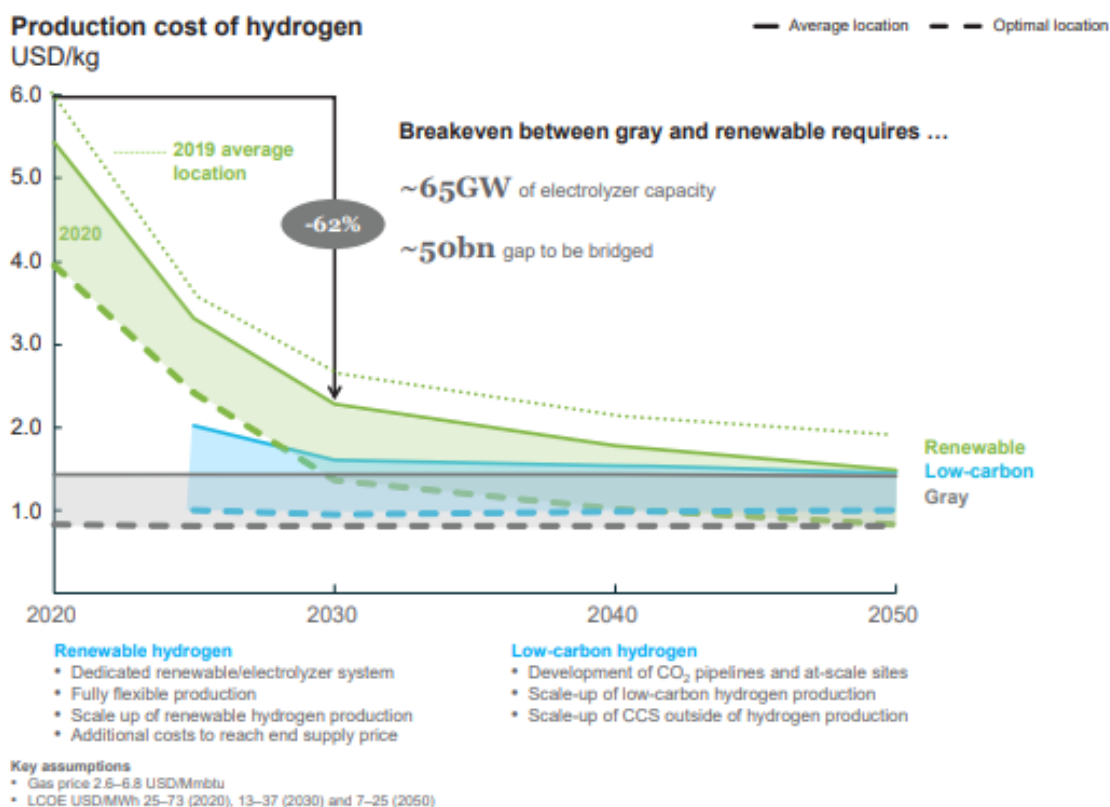
O custo do processo de captura de CO2 é de cerca de US\$ 0,21/kg em uma planta de reforma a vapor do metano (SMR) (Global CCS Institute, 2020). Destaca-se que o custo de CO2 emitido é um instrumento de política ambiental que poderá ser utilizado, com maior agressividade, para dar mais competitividade ao H2V, de modo a viabilização o alcance das metas de descarbonização.

Consolidando esta linha analítica econômica, a redução do custo final de produção do H2 dependerá da conformação do sistema (escala de produção, vida útil e fator de utilização), que são parâmetros importantes para a diluição dos custos de capital, bem como da flexibilidade de operação, que pode permitir variações na alimentação de energia e na quantidade de produção de H2.

A produção de H2 azul vem seguindo esta trajetória de maior competitividade, por conta da elevada eficiência dos sistemas de CCS, que registram um aumento nas taxas de captura de CO2 e apresentam um potencial de redução do Capex (HC 2021).

A Figura 3.1 apresenta projeções para a evolução dos custos de produção de H2 nas alternativas verde, azul e cinza, analisadas a seguir.

Figura 3.1 - Projeção de evolução dos custos do hidrogênio



Fonte: HC (2021).

Constata-se que a produção de H2 de baixo carbono (azul) por meio da reforma do gás natural com CCS é competitiva em regiões onde se verificam a disponibilidade de gás natural a baixo custo e, também, infraestruturas para armazenagem em larga escala do CO2 produzido no processo. Estimativas indicam que o custo de produção do H2 azul pode cair a cerca de US\$ 1,2/kg, nos EUA e no Oriente Médio, por volta de 2025. A União Europeia, que não

possui reservas dos recursos energéticos, poderá ter a produção do H2 azul na faixa de US\$ 1,8/kg, em 2030, considerando-se uma redução dos custos de captura e armazenagem de CO2.

A produção do H2V é mais competitiva em regiões onde existe um potencial de recursos energéticos renováveis e que detenham modelos de negócio que viabilizam a geração de energia elétrica a baixo custo, como é o caso específico e com destaque do Brasil. Nessas regiões, segundo HC (2021), o custo de produção do H2V poderá atingir US\$ 2,5/kg, em 2025, e US\$ 1,4/kg, em 2030, determinando uma competitividade muito consistente em relação ao H2 azul, com o diferencial de baixo impacto na emissão de GEE.

