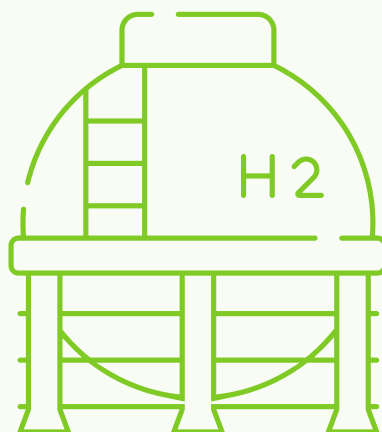
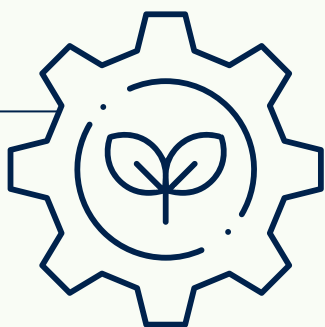


DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O BRASIL COM O **HIDROGÊNIO VERDE**



DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O BRASIL COM O **HIDROGÊNIO VERDE**

Realizadores

 HEINRICH BÖLL STIFTUNG
21 ANOS no BRASIL

 E+ transição energética

Apoiadores

 iCS
INSTITUTO DE CLIMA e SOCIEDADE

Agora 
Energiewende

Supported by:

 Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag

DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA O BRASIL COM O **HIDROGÊNIO VERDE**

Autoras

Victoria Santos e Amanda Ohara

Coordenação geral

Emílio Matsumura

Revisão técnica

Nathalia Paes Leme

Agradecimentos

Philipp Hauser, Camilla Oliveira, Roberto Kishinami

Projeto Gráfico e Diagramação

Beto Paixão

[behance.net/betopaixao](https://www.behance.net/betopaixao)

br.boell.org



[emaisenergia.org](https://www.emaisenergia.org)



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)



Publicação: Maio 2021



APRESENTAÇÃO

O interesse pelo hidrogênio não é novidade. Há quem o defenda como revolucionário para a descarbonização da economia, sendo, o elo faltante da transição energética. De tempos em tempos, propostas sobre a produção e uso do hidrogênio são apresentadas como possíveis soluções para um processo de descarbonização da matriz energética. Entretanto, ao analisar a viabilidade técnica e os impactos socioambientais, elas são descartadas ou consideradas “falsas soluções”, pois demandam alto custo de produção, enormes quantidades de água, ou simplesmente são “maquiagens verdes” para o contínuo uso de combustíveis fósseis.

A nova onda é o hidrogênio verde. Produzido a partir da eletrólise da água através de eletricidade renovável, ela vem sendo considerada por vários países como parte de uma estratégia de longo prazo para a descarbonização e cumprimento das metas do Acordo de Paris. Mas será que estamos diante de uma grande mudança no campo da energia? Ou será que se trata de maquiagem um modelo que apresenta as mesmas falhas e problemas de tentativas anteriores? Como a sociedade civil tem visto essa proposta?

Pensando nessas questões, a Fundação Heinrich Böll convidou especialistas de diferentes campos para apresentar suas visões sobre o hidrogênio verde, discutir possíveis aplicações e oportunidades para o Brasil, assim como levantar quais seriam os principais riscos e potenciais impactos no investimento desse modelo. Com isso, buscamos contribuir para a troca de informações e conhecimentos sobre o tema, apresentando ele-

mentos para buscar respostas para a seguinte questão: o hidrogênio verde é o caminho para uma produção de energia menos prejudicial ao meio ambiente e suas populações ou trata-se de mais uma “falsa solução”?

Apresentamos nas próximas páginas um estudo “Desafios e oportunidades para o Brasil com o Hidrogênio Verde”, produzido pelo Instituto E+ Transição Energética, que promove um olhar conceitual e os desafios e oportunidades econômicos na produção e uso do H₂ verde. Em seguida disponibilizamos uma entrevista com a Frente Energia para a Vida, que aponta os principais riscos e potenciais impactos que a produção e uso do hidrogênio verde pode ter no meio ambiente e na vida das pessoas.

Nós do escritório Brasil da Fundação Heinrich Böll acreditamos que qualquer processo de transição energética deve passar por uma descarbonização do setor que não impacte o meio ambiente e nem provoque um acirramento dos conflitos e das desigualdades sociais. A competitividade de um modelo energético não pode vir às custas de um processo que traga altos impactos socioambientais. Critérios devem ser estabelecidos para avaliação da sustentabilidade do hidrogênio e esperamos identificar esses elementos ao longo das atividades que promovemos. Dentre possíveis requisitos para o desenvolvimento e aplicação desta tecnologia estão o respeito ao uso tradicional da terra e do direito à água, participação da sociedade civil e das comunidades locais, além de se evitar o alto consumo da água e a produção do hidrogênio verde em áreas de alta biodiversidade.

Para motivar o debate sobre o tema, organizamos um webinar para discutir os desafios, oportunidades e riscos para o Brasil com o hidrogênio verde. O evento marcará o lançamento dos materiais supramencionados, e busca unificar o debate econômico, ambiental e social na discussão sobre o hidrogênio verde.

Outras atividades e materiais serão produzidos pela Fundação. Esperamos alimentar a promoção de diferentes perspectivas sobre o tema, reforçando a importância de um debate público inclusivo e propositivo.