Este diferencial competitivo poderá ser ampliado em favor do H2V, quando comparado ao H2 azul e cinza, pelo uso da taxaço da emissão de CO2, cobrada por tonelada deste gás emitido.

3.3. Custos de transporte e distribuição

O consumo final de H2 apresentará, na variável transporte, um fator determinante para a sua velocidade de disseminação. O transporte por dutos possui a melhor relação custo/benefício, exigindo, no entanto, um volume de demanda elevado, contínuo e por longos períodos. Nesta direção, o principal desafio é o volume de investimentos, que deve ser muito elevado para implementar sistemas de compressão e desenvolver materiais de fabricação de dutos e componentes resistentes à fragilização realizada pelo H2. Neste caso, existe a alternativa de dutos exclusivos para H2 ou em mistura com o gás natural. Atualmente, existem cerca de 5.000 km de gasodutos de H2 no mundo, frente aos 3 milhões de km de gasodutos para gás natural.

O transporte do H2 na forma liquefeita é uma tecnologia madura, porém intensiva em capital e em energia. Esta opção é adequada quando existe uma demanda elevada e estável capaz de dar viabilidade econômica aos investimentos no transporte por dutos. Assim, o transporte de H2 em forma líquida, no estágio tecnológico atual, é a forma mais econômica e competitiva para exportação por via marítima. No entanto, dada a dimensão esperada da demanda mundial de H2, o maior desafio do transporte na forma liquefeita é o desenvolvimento de tecnologias que reduzam o custo da energia inerente ao processo de liquefação.

O H2 líquido exige um processo de liquefação a 253°C negativos, um alto consumo energético e o controle de perdas por evaporação, além da dificuldade

de armazenagem por longos períodos. Uma contrapartida positiva é que este processo mantém o grau de pureza inalterado. Além disso, esta forma de transporte apresenta uma vantagem em comparação ao transporte realizado na forma de gás, pois em um mesmo volume é possível se transportar uma massa cinco vezes maior.

O transporte pode também ser realizado a partir do H₂ transformado em combustível líquido (PtL, do termo em inglês “*power-to-liquid*”) ou agregado a partículas de outras substâncias líquidas com moléculas maiores, como amônia e LOHCs (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*). O conceito deste modo de transporte é o emprego de substâncias ou materiais que armazenam o H₂ e o liberam no local do uso final. Para isso, entretanto, são necessários processos de conversão na origem e reconversão no destino, sendo que os custos de reconversão dependem da natureza e da exigência de pureza requerida pelo consumidor do hidrogênio.

A amônia já possui uma cadeia de produção e logística madura e pode ser um produto de uso final, o que garante maior competitividade na sua utilização como meio de transporte de H₂, no estágio de desenvolvimento atual. Outro indicador é que o transporte terrestre por gasoduto é mais barato para distâncias de até 1.500 km. Todavia, para distâncias maiores, o transporte do H₂ liquefeito ou agregado à amônia ou a LOHC é mais competitivo.

Considerando os custos de capital e os custos operacionais, a IEA estimou em , aproximadamente, US\$ 1/kg os custos para transportar hidrogênio por gasoduto de cerca de 1.500 km. Para esta mesma distância, os custos de transporte de amônia por dutos, incluindo aqueles referentes à reconversão, são de US\$ 1,5/kg. Por sua vez, os custos de conversão e transporte marítimo do H₂ incorporado à amônia são de US\$ 1,2/kg, enquanto que de LOHC são de US\$ 0,6/kg e da forma líquida são de US\$ 2/kg (IEA, 2019).

Para a distribuição local, gasodutos ou caminhões podem ser utilizados, em decorrência da distância de transporte e da quantidade de H₂ transportada. No setor industrial, esta logística já é adotada no suprimento de H₂ cinza, o que tem ocorrido sem incidentes ao longo de décadas (IRENA, 2019).

Já os custos de distribuição de LOHC por caminhão para uma distância de 500 km seriam de US\$ 0,8/kg, enquanto que os custos de extração e purificação seriam de US\$ 2,1/kg, totalizando US\$ 2,9/kg. Para a amônia, os custos seriam de US\$ 1,5/kg e, se for usada pelo consumidor final, de US\$ 0,4/kg (IEA, 2019).

3.4. Receitas

Por se tratar de uma nova tecnologia exponencial e disruptiva, a cadeia de produção e logística do H2V deverá movimentar recursos da ordem de dezenas de trilhões de dólares nos próximos 30 anos. (FCH 2 JU, 2019). De um modo geral, além das receitas de comercialização do H2 e dos produtos obtidos em sua cadeia, como amônia e PtL, pode-se elencar diferentes tipos de atividades relacionadas à sua produção e logística, que serão, também, fontes de receitas, destacando-se, entre outras:

- i. O desenvolvimento de tecnologias, bem como a prospecção e a comercialização de equipamentos e sistemas para a produção de H2V, para a geração de energias renováveis, para o transporte, a exportação e a sua distribuição, para equipamentos e sistemas para armazenamento, para FCEV e para equipamentos e sistemas para a produção de PtL;
- ii. A construção, a operação e a manutenção das plantas de produção de H2V, assim como investimentos em plantas eólicas e solares, gasodutos, cavernas e poços para armazenagem do H2V, e em infraestrutura de transporte e de distribuição até o consumidor final e de plantas para produção de PtL;
- iii. Os serviços de distribuição de energias renováveis, de água e de outros insumos;
- iv. A adaptação de instalações industriais e residenciais para o uso do H2V;
- v. A qualificação e o treinamento de mão-de-obra para desenvolver e operar as novas tecnologias; e
- vi. Os estudos prévios necessários para a implantação dos projetos, como estudos de impactos ambientais e sociais, estudos da legislação e da regulação, estudos de viabilidade, etc.

No contexto europeu, segundo a análise do *Hydrogen Roadmap Europe*, tendo em vista os investimentos e receitas analisados, estima-se que a Europa contaria, em 2030, com um mercado de H2 da ordem de € 85 bilhões. Em função de sua liderança tecnológica, espera-se que a indústria europeia atinja uma participação de 75% neste mercado.

Ademais, acredita-se que os agentes europeus tenham uma participação de 25% no mercado global de H2, gerando € 65 bilhões de receitas adicionais em exportações (FCH 2 JU, 2019).

Com base nestas receitas, estima-se que os investimentos na indústria europeia deverão criar um milhão de novos empregos, dos quais 50% estariam concentrados na indústria de equipamentos para produção e distribuição de H2, bem como no desenvolvimento da infraestrutura para aplicações de uso final (FCH 2 JU, 2019).

3.5. Estruturas financeiras dos projetos

A estruturação financeira de um projeto de grande porte de H2 pode ocorrer em diversas modelagens, envolvendo participação em capital (*equity*) ou em dívida (*debt*). As modelagens de dívida podem considerar, de um modo geral, financiamentos bancários ou emissões de títulos de dívida, como debêntures, e podem estar ou não vinculadas aos balanços dos investidores, ou seja, podem comprometer ou não os seus ativos via *Corporate Finance* ou *Project Finance*.

O *Project Finance* é utilizado em projetos que apresentam suficiência, previsibilidade e estabilidade em suas receitas, de forma que os seus recebíveis possam ser dados em garantia à dívida, por meio de mecanismos, normalmente através de contas bancárias segregadas, que garantem o pagamento automático do serviço da dívida (SIFFERT *et al.*, 2009). Para tanto, deve ser criada uma sociedade de propósito específico (SPE), permitindo a participação de distintos acionistas, como investidores, financiadores, agentes administradores de contas (*trustees*), construtores, fornecedores dos principais equipamentos, operadores, fornecedores de insumos, compradores do produto e o poder concedente, sendo muito mais usual em setores regulados, como o setor elétrico.

A estruturação do *Project Finance* toma por base a análise do(s):

- i. Fluxo de caixa da SPE;
- ii. Diferentes contratos firmados, que integram o núcleo duro da garantia da operação de financiamento;
- iii. Seguros firmados;
- iv. Segurança no fornecimento de equipamentos e insumos em quantidades, preços, qualidade e prazos compatíveis com o projeto;
- v. Solidez e capacidade de aporte de recursos no projeto pelos empreendedores; e
- vi. Riscos que possam ter impacto no fluxo de caixa da SPE, como os riscos tecnológicos, de construção, ambientais, regulatórios, de mercado (mitigados pelos contratos de longo prazo) e operacionais, e sua mitigação ou alocação dentre os diversos participantes do projeto.

De um modo geral, um projeto para planta de H2 pode ser dividido em três fases:

- i. Construção: definição do aporte de capital dos sócios e do financiamento corporativo ou do tipo *Project Finance*;
- ii. Operação assistida: início de operação do projeto, com geração de caixa suficiente para pagar as despesas, mas sem atender, ainda, aos *covenants* estabelecidos; e
- iii. Operação: alcance dos *covenants* pelo projeto e suas receitas servem como garantia ao financiamento na modalidade *Project Finance*.

A transição entre essas três fases, prevista no fechamento da estrutura financeira do projeto, ocorre conforme a sua performance, refletida no atingimento de obrigações (*covenants*) financeiras e não financeiras (SIFFERT *et al.*, 2009).

Por se tratar de uma tecnologia disruptiva e ainda em desenvolvimento, sem uma rota tecnológica definida e firmada para produção em larga escala, a implantação e a operação de projetos da cadeia produtiva e logística do H2V envolve, como em outras atividades análogas em suas fases iniciais, riscos tecnológicos. Assim, cada tipo de atividade deve ser avaliado de acordo com a maturidade do seu conteúdo tecnológico, buscando-se conhecer e avaliar os riscos tecnológicos diversos, como aumentos de custos e tempos de implantação, curvas de aprendizagem, escalabilidade e os demais riscos relativos à performance técnica dos novos equipamentos e sistemas, tanto na sua implantação como na operação.

Percebe-se, assim, que a introdução do H2V como vetor para o cumprimento das metas de descarbonização do planeta é, simultaneamente, um desafio a ser enfrentado e vencido pelas principais economias do mundo e um *driver* de expansão econômica, em função do desenvolvimento tecnológico e da capacidade de multiplicação de investimentos, alimentando um círculo virtuoso de crescimento econômico.

Neste sentido, dentro do contexto de retomada do crescimento econômico pós-pandemia e das perspectivas de desenvolvimento econômico, no qual os planos internacionais, os programas e as políticas públicas nacionais estão orientando e estimulando investimentos públicos e privados, o H2 é considerado um importante vetor da transição energética.