Annette Von Schoenfeld

*Diretora do escritório
Brasil da Fundação Heinrich
Böll no Brasil*

Marcelo Montenegro

*Coordenador programático
de Justiça Socioambiental da
Fundação Heinrich Böll no Brasil*

RESUMO

Ondas de entusiasmo em relação ao hidrogênio já existiram em outros momentos do passado. Então o que há de diferente agora? Que papel o hidrogênio, em particular aquele produzido a partir da eletrólise de água com eletricidade renovável (chamado de hidrogênio verde), pode assumir na transição energética mundial? Metas de neutralidade climática, traduzidas em apostas bilionárias de economias maduras como Alemanha e Japão, e de economias crescentes como China, Chile e Coréia do Sul, parecem dar sustentação a esta nova onda. As perspectivas são audaciosas e muitas oportunidades se abrem a economias com grande infraestrutura industrial e disponibilidade de recursos renováveis, como o Brasil. No entanto, vale a pena o país investir em todas as etapas dessa cadeia? Há oportunidades reais no mercado internacional de tecnologias de produção, transporte e uso de hidrogênio verde? Qual o papel da eletrificação direta? Quais os caminhos estratégicos que se abrem para o país? E quais desafios precisam ser superados para realizar as oportunidades? O presente artigo oferece uma análise crítica e propositiva sobre o papel do hidrogênio verde na economia brasileira, e busca trazer elementos para auxiliar na formulação de políticas públicas e em tomadas de decisão que coloquem o país numa posição central no futuro verde que redesenha a indústria e o setor energético global.

HIDROGÊNIO NÃO É NOVIDADE, MAS PODE SER O ELO FALTANTE PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA

Com um mercado global atualmente avaliado em cerca de US\$ 120 bilhões,¹ o uso do hidrogênio, de acordo com IEA (2019), se concentra principalmente nas refinarias de petróleo, participando do hidrotreatamento e hidrocrackeamento de hidrocarbonetos (38 Mt/ano), e na produção de amônia (31 Mt/ano), voltada principalmente à fabricação de fertilizantes. Dos cerca de 70 Mt/ano de hidrogênio produzidos, 76% são produzidos a partir de gás natural e 23% de carvão, resultando na emissão de cerca de 830 MtCO₂ por ano em 2016-2017, o que equivale a 2,4% das emissões globais de CO₂ do uso de combustíveis. Além do uso de hidrogênio puro, mais 45 Mt de hidrogênio na forma de mistura com outros gases são utilizados anualmente na produção de metanol (12 Mt), na produção de aço a partir do minério de ferro (4 Mt) e em outras aplicações, como na geração de calor (IEA, 2019).

As principais razões para os usos atuais do hidrogênio estão em sua versatilidade química e alta reatividade. O hidrogênio é um gás leve e de altíssimo poder calorífico. Apesar dessa vantagem, a baixa densidade do gás dificulta o armazenamento e transporte, representando grandes desafios para seu uso como vetor energético universal.

No entanto, o que faz do hidrogênio tão interessante para a transição energética é justamente a ideia de que ele pode ser o elo que permite que a revolucionária redução de custos da geração renovável também atinja o âmbito dos combustíveis fósseis nas áreas de transporte, de indústria e nos usos domiciliares. Sempre que possível, a eletrificação direta dos usos energéticos é mais eficiente e econômica, a exemplo dos veículos elétri-

¹ Grand View Research (2020).

cos, das bombas a frio e calor ou dos eletro-fornos na indústria. No entanto, quando essa eletrificação direta não é viável, como em alguns processos industriais e de transporte, o hidrogênio se apresenta como uma possibilidade de eletrificação indireta. Assim, o que faz do hidrogênio tão interessante para a transição energética é o fato de que ele pode ser o elo faltante para que a revolucionária redução de custos da geração renovável também impacte esses setores difíceis de eletrificar.

Para que essa visão possa se tornar realidade é necessário assegurar fontes e estratégias de produção de um hidrogênio neutro em carbono, como também superar os desafios do transporte, armazenamento e distribuição do hidrogênio.



FONTES E CORES DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, mas pelo fato de não existirem fontes elementares naturais relevantes na Terra, ele não é visto como fonte de energia (L. Truche & E. F. Bazarkina, 2019). Como o hidrogênio deve ser gerado a partir de outras fontes energéticas ele é um vetor energético, como é o caso da energia elétrica.

O processo padrão de produção de hidrogênio é feito por meio da reforma de gás natural ou pela oxidação parcial de combustíveis fósseis, a exemplo do carvão. O processo libera grandes quantidades de dióxido de carbono de 10 tCO₂/tH₂ na faixa inferior para a produção a partir de gás natural, chegando de 12 até 19 tCO₂/tH₂ quando produzido a partir do carvão. O hidrogênio a partir destas fontes é denominado de **hidrogênio cinza** (IEA 2019).

A busca por processos e fontes energéticas que permitem sua produção sem a emissão de CO₂ para a atmosfera tem gerado uma série de propostas que, comumente, são referenciadas a base de uma série de cores para facilitar a discussão:

O **hidrogênio azul** é a produção do hidrogênio cinza em combinação com tecnologias de captura, uso, transporte e armazenamento de CO₂ (CCUS). Segundo a IEA (2019) existem experiências de produção com emissões residuais na ordem de 2 tCO₂/tH₂ e há potencial de reduzir as emissões de CO₂ nessa rota até um mínimo de 0,4 tCO₂/tH₂.

Outra variante de produção de hidrogênio com baixas emissões de CO₂ a partir do gás natural é a pirólise, que precipita o carbono na sua forma elementar. Sempre que esse carbono é armazenado ou utilizado de uma forma que impede sua combustão e emissão em forma de CO₂, o hidrogênio liberado pelo processo pode ser considerado como carbono neutro. O hidrogênio gerado dessa forma é denominado de **hidrogênio turquesa**.





Outras variações para a obtenção de hidrogênio de baixo carbono vêm da gaseificação da biomassa, ou da reforma ou pirólise do biogás. Se esses processos são acoplados a

tecnologias de captura, uso, transporte e armazenamento de CO₂ (BECCS, na sigla em inglês), podem resultar em emissões negativas de gases de efeito estufa (GEE).

Além dessas abordagens, que combinam os processos tradicionais de produção através da captura e do sequestro geológico do CO₂ gerado, a produção do **hidrogênio verde** através da eletrólise de água a partir da eletricidade renovável², sem a geração de CO₂, tem sido vista no cenário internacional como a solução dominante no longo prazo. Embora os custos desse processo ainda sejam altos, a perspectiva de maiores quedas dos custos da geração elétrica renovável pode levar à maior competitividade do hidrogênio verde no futuro. Além disso, a eletrólise tem capacidade de oferecer valiosas sinergias para o sistema elétrico e de complementar a eletrificação da economia³.

A Figura 1 apresenta um resumo das cores, fontes e processos de produção de hidrogênio citadas.

Figura 1
Fontes e cores de hidrogênio

Cor	Hidrogênio CINZA	Hidrogênio AZUL	Hidrogênio* TURQUESA	Hidrogênio VERDE
Processo	SMR ou gaseificação	SMR ou gaseificação com captura de carbono (85-95%)	Pirólise	Eletrólise
Fonte	Metano ou carvão 	Metano ou carvão 	Metano 	Eletricidade renovável 

Fonte: IRENA (2020).

Nota: SMR = reforma a vapor do metano.

*o hidrogênio turquesa é uma opção emergente de descarbonização.

² A eletrólise da água é uma reação eletroquímica na qual a energia elétrica derivada de fontes de baixo carbono, como a solar fotovoltaica, permite a quebra da molécula de água gerando hidrogênio e oxigênio.

³ A produção de hidrogênio por eletrólise pode ajudar a compensar a intermitência das fontes renováveis, viabilizando, por exemplo, a estocagem de eletricidade excedente. A geração de eletricidade pode ainda ser integrada à eletrólise num mesmo parque, permitindo flexibilidade para melhor combinar a disponibilidade de recursos com as necessidades operacionais do sistema e fatores de mercado.

Não é de hoje o interesse da sociedade em dominar tecnologias que permitam o aproveitamento seguro e rentável do hidrogênio considerando todos os seus atributos. Os séculos XX e XXI já presenciaram outros momentos de entusiasmo global onde investimentos massivos foram feitos buscando viabilizar o uso generalizado do hidrogênio como energético. No entanto, é a primeira vez que a ampliação da geração renovável e da sua redução dos custos oferecem a perspectiva de que a energia elétrica possa, de forma direta e indireta através da produção e do uso do hidrogênio, assumir um percentual significativo da energia que move nossas economias.

ONDAS QUE VÊM E QUE VÃO

Nos últimos 50 anos, ocorreram pelo menos três ondas de ampliação da economia do hidrogênio para além do setor industrial. Na década de 1970, quando da crise do petróleo, projeções de longo prazo indicavam que o hidrogênio produzido a partir do carvão e da eletricidade nuclear teria papel importante no fornecimento de energia, principalmente para o transporte. Nesse período, também foram criados o *International Journal of Hydrogen Energy* e o Programa de Colaboração de Tecnologia de Hidrogênio e Célula a Combustível da Agência Internacional de Energia (IEA).

No início dos anos 1990, com o aumento da preocupação com as mudanças climáticas, estudos sobre hidrogênio foram retomados, agora com foco na produção em combinação com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e no uso de fontes renováveis de energia. Fabricantes de automóveis também começaram a apresentar seus veículos a hidrogênio em feiras do setor em virtude do rápido progresso na tecnologia de células a combustível. Em 1996, os EUA lançaram o *Hydrogen Future Act*, uma das primeiras iniciativas em larga escala para acelerar a pesquisa e desenvolvimento em células a combustível a hidrogênio.

Já nos anos 2000, com as políticas para o clima e o ressurgimento das preocupações com a escassez do petróleo, havia a perspectiva de obtenção de hidrogênio a baixo custo a partir da geração de usinas nucleares mais baratas para a termólise da água, gerando esforços para a implantação mais ampla de veículos movidos a hidrogênio.

No entanto, nenhum desses esforços foi totalmente traduzido em investimentos crescentes e sustentáveis no desenvolvimento da economia do hidrogênio.

Na década de 2010, o recuo da narrativa do pico do petróleo, junto com a fragilidade dos desenvolvimentos das políticas climáticas e o progresso dos veículos elétricos a bateria - que demandam infraestrutura inicial mais baratas do que os veículos a hidrogênio - reprimiram ainda mais os investimentos em hidrogênio.

A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO DO CONTEXTO ATUAL: MAIS UMA ONDA OU UMA MUDANÇA ESTRUTURAL?

Três fatores principais distinguem o contexto atual das experiências anteriores: a urgência da descarbonização da matriz energética mundial, o posicionamento favorável à economia de hidrogênio de vários governos e grandes *players* industriais, e os recentes avanços tecnológicos com impactos positivos sobre a competitividade do hidrogênio.

Para combater as alterações climáticas no âmbito do Acordo de Paris, iniciativas para a redução de GEE têm sido centradas principalmente na estratégia de descarbonização das matrizes energéticas. Muitos países têm anunciado o objetivo de atingir emissões líquidas nulas de CO₂ (ou mais amplamente de GEE) para 2050. A eletrificação da matriz energética, com base na expansão das fontes renováveis (em particular, eólica e solar) cada vez mais competitivas, tem sido a estratégia primordial para o atingimento deste objetivo, porém insuficiente por si só. O uso de hidrogênio tem ganhado interesse como opção de descarbonização em países com poucas fontes renováveis e em setores de difícil ou custosa eletrificação (matéria-prima industrial, calor de processo a altas temperaturas, transporte a longa distância).⁴ Como resultado, *roadmaps* de hidrogênio já foram apresentados por 18 países (HYDROGEN COUNCIL, 2020b).