4. Perspectivas e oportunidades para o Brasil

Conforme demonstrado nas seções anteriores, a construção e o desenvolvimento em larga escala de sistemas energéticos baseados em H₂ requerem investimentos vultuosos de longo prazo de maturação e abordagens inovadoras em relação aos sistemas vigentes em toda a cadeia de valor, com destaque para as intensas e diversificadas possibilidades de demanda do H₂ (ACAR; DINCER, 2019). Desta maneira, o processo de transição energética mundial, no qual o H₂ vem adquirindo centralidade, exige uma visão estratégica de longo prazo da política energética brasileira, face ao potencial e às possibilidades abertas para o Brasil se posicionar como um grande exportador de H₂V (CASTRO *et al.*, 2021).

Como pano de fundo, destaca-se que o H₂ é um tema estudado no país há décadas. Conforme apontado, em 2010, pelo Centro Brasileiro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), diversos grupos de pesquisa, desenvolvimento e inovação, sediados em universidades e centros tecnológicos, contribuíram para o enquadramento analítico de tecnologias de H₂. No que tange ao esforço governamental, a análise do CGEE evidencia dois principais vetores:

- i. O roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, desenvolvido, em 2005, pelo Ministério de Minas e Energia (MME); e
- ii. O Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do H₂ (PROH₂), originalmente denominado Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível (ProCaC), desenvolvido, em 2002, pelo então Ministério de Ciência e Tecnologia.

Mais recentemente, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), identifica parâmetros e cenários, firmando, ainda que de forma difusa, uma visão geral de longo prazo no setor energético brasileiro, com destaque para o H₂ como uma tecnologia disruptiva. Segundo o PNE 2050, tecnologias disruptivas são definidas como aquelas capazes de alterar significativamente o mercado de energia, mas que exigem maiores investimentos em pesquisa e ampla e consistente análise acerca de sua inserção no Setor Elétrico Brasileiro, bem como possíveis desdobramentos (EPE, 2020).

Em fevereiro de 2021, a EPE divulgou o documento Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, aprimorando o que foi publicado no PNE 2050, com a indicação dos primeiros passos para o desenvolvimento de um plano de ação (*roadmap*).

Outras iniciativas do governo reforçando o alinhamento do H2 como tema estratégico de desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiro foram duas resoluções promulgadas pelo CNPE e do pelo MME:

- i. Resolução CNPE nº 2/2021, que estabelece temas prioritários para a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação no setor de energia nacional, incluindo o H2 e o armazenamento de energia (CNPE, 2020); e
- ii. Resolução CNPE nº 6/2021, que firma posição a favor da criação do Programa Nacional de H2, com suas diretrizes devendo ser publicadas nos 60 dias seguintes, com a cooperação dos Ministérios de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e o apoio da EPE.

Uma preocupação sistematizada por Castro e Santos (2021) é a relevância de priorizar, no Programa Nacional de H2 (PNH2), a criação de condições econômicas e regulatórias para o desenvolvimento da capacidade de produção de H2 em plantas pilotos, tendo em vista que as rotas tecnológicas ainda estão em gestação nos centros econômicos mais desenvolvidos, em especial na Alemanha, dada a sua carência de opções nacionais de fontes de energia renováveis. Nesta direção, na posição dos autores, o PNH2 deve privilegiar ações para que o Brasil seja um grande produtor e exportador de H2V.

4.1. Oportunidades e nichos de inserção

O grande potencial e disponibilidade, a preços competitivos, de recursos renováveis para a geração elétrica está na base da competitividade e das oportunidades para o Brasil na estruturação da economia do H2V.

O Brasil é um país tropical, com grande área territorial de dimensão continental, extensa costa e amplo potencial de recursos renováveis de fontes hídrica, eólica, solar, de biocombustíveis e de biomassa.

Além disto, a matriz elétrica brasileira é composta por cerca de 85% de fontes renováveis. Estes elementos corroboram a assertiva de que o Brasil possui vantagens competitivas consistentes e de que o PNH2 deve priorizar o posicionamento do país como um grande produtor de H2V, utilizando, em uma primeira e decisiva etapa, tecnologias importadas, como o fez com as energias eólica e solar.

Neste sentido, destacam-se quatro elementos centrais do Setor Elétrico Brasileiro que garantem competitividade para a produção nacional de H2V:

- i. O potencial de recursos energéticos renováveis, superior a 1 milhão de MW de energias eólica e solar;
- ii. O modelo de contratação através de leilões competitivos;
- iii. Os preços baixos da eletricidade contratada via leilões; e
- iv. O Sistema Interligado Nacional, que permite transmitir energia elétrica dentro o espaço continental do Brasil.

Somadas à relevância do H2 no contexto internacional e aos primeiros passos para a criação de um Programa Nacional de H2, estas características geram um ambiente de negócios favorável para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no país (EPE, 2021). Ressaltam-se as recentes iniciativas para implantação de *hubs* de H2V, em especial pelo governo do Ceará, no Porto do Pecém, e do Rio de Janeiro, no Porto do Açu.

Quanto às oportunidades no mercado externo, a análise da IRENA (2019) destaca o potencial de o H2 se tornar uma nova *commodity* mundial de energia. Sua versatilidade, que permite a conversão ao gás natural sintético e a exportação, utilizando a infraestrutura existente, para posteriormente ser reconvertido em H2 de baixo carbono, através da reforma a vapor e do uso de CCUS, é uma oportunidade tanto aos países produtores de gás natural, quanto àqueles que atualmente são exportadores de combustíveis fósseis. Na outra linha, o maior valor agregado do H2V, em função da aderência aos compromissos assumidos no Acordo de Paris, será o recurso energético que irá predominar no mercado internacional, em especial por mitigar a dependência frente ao oligopólio mundial do mercado de gás natural.

O estabelecimento de parcerias entre União Europeia e Brasil mostra-se com potencial muito promissor, dada as possibilidades concretas de exportação do H2V brasileiro para o mercado europeu, em decorrência do alto grau de insegurança energética e dos compromissos de redução de GEE. Esta estratégia poderá levar a um extenso crescimento do mercado interno brasileiro, com potencial de desenvolvimento econômico local e impactos ambientais positivos associados à descarbonização (CASTRO, *et al.*, 2021).

Outro elemento favorável ao Brasil, indicado pelo PNE 2050, é o aumento da capacidade de produção nacional de eletrolisadores, o que poderá reduzir os custos pelos ganhos de escala ou pelo uso de insumos nacionais, considerando

que o país possui significativa abundância de níquel, matéria prima para os eletrodos utilizados na eletrólise alcalina (EPE, 2020).

Conforme apontado pelo GESEL em sua contribuição formal à Consulta Pública do PNE 2050, o Brasil possui oportunidades de utilizar o H₂ na produção de amônia, na redução direta de minério de ferro, na produção de metanol, no refino de produtos petrolíferos ou na produção de eletrocombustíveis, fomentando a criação de um *cluster* industrial associado à produção de hidrogênio (GESEL, 2020).

Ao longo das últimas décadas, sobretudo após a estruturação do PROH₂, diversos projetos tecnológicos associando universidades, institutos (ou centros) de pesquisa e empresas foram bem-sucedidos no desenvolvimento de aplicações para a geração de H₂. Além disso, destaca-se a participação, nos contextos nacional e internacional, de empresas inovadoras, incubadas em centros de pesquisa ou fundadas por pesquisadores, que desenvolvem soluções e produtos relacionados ao H₂ (EPE, 2021). Neste ponto, o Brasil conta com redes de conhecimento já consolidadas, consideradas fundamentais para o aproveitamento das oportunidades que se abrem por força da dinâmica internacional.

Assim, o crescimento do mercado interno representa uma oportunidade para o Brasil internalizar na economia os efeitos positivos que este novo segmento poderá trazer, com a absorção de tecnologia e os desenvolvimentos industrial e social decorrentes de investimentos em capacitação de mão-de-obra e da geração de novos empregos.

Além disso, da mesma forma que os países desenvolvidos, as metas de descarbonização induzirão o Brasil a substituir os combustíveis fósseis atualmente utilizados na indústria e nos transportes por outros não emissores ou de baixa emissão de CO₂. No Brasil, diferentemente de países desenvolvidos, os setores de transporte e industrial são os que mais emitem carbono, com 47% e 21%, respectivamente. No contexto global, estas participações eram de 28% e 18%, respectivamente, no ano de 2018 (IEA, 2021).

A matriz energética dos transportes, que correspondeu a 32,7% do total de energia consumida no país, contou com 25% de participação de combustíveis renováveis (o etanol representou 20,6% do total e o biodiesel 4,5%), mas foi liderada pelo óleo diesel e pela gasolina (41,9% e 25,3%, respectivamente). A participação do gás natural, por sua vez, foi apenas de 2,4% do total (EPE, 2020). Destaca-se que o Programa Combustível do Futuro, anunciado recentemente, é uma oportunidade para ampliação da discussão acerca da inserção do H₂ no setor de mobilidade.

O *Hydrogen Fuel Cell Buses for Urban Transportation in Brazil*, iniciado em 2000, com financiamento da *Global Energy Facility* e do governo brasileiro (FINEP), teve como objetivo executar, juntamente com indústrias brasileiras, um projeto de demonstração para avaliação do desempenho de ônibus a células a combustível a H₂ (2 x 75 kW, armazenamento de 30,8 kg de H₂), incluindo a infraestrutura de operação. Ao longo do período do projeto, foram construídos e operados três ônibus.

Encerrado em 2017, o projeto foi considerado bem-sucedido sob o aspecto operacional e criou as bases para o desenvolvimento, a produção e a operação de ônibus a célula a combustível no Brasil. Destaca-se que seus resultados forneceram elementos para a ampliação do projeto a uma escala comercial (PANIK, 2017).

Adicionalmente, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, outro projeto resultou na construção e na operação de um ônibus híbrido bateria/célula a combustível, com a possibilidade de carregamento do banco de baterias a partir da rede, da célula a combustível e de um sistema de regeneração da energia de frenagem. A primeira versão deste veículo foi concluída em 2010, a segunda exibida, em 2012, na Conferência Rio+20 e um terceiro protótipo, em condições pré-comerciais, foi apresentado nos Jogos Olímpicos de 2016 (MIRANDA, 2017).