A Alemanha se destaca por possuir uma estratégia nacional detalhada para o estabelecimento de um mercado de hidrogênio crescente e funcional. Nesse sentido, o país anunciou, em 2019, investimento público da ordem de US\$ 10 bilhões em sua estratégia de

⁴ De acordo com Hydrogen Council (2017), o hidrogênio pode auxiliar a transição energética ao (i) permitir integração de maior percentual de renováveis na matriz elétrica, (ii) melhor alocar a energia entre setores e regiões, (iii) atuar como colchão (*buffer*) para aumentar a resiliência do sistema, (iv) reduzir a intensidade de carbono de diferentes setores (transportes, indústria e residências), além de (v) ser utilizado como matéria-prima na indústria.

hidrogênio até 2030. A título de comparação, o volume de subsídios que o país prevê para apoiar investimentos de produção e uso do hidrogênio que o país prevê para os próximos 10 anos equivale ao que foi investido no mundo inteiro em pesquisa e desenvolvimento em tecnologias do hidrogênio entre 2002 e 2017 (LAMEIRAS, 2019). Por outro lado, apenas em 2019, o apoio anual às energias renováveis na Alemanha foi de US\$ 28 bilhões, dos quais US\$ 10 bilhões foram subsídios para a energia solar (HYDROGEN COUNCIL, 2020b).

Com relação ao Japão, quinto maior emissor mundial de CO₂,⁵ o país possui estratégia nacional para o uso do hidrogênio desde 2017, a qual envolve o desenvolvimento de cadeias de suprimento internacionais e a promoção do uso deste gás e dos seus produtos nos setores de energia, transporte, industrial e para aquecimento.

Já a China, maior emissor global de GEE e maior produtor global de hidrogênio, anunciou que planeja adotar políticas e medidas mais vigorosas para atingir o pico das emissões de CO₂ antes de 2030 e a neutralidade em carbono antes de 2060. O país ainda não tem uma estratégia dedicada ou metas detalhadas de hidrogênio verde, mas a indústria local prevê que a maior parte da produção de hidrogênio mudará de combustíveis fósseis para fontes renováveis até meados do século XXI. É válido mencionar, no entanto, que um dos focos da política de hidrogênio da China tem sido a promoção de células a combustível, no qual é considerada pioneira, com meta de produzir 1 milhão de veículos até 2030.⁶ Além disso, a China se posiciona como produtor e exportador de equipamentos de eletrólise para disputar esse novo mercado emergente a nível global.

O Chile também lançou em 2020 uma estratégia nacional, na qual apresenta sua intenção em aproveitar seu potencial de geração renovável para se tornar um dos principais produtores mundiais em hidrogênio verde, focando a descarbonização de sua economia e, principalmente, em aproveitar as oportunidades emergentes no mercado internacional. A estratégia do país apresenta ações e prioridades do governo na busca por ocupar um papel de destaque no suprimento da demanda mundial de hidrogênio e de produtos de baixo carbono que podem ser obtidos a partir de sua disponibilidade.

Iniciativas pelo lado de importantes *players* industriais também reforçam o mais recente interesse geral sobre o hidrogênio. O Hydrogen Council, que reúne mais de 90 empresas com receitas combinadas da ordem de US\$ 2,5 trilhões, tem como objetivo acelerar a transição energética por meio da expansão do hidrogênio (HYDROGEN COUNCIL, 2000a).

O terceiro fator relativo ao renovado interesse no hidrogênio está na perspectiva de aumento da competitividade do hidrogênio de menor intensidade de carbono (hidrogênio

⁵ DW (2020).

⁶ Clean Energy Wire (2020).

azul e verde) em um cenário de implementação e de aumento do preço (ou taxa) de carbono nos próximos anos. No caso do hidrogênio verde, a queda nos preços das fontes renováveis (e.g., solar e eólica) e nos custos dos eletrolisadores nos próximos anos pode ajudar a reduzir o custo atual do hidrogênio verde de cerca de US\$ 6 por kg para US\$ 1 a US\$ 2 por kg na década de 2030 na perspectiva de significativas economias de escala (IRENA, 2020). Nesse caso, o hidrogênio verde poderia não apenas substituir o hidrogênio cinza, mas também combustíveis fósseis em alguns segmentos econômicos.

Os três fatores elencados mostram que a perspectiva favorável ao hidrogênio nas próximas décadas está fortemente correlacionada com a urgência da redução das emissões da matriz energética mundial. No entanto, o desenvolvimento da estratégia para o hidrogênio de cada país está diretamente associado com seus interesses sociopolíticos, econômicos e ambientais.



A PERSPECTIVA DE COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO

De acordo com o Hydrogen Council (2020b), a aposta no hidrogênio como matéria-prima e fonte energética para alcançar a neutralidade climática global pode fazer sua demanda saltar dos atuais 70 Mt ao ano para 500 Mt em 2050, representando 6 Gt de CO₂ a menos na atmosfera, US\$ 2,5 trilhões em receitas anuais, e 30 milhões de empregos diretos e indiretos em todo o mundo.

Nesse sentido, Hydrogen Council (2020b) estima que se o custo do hidrogênio chegar a aproximadamente US\$ 1,8 por kg até 2030, e o preço de CO₂ estiver na faixa de US\$ 50 por tonelada, o hidrogênio poderá alcançar 15% da matriz energética mundial. A redução de custos a este nível pode ser obtida principalmente pelo aumento da escala na produção e distribuição de hidrogênio, e na fabricação dos componentes e equipamentos associados à transformação energética. Para tanto, diferentes aplicações precisam ser desenvolvidas, escalonadas ou consolidadas, demandando políticas específicas juntamente com a adoção de diferentes modelos de negócio.

A tendência é que, nos próximos anos, as aplicações comerciais atuais migrem do hidrogênio cinza para o uso de hidrogênio azul com a incorporação de tecnologias de CCUS e, a longo prazo, sejam convertidas a hidrogênio verde, dependendo da velocidade de queda dos custos associados.⁷

No caso do hidrogênio azul, a disponibilidade a baixo custo de fontes fósseis (tipicamente o gás natural) e de tecnologias de CCS pode torná-lo interessante em contextos regionais específicos, com chances de aumentar a viabilidade de outras aplicações futuras do hidrogênio. Seu custo é atualmente cerca de 10% a 20% maior do que o do hidrogênio cinza e sua atratividade econômica depende mais fortemente da disponibilidade a baixo

⁷ Ainda assim, o hidrogênio cinza pode ter um papel inicial na estratégia de ampliar o uso de hidrogênio na matriz energética. Caso substitua fontes fósseis de maior intensidade de carbono (em especial quando é competitiva e facilmente disponível) pode permitir aumentar sua respectiva escala de produção facilitando posteriormente a substituição por hidrogênio de baixo carbono.

custo de armazenamento⁸ e transporte de CO₂. Contudo, a tecnologia de CCS a preços competitivos pode prescindir da transformação da fonte fóssil em hidrogênio, mantendo-se o uso direto do combustível fóssil com CCS.

No caso do hidrogênio verde, seu custo consiste basicamente em dois componentes: o custo da eletricidade a partir de fontes renováveis e o custo da eletrólise.

A crescente competitividade da eletricidade a partir de fontes renováveis tem sido um dos elementos fundamentais para tornar o hidrogênio verde uma alternativa possível em estratégias de descarbonização, principalmente em setores em que a eletrificação direta é custosa, como siderurgia, indústria química, transporte de longo curso, aviação e navegação (IRENA, 2020). O custo do hidrogênio verde é função de três fatores principais, todos sujeitos a diferenças regionais. O principal fator é a disponibilidade e o preço da eletricidade renovável que representam o principal custo da eletrólise. O segundo fator é o custo de capital da eletrólise que depende do valor do investimento na aquisição e instalação da planta. O terceiro elemento é o fator de carga da planta de eletrólise. Dependendo do país, o número de horas com disponibilidade de energia renovável é limitado, fato que impacta o preço da eletricidade.

A perspectiva de redução do custo da eletrólise (hoje em torno de US\$ 4 a US\$ 6 por kg de hidrogênio) está diretamente ligada à implantação comercial desta tecnologia. O Hydrogen Council (2020b) estima que 70 GW de eletrolisadores implantados até 2030 já seriam suficientes, associados a energias renováveis competitivas, para tornar o hidrogênio verde competitivo com o hidrogênio cinza.⁹ Esse patamar seria suficiente para alcançar ganhos de escala na produção, melhorias na eficiência do eletrolisador, automação e produção padronizada com melhorias tecnológicas e maiores equipamentos, além de reduções nos custos de operação e manutenção (O&M).

⁸ Os campos de petróleo e gás deplecionados apresentam-se, em geral, como candidatos ideais para armazenamento. No entanto, ainda são necessários investimentos associados à adequação do campo para armazenamento.

⁹ A instalação de 40 GW de eletrolisadores até 2030 já seria suficiente em regiões com acesso competitivo à eletricidade, de acordo com Hydrogen Council (2020b).

ONDE O BRASIL ESTÁ NA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO?

No âmbito das políticas públicas, o Brasil tem ações voltadas ao desenvolvimento da Economia do Hidrogênio desde 1975, com a criação do Laboratório do Hidrogênio (LH2), de acordo com Lameiras (2019). Em 2002, foi lançado o “Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível” (ProCaC), que, em 2005, foi reformulado recebendo o nome de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2) com a participação de empresas (Electrocell, Evonik, Unitech e Novocell) e universidades (SPINACÉ, sem ano). No entanto, não há registros atuais sobre a continuidade desses programas.

Mais recentemente, o país estabeleceu uma série de metas no “Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022” visando a utilização do hidrogênio, principalmente para uso veicular e estacionário na geração de energia e na produção de combustíveis. Dentre elas, pode-se salientar a formação e consolidação de redes de pesquisa e desenvolvimento em energia do hidrogênio; a promoção de estudos sobre o potencial do hidrogênio como vetor energético; e o incentivo a projetos demonstrativos. Em 2019, a Nissan e o Laboratório de Genômica e Bioenergia da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) assinaram contrato para avançar no desenvolvimento de células a combustível de óxido sólido (Lameiras, 2019).

Em fevereiro de 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) lançou o documento “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio”, na qual apresenta um panorama da indústria do hidrogênio, seus desafios e oportunidades, bem como um levantamento do histórico de iniciativas no Brasil relativas ao tema. O documento chama a atenção para a necessidade de consolidar e formalizar uma estratégia nacional em um plano de ação do Governo Federal em hidrogênio. A EPE defende, como abordagem “mais consistente e promissora” o direcionamento para uma estratégia de hidrogênio “arco-íris”, sem priorizar qualquer tecnologia, de modo a deixar o país aber-

to a oportunidades de desenvolvimento das diversas tecnologias de produção e uso do hidrogênio. A ausência de uma estratégia que enderece os desafios específicos para o hidrogênio verde no Brasil, embora pretenda evitar trancamentos tecnológicos e tirar proveito da diversidade e abundância de recursos energéticos do país, pode impactar o ritmo e dimensão do aproveitamento das oportunidades, como será discutido mais à frente neste documento.