4.2. Desafios ao desenvolvimento da economia do hidrogênio

A partir destas perspectivas e oportunidades, cujo elemento determinante é a demanda externa por H₂V, são verificados, também, desafios ao desenvolvimento da economia do H₂ no contexto nacional, a serem endereçados para pesquisas futuras. Partindo da análise do PNE 2050, dois desafios podem ser identificados:

- i. O desenvolvimento da infraestrutura; e
- ii. A elaboração da normatização para consolidar a cadeia produtiva do H₂.

Conforme analisado anteriormente, a difusão do H₂V como vetor energético fundamental pressupõe o desenvolvimento de sistemas de armazenamento e transporte, bem como de uma rede de distribuição. Além disso, a discussão acerca da produção centralizada ou descentralizada é fundamental para o desenvolvimento de uma infraestrutura adequada, uma vez que impacta os demais segmentos da cadeia de valor do H₂.

A infraestrutura adequada para H2 exige, ainda, um processo de normatização e certificação dos equipamentos, das atividades e dos usos. De acordo com o PNE 2050, os aspectos de segurança e o transporte de H2 são questões prementes para sua difusão, em função de sua alta inflamabilidade e baixa densidade energética volumétrica (EPE, 2020).

As resoluções recentes do CNPE, bem como o desenvolvimento do Programa Combustível do Futuro e do Programa Nacional de H2, indicam que estes desafios – normatização, segurança e infraestrutura – podem ser equacionados em um futuro próximo, a depender da definição das diretrizes de prospecção e dos níveis de competitividade alcançados.

Desta maneira, no caso brasileiro, o posicionamento enquanto *hub* regional de H2V exige um processo de análise aprofundada acerca da capacidade de utilização da infraestrutura de gás natural para *blending* com o H2, dos custos e das particularidades da interligação de sua infraestrutura em um país de dimensões continentais.

Neste ponto, a decisão entre produção centralizada ou distribuída é considerada um desafio para superar as barreiras de inexistência de rede de transporte e de distribuição, considerando que eletrolisadores ou reformadores podem ser instalados próximos ao consumidor. No caso de exportação de H2V, que deverá apresentar um maior volume de demanda, a implementação de plataformas de produção de hidrogênio nos portos, como o Hub de Pecém, é uma estratégia a ser priorizada, tendo em vista o fato de que os modelos de negócio serão estruturados segundo a dinâmica e as decisões de investidores privados.

Entende-se que a exportação de H2 deve ser priorizada pelo Brasil, o que demandará o desenvolvimento um plano de ação consistente, vinculado ao PNH2, para fazer frente aos potenciais concorrentes internacionais. Países como Austrália, Chile, Espanha, Marrocos e Arábia Saudita, que também possuem grande potencial de geração de energias renováveis, já traçaram seus planos de ação para o desenvolvimento do H2V (*roadmaps*). Nota-se que estes países adotaram posturas agressivas na divulgação de seus potenciais e no oferecimento de condições para atrair investidores em plantas de H2V, acenando com possibilidades de financiamento e regulação de incentivo.

Em suma, e conforme apontado pela EPE (2021), diversas questões precisam ser equacionadas, no Brasil e no mundo, para o estabelecimento de um arcabouço institucional, legal e regulatório consistente. Neste sentido, destacam-se a governança legal e institucional a regulação e fiscalização do mercado e as condições de segurança, certificação de processos e especificações do combustível.

5. Considerações Finais

O H2 destaca-se, de forma hegemônica, como um recurso estratégico para o futuro da matriz energética mundial, firmando, a partir de seu processo de desenvolvimento gradual, a viabilidade econômica para investimentos, a sustentabilidade ambiental e a segurança de suprimento. Esta percepção é evidenciada com a formulação de estratégias nacionais, de políticas públicas e de *roadmaps* tecnológicos em diversos países, o que tem se intensificado nos últimos anos. Os avanços nos projetos e o crescente volume de investimentos para construir a cadeia produtiva de H2 demonstram a perspectiva concreta de criação de mercado mundial desta nova *commodity*, que poderá substituir, em termos de maior relevância e dinâmica econômica, o petróleo até 2050.

Aponta-se, mediante a análise realizada, que o H2V é inegavelmente considerado essencial para a descarbonização dos sistemas e estratégico para os países, sob a ótica da integração regional e de competitividade no mercado externo. Adicionalmente, a multiplicidade de usos finais e de aplicação em diversos segmentos industriais é um fator relevante para o desenvolvimento de novas tecnologias para o mercado mundial, que podem contribuir para um cenário significativamente favorável à redução de emissões e à descarbonização de setores, como a indústria e os transportes.

Devido às inúmeras possibilidades e à heterogeneidade de utilização e interação do H2 no contexto de transição energética, do Brasil e do mundo, bem como o potencial energético brasileiro associado às fontes renováveis e ao estabelecimento de parcerias internacionais para pesquisa, desenvolvimento e comércio deste vetor, considera-se o H2V como o recurso energético do Século XXI. Destaca-se, ainda, que o Brasil possui vantagens competitivas em relação ao H2V, com grande capacidade de se tornar um dos *players* mais importantes deste novo mercado mundial.

Convém, portanto, destacar que as questões técnicas associadas à integração do H2 com as fontes de energia ainda não estão completamente endereçadas. Juntamente com o mapeamento dos desafios e das oportunidades, são necessários novos estudos que analisem os aspectos sistêmicos da integração do H2V à regulação e ao desenvolvimento de instrumentos de incentivo, ações de promoção, regulamentações e padrões acerca das atividades e de seus usos.