Com relação às tecnologias para a produção de hidrogênio, o Brasil se diferencia com desenvolvimentos em escala piloto em tecnologias de reforma de etanol, biogás e glicerol, e na geração de hidrogênio verde a partir da fermentação de resíduos agroindustriais. Os sistemas de reforma têm capacidade para atender demandas de até 240 mil metros cúbicos/mês.¹⁰

Numa parceria com a Alemanha, o país já possui desenvolvimentos para a produção de querosene de aviação a partir de hidrogênio verde visando instalação em áreas remotas.¹¹ A maior disponibilidade de recursos internacionais para financiar projetos de produção de hidrogênio em outras nações pode apoiar a expansão desses desenvolvimentos no país visando o mercado internacional.

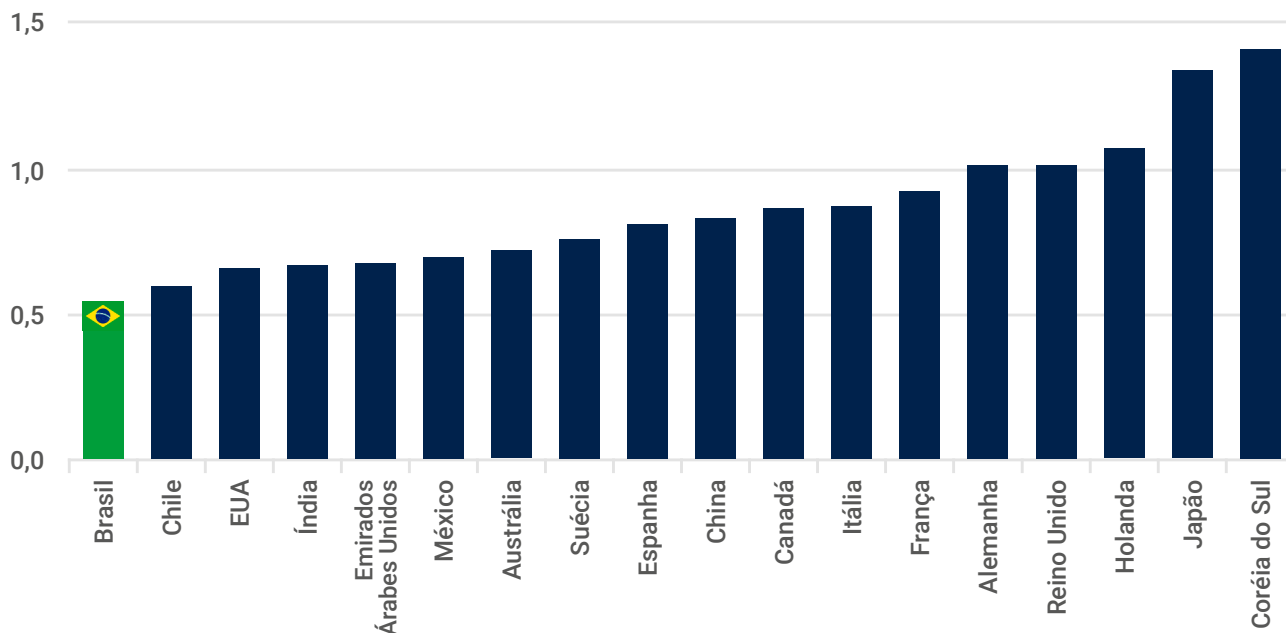
Em termos de perspectivas, a ampliação da eletrificação da matriz energética brasileira é uma oportunidade ambiental e econômica se realizada em bases predominantemente renováveis. De fato, a inserção competitiva das renováveis na matriz elétrica brasileira traz uma perspectiva bastante favorável a um posicionamento estratégico do país no mercado de hidrogênio verde, tornando-os um dos países mais competitivos do mundo neste produto no longo prazo, de acordo com a comparação internacional de custos nivelados estimados de produção de hidrogênio a partir de eletricidade renovável, conforme cálculos de BNEF (2021, apud TENGLER (2021)) – Ver Figura 2.

¹⁰ Siamig (2019).

¹¹ Siamig (2019).

Figura 2
Custo nivelado da produção de hidrogênio a partir de eletricidade renovável em 2050

\$/kg (real 2020)