No Brasil, o H2V pode vir a ser um vetor essencial para o armazenamento do excedente de geração de energia intermitente, de modo a equilibrar a rede, assegurar a estabilidade do sistema, auxiliar no atendimento de picos de demanda e, por fim, manter o sistema energético limpo, eficiente e sustentável.

A partir da redução dos custos de produção de energias renováveis, via o modelo de contratação de longo prazo através de leilões cada vez mais competitivos, e da presença de um número maior de investidores de diferentes matizes e países, o Brasil possui condições de viabilizar e consolidar a especialização na produção do hidrogênio, com elevado potencial de exportação e competitividade internacional.

Para tanto, o governo deve promover, através do PNH₂, a formação de um ecossistema de H₂V no Brasil, com o aumento do número de *players*, de maneira a desempenhar um papel facilitador, estendendo incentivos fiscais pontuais e datados para projetos de demonstração de hidrogênio, atualmente bastante reduzidos.

Além disso, a inserção dos países produtores de H₂V nas cadeias globais de valor apresenta benefícios para economia e oportunidades de compromissos multilaterais, bem como possibilita a ampliação da competitividade industrial, que estimula a criação de empregos e o crescimento econômico inclusivo e sustentável. Por este motivo, são necessários vastos esforços coordenados para criar linhas de financiamento específicos e estruturar políticas públicas que favoreçam o desenvolvimento da produção, do transporte, do armazenamento e da distribuição de H₂V no contexto nacional.

Por último, cabe reafirmar a relevância do potencial de produção de H₂V no Brasil, em função da crescente demanda deste recurso energético renovável pelo mercado internacional. Assim como em outros países, por exemplo, Chile e Austrália, o H₂V representa uma oportunidade concreta de reposicionamento econômico do Brasil no cenário energético e geopolítico mundial, com grande possibilidade de atuação como exportador para países da União Europeia, como a Alemanha. Desta maneira, a transição energética no cenário brasileiro adquire novos contornos, com o protagonismo do H₂V, atuando como recurso energético central e essencial para o desenvolvimento econômico, de modo a contribuir para a inserção do país no mercado e na transição energética mundial, graças à prioridade que deve ser dada, em uma primeira etapa, para a exportação, segmento em que a demanda será muito maior.

6. Referências Bibliográficas

ABDIN, Z.; ZAFARANLOO, A.; RAFLEE, A.; MÉRIDA, W.; LIPINSKI, W.; KHALILPOUR, K. R. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109620, 2019.

ACAR, C.; DINCER, I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*, v. 218, pp. 835-849, 2019.

ALBRETCH, U.; BÜNGER, U.; MICHALSKI, J.; RAKSHA, T.; WURSTER, R.; ZERHUSEN, J. *International Hydrogen Strategies. Final Report*. World Energy Council. Germany, 2020.

ALSTOM. Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered train. Disponível em: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>. Acesso em: 28 abr. 2021.

BMWI, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. *The National Hydrogen Strategy*. Berlin: BMWI, 2020.

CASTRO, N.; SANTOS, V. Programa nacional de H2 no Brasil. *Broadcast Energia*, Agência Estado de São Paulo, 13 de maio de 2021. Disponível em: http://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/59_castro_2021_05_16.pdf. Acesso em: 16 mai. 2021.

CASTRO, N.; CHAVES, A. C.; DORES, A. B. O Brasil na transição energética para o hidrogênio verde. *Valor Econômico*, 21 de janeiro de 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/opiniao/coluna/o-brasil-na-transicao-energetica-para-o-hidrogenio-verde.ghtml>. Acesso em: 16 mai. 2021.

CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025*. Série Documentos Técnicos. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CNPE, Conselho Nacional de Política Energética. Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 09 de março de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021>.

COAG, Council of Australian Governments. *AusH2 - Australia's Hydrogen Opportunities Tool*. 2021. Disponível em: <https://portal.ga.gov.au/persona/hydrogen>. Acessado em: 11 fev. 2021.

EC, European Commission. Declaration of the European Clean Hydrogen Alliance. European Clean Hydrogen Alliance, 2020c.

EC, European Commission. EU Emissions Trading System (EU ETS). Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en. Acesso em: 08 jan. 2021.

EC, European Commission. European Clean Hydrogen Alliance. European Commission Factsheet, 2020c.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2021.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Plano Nacional de Energia 2050. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.

ESMAP, Energy Sector Management Assistance Program. Green Hydrogen in Developing Countries. Washington, DC: World Bank, 2020.

EU Commission, DG Energy. Unit A4 - Energy datasheets: EU countries, 2020.

EU Commission, DG Move. Unit 3.2 - Environment datasheets: EU countries, 2020.

FCH 2 JU. Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition, 2019.

FRENCH, S. The role of zero and low carbon hydrogen in enabling the energy transition and the path to net zero greenhouse gas emissions: with global policies and demonstration projects hydrogen can play a role in a net zero future. Johnson Matthey Technology Review, v. 64, n. 3, pp. 357-370, 2020.

Global CCS Institute. Global status of CCS. Austrália: 2020.

Hydrogen Council. Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness February, 2021.