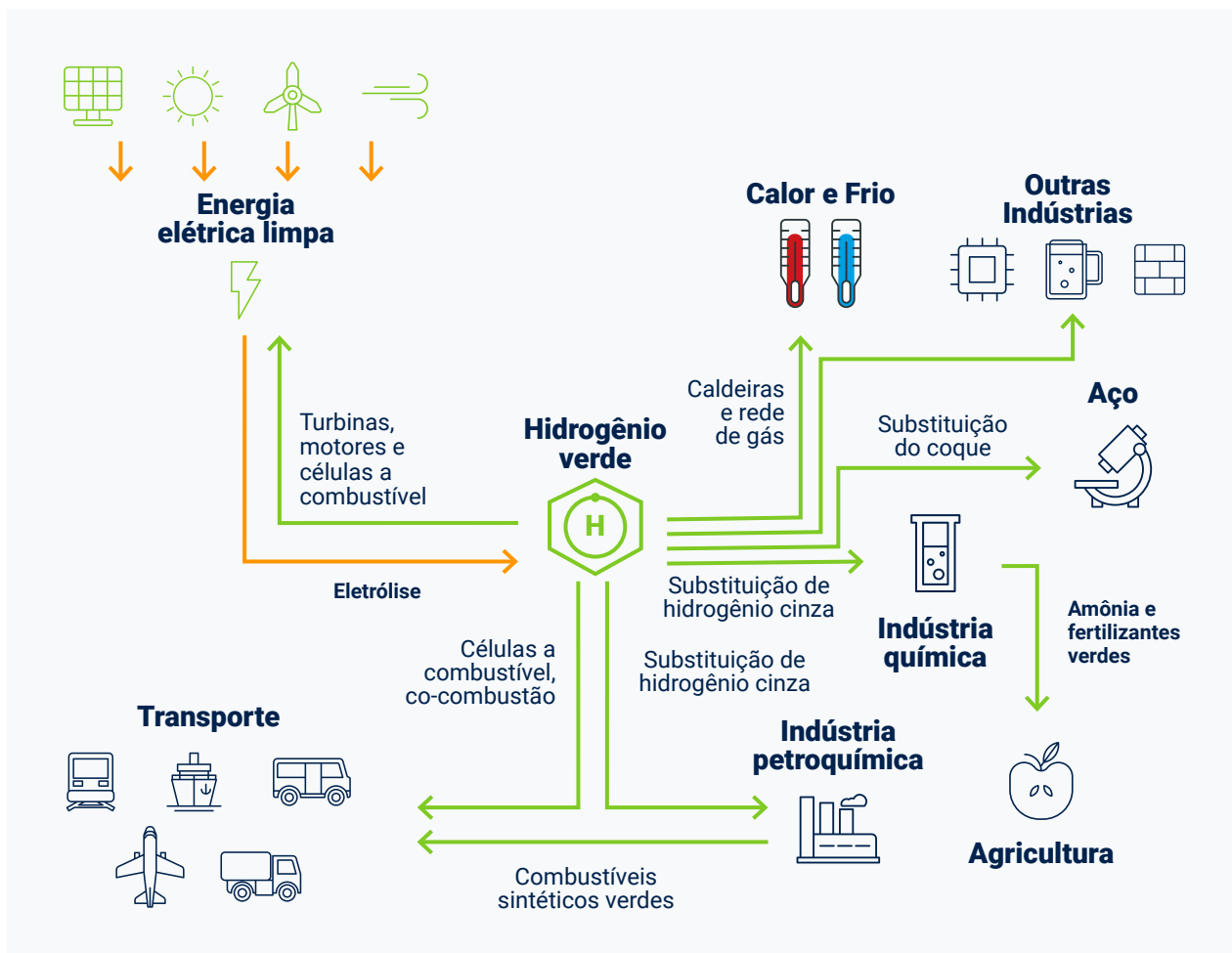


Fonte: BNEF (2021, apud TENGLER (2021)).

APLICAÇÕES MAIS PROMISSORAS PARA O **HIDROGÊNIO VERDE NO CASO DO BRASIL**

As análises de caminhos para a descarbonização das economias, discussão bastante avançada na Europa, apontam para um papel central da eletrificação direta e do hidrogênio verde. Como já citado, são diversos os processos de produção do hidrogênio, bem como seus usos. A Figura 3 ilustra as aplicações mais consideradas internacionalmente para o hidrogênio verde com foco na descarbonização das economias.

Figura 3
Potencial de descarbonização do hidrogênio verde



Fonte: Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde do Chile (2020).

Para Kearney Energy Transition Institute (2020), as maiores oportunidades para expansão do mercado do hidrogênio no horizonte até 2050 estão no seu uso na indústria como matéria-prima (química, siderúrgica, alimentos e refino)¹² e no transporte (especialmente no transporte de longas distâncias). A Tabela 1 abaixo apresenta um sumário dessas aplicações.

¹² Vale destacar que a utilização de hidrogênio nas refinarias de petróleo aumenta com a tendência de recrudescimento das especificações dos combustíveis enquanto, por outro lado, deve sofrer redução com a gradual eletrificação da frota.

Tabela 1
Aplicações do hidrogênio e respectivos estágios de desenvolvimento

FINALIDADE	FORMA	APLICAÇÃO	SETOR	ESTÁGIO TECNOLÓGICO*
Matéria-prima	Gás	Aumento do número mínimo de cetano e a diminuição de contaminantes do diesel	Refino de Petróleo	Comercial (H ₂ cinza)
Matéria-prima	Gás	Produção de amônia	Indústria Química	Comercial (H ₂ cinza) Pré-comercial (H ₂ verde)
Matéria-prima	Gás	Hidrogenação de óleo vegetal	Indústria de Alimentos	Comercial (H ₂ cinza)
Matéria-prima	Gás	Produção de metanol	Indústria Química	Comercial (H ₂ cinza) Pré-comercial (H ₂ verde)
Matéria-prima	Gás	Produção de nafta sintética (e-nafta)	Indústria Química	Pré-piloto (H ₂ verde)
Insumo	Gás	Redução direta de minério de ferro	Indústria Siderúrgica	Comercial (H ₂ cinza em mistura) ¹³
Energético	Gás	Geração de calor e eletricidade	Indústria	Comercial (H ₂ cinza em mistura)
Energético	Células a combustível	Geração de eletricidade	Indústria Transportes Construção civil	Comercial (H ₂ cinza em mistura) Pré-comercial (H ₂ verde)
Energético	Gás	Armazenamento de energia (principalmente para compensação de variações sazonais)	Rede elétrica	Pré-comercial (H ₂ cinza) Pré-piloto (H ₂ verde)
Energético	Combustíveis sintéticos	Propulsão de veículos	Transportes	Pré-piloto (H ₂ verde)

Nota: * Estágios tecnológicos:

- (1) Comercial - tecnologia madura e competitiva;
- (2) Pré-comercial - tecnologia em escala de demonstração ou piloto e ainda não competitiva;
- (3) Pré-piloto - tecnologia ainda nos estágios iniciais de desenvolvimento.

Fonte: Elaboração própria com dados de IRENA (2019) e da Escopo Energia (2020).