Hydrogen Europe. Hydrogen Europe Vision on the Role of Hydrogen and Gas Infrastructure on the Road Toward a Climate Neutral Economy. A Contribution to the Transition of the Gas Market. Bélgica: Hydrogen Europe, 2019.

IEA, International Energy Agency. The Future of Hydrogen Report: Seizing today's opportunities. Paris: International Energy Agency, 2019.

IEA, International Energy Agency. Data and Statistics. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Acesso em: 23 mar. 2021.

IEA, International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2020. Paris: International Energy Agency, 2020b.

IEA, International Energy Agency. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. Paris: International Energy Agency, 2019.

IEA, International Energy Agency. The role of CCUS in low-carbon power systems. Paris: International Energy Agency, 2020a.

IEA, International Energy Agency. World Energy Outlook 2020. Paris: International Energy Agency, 2020c.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi, 2020b.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Green Hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi, 2020a.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Global energy transformation: A roadmap to 2050. Abu Dhabi, 2019a.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

KELMAN, R.; GASPAR, L.; GEYER, F.; BARROSO, L.; PEREIRA, M. Can Brazil become a green H₂ powerhouse? *Journal of Power and Energy Engineering*, In press: (hal-02982790), 2020.

LIU, W.; SUN, L.; LI, Z.; FUJII, M.; GENG, Y.; DONG, L.; FUJITA, T. Trends and future challenges in hydrogen production and storage research. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 25, pp. 31092-31104, 2020.

ME, Ministério da Economia. CNPE propõe diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2021/abril/cnpe-propoe-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio>. Acesso em: 28 abr. 2021.

MIRANDA, P. E. V. *et al.* Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, pp. 13949-13959, 2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. CNPE aprova resolução que cria o Programa Combustível do Futuro. Brasília, DF, 2021. Disponível em:

<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-resolucao-que-cria-o-programa-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 28 abr. 2021.

OIES, Oxford Institute for Energy Studies. EU Hydrogen Vision: Regulatory opportunities and challenges. The Oxford Institute for Energy Studies, 2020.

PANDEV, M.; LUCCHESI, P.; MANSILLA, C.; LE DUGOU, A.; ABRASHEV, B.; VLADIKOVA, D. Hydrogen Economy: The future for a sustainable and green Society. *Bulgarian Chemical Communications*, v. 49, pp. 84-92, 2017.

PANIK, M. S. *et al.* Hydrogen fuel cell buses for urban transportation in Brazil results. EVS30 Symposium, Stuttgart, Germany, Oct. 9-11, 2017.

República Portuguesa. Estratégia Nacional para o Hidrogênio. Portugal: EN-H2, 2020.

SGOBBI, A.; NIJS, W.; DE MIGLIO, R.; CHIODI, A.; GARGIULO, M.; THIEL, C. How far away is hydrogen? Its role in the medium and long-term decarbonisation of the European energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, n. 1, pp. 19-35, 2016.

SIFFERT, N. *et al.* O papel do BNDES na expansão do setor elétrico nacional e o mecanismo de Project Finance. *BNDES Setorial* n. 29, pp. 3-36, mar. 2009

UYAR, T.; BEŞİKCI, D. Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 4, pp. 2453-2456, 2017.

Toda a produção acadêmica e científica do GESEL está disponível no site do Grupo, que também mantém uma intensa relação com o setor através das redes sociais Facebook e Twitter.

Destaca-se ainda a publicação diária do IFE - Informativo Eletrônico do Setor Elétrico, editado deste 1998 e distribuído para mais de 10.000 usuários, onde são apresentados resumos das principais informações, estudos e dados sobre o setor elétrico do Brasil e exterior, podendo ser feita inscrição gratuita em <http://cadastro-ife.gesel.ie.ufrj.br>

GESEL – Destacado think tank do setor elétrico brasileiro, fundado em 1997, desenvolve estudos buscando contribuir com o aperfeiçoamento do modelo de estruturação e funcionamento do Setor Elétrico Brasileiro (SEB). Além das pesquisas, artigos acadêmicos, relatórios técnicos e livros – em grande parte associados a projetos realizados no âmbito do Programa de P&D da Aneel – ministra cursos de qualificação para as instituições e agentes do setor e realiza eventos – work shops, seminários, visitas e reuniões técnicas – no Brasil e no exterior. Ao nível acadêmico é responsável pela área de energia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento do Instituto de Economia (PPED) do Instituto de Economia da UFRJ

ISBN: 978-65-86614-25-1

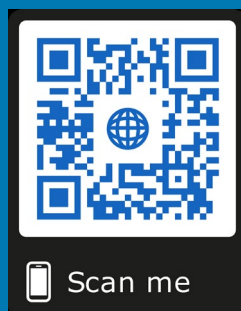
SITE: gesel.ie.ufrj.br

FACEBOOK: [facebook.com/geselufrj](https://www.facebook.com/geselufrj)

TWITTER: twitter.com/geselufrj

E-MAIL: gesel@gesel.ie.ufrj.br

TELEFONE: (21) 3938-5249
(21) 3577-3953



Versão Digital

ENDEREÇO:

UFRJ - Instituto de Economia.
Campus da Praia Vermelha.

Av. Pasteur 250, sala 226 - Urca.
Rio de Janeiro, RJ - Brasil.
CEP: 22290-240