De acordo com Agora Energiewende (2021), embora haja uma ampla gama de aplicações possíveis, o uso do hidrogênio verde deve ser priorizado para setores onde a eletrificação direta, que em geral é mais eficiente, não é possível. Para esses casos, o hidrogênio ou

¹³ A atual utilização de hidrogênio na indústria siderúrgica se dá na forma de mistura com outros gases em unidades de redução direta, que respondem por 7% da capacidade instalada no mundo. A rota mais utilizada, que é a de alto-fornos, tem como coproduto uma mistura de gases que contém hidrogênio, que frequentemente é utilizada no processo (IEA, 2017).

produtos derivados de hidrogênio podem ser necessários, devido às suas propriedades químicas específicas, sua alta densidade de energia por unidade de massa ou seu potencial de armazenamento de energia de longo prazo.

Um aspecto importante para priorizar os usos é o fato de que o transporte de hidrogênio na sua forma elementar, como já comentado, enfrenta uma série de desafios técnicos e econômicos. Portanto, a exportação de hidrogênio como gás ou na forma líquida não se configura, até o momento, uma alternativa viável para o Brasil, levando em consideração a distância dos principais mercados consumidores. Entretanto, o país possui diversas características que lhe conferem um grande potencial na produção de hidrogênio verde a baixo custo na indústria nacional para a produção e exportação de produtos de baixo carbono para os mercados externos que demandam e remuneram essa propriedade ambiental.

Atualmente, as principais demandas de hidrogênio (cinza) no Brasil ocorrem no hidrotratamento e hidrocrackeamento de hidrocarbonetos nas refinarias (aproximadamente 320 mil tH₂/ano) (Cardoso, 2020), e na produção de amônia destinada à produção de fertilizantes (aproximadamente 145 mil tH₂/ano) (Farias et al., 2020). Enquanto a primeira aplicação de hidrogênio tende a se reduzir com a eletrificação da mobilidade urbana, a demanda de H₂ (verde) para a produção de amônia tende a aumentar, com a possibilidade de assumir um papel importante não só na produção de fertilizantes como também no transporte. Além disso, outras aplicações relacionadas ao comércio de *commodities* intensivas em energia merecem atenção no momento, embora ainda haja barreiras de custo e eficiência a serem superadas (IRENA, 2019). Neste artigo são destacadas três oportunidades para o Brasil relacionadas a aplicações do hidrogênio verde, levando em conta os diferenciais competitivos do país:

- 1) Uso na redução direta do minério de ferro para produção de ferro esponja no formato de HBI (Hot Briqueted Iron) para exportação ou para a produção doméstica de aço de baixo carbono. HBI é um produto de maior valor agregado que pode substituir a exportação do minério e apoiar a redução de emissões nas siderurgias da Europa, do Japão e de outros países com compromisso de redução das emissões industriais. O aço de baixo carbono representa uma oportunidade de diferenciação para atender aos crescentes nichos de demanda por produtos de baixo carbono.
- 2) Uso em combinação CO₂ renovável para a produção de nafta verde através da reação de Fischer-Tropsch como substituto sintético na produção de petroquímicos e combustíveis. No caso da Europa, já existe um mercado regulado para o uso desse tipo de combustível renovável e a indústria química tem interesse em desenvolver produtos orgânicos a partir de hidrocarbonetos renováveis.
- 3) Uso para a produção de amônia verde como insumo na produção de produtos químicos e fertilizantes ou como vetor energético para a exportação e uso no transporte marítimo.

1) USO DE HIDROGÊNIO VERDE NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA - PRODUÇÃO DE AÇO DE BAIXO CARBONO

O aço, por ser um insumo chave para engenharia e construção, é o metal mais utilizado na economia industrial moderna e tem grande relevância para a construção da infraestrutura necessária para a transição energética. No entanto, a grande quantidade liberada de gases de efeito estufa na sua produção não é compatível com esse papel estratégico e demanda uma solução urgente. Exceto pelo setor energético, a siderurgia é o setor industrial que mais emite CO₂, sendo responsável por cerca de 9% do total global de emissões diretas de combustíveis fósseis, de acordo com a World Steel Association. A maior parte das emissões do processo ocorre na etapa de redução do minério de ferro para a produção do ferro-gusa, na qual o ferro é separado do oxigênio com uso de um agente redutor. Na rota dominante para produção de aço, a reação ocorre em alto-fornos usando coque de carvão mineral como agente redutor, o que responde pela emissão global de cerca de 2,5 bilhões de tCO₂ por ano para a atmosfera (UNFCCC, 2020).

Para que os esforços para redução das emissões sejam efetivos, melhorias de eficiência no alto-forno não são suficientes e uma série de alternativas tecnológicas estão sendo discutidos (Agora Energiewende and Wuppertal Institute, 2021). A alternativa tecnológica mais promissora é a redução direta, na qual o minério é transformado em ferro metálico através de reações químicas envolvendo o estado sólido (minério) e o gasoso (gases redutores). O produto da redução direta é o ferro-esponja, ou DRI (*Direct Reduced Iron*), um produto intermediário que, diferentemente do ferro-gusa, não passa pelo estado líquido. O ferro-esponja pode ser briquetado para produzir HBI (*Hot Briqueted Iron*), um produto facilmente estocável e transportável. Sua exportação representa uma alternativa à exportação do minério bruto. No caso do uso do hidrogênio para sua produção, o HBI representa alto valor agregado para países ou empresas que tem o objetivo de descarbonizar a produção do aço. Além de descarbonizar o processo de produção, o HBI também reduz as emissões do transporte marítimo, quando comparado com a exportação do minério bruto.

A produção de DRI com gás natural é uma tecnologia consolidada que oferece uma redução de 60% das emissões quando comparado com o processo padrão no alto-forno. Dependendo da configuração da planta, o processo facilita o sequestro e o uso ou a estocagem do CO₂ residual gerado no processo com gás natural ou biogás. Além disso, o processo permite a substituição do gás natural por hidrogênio, permitindo assim uma produção sem emissões relevantes de CO₂.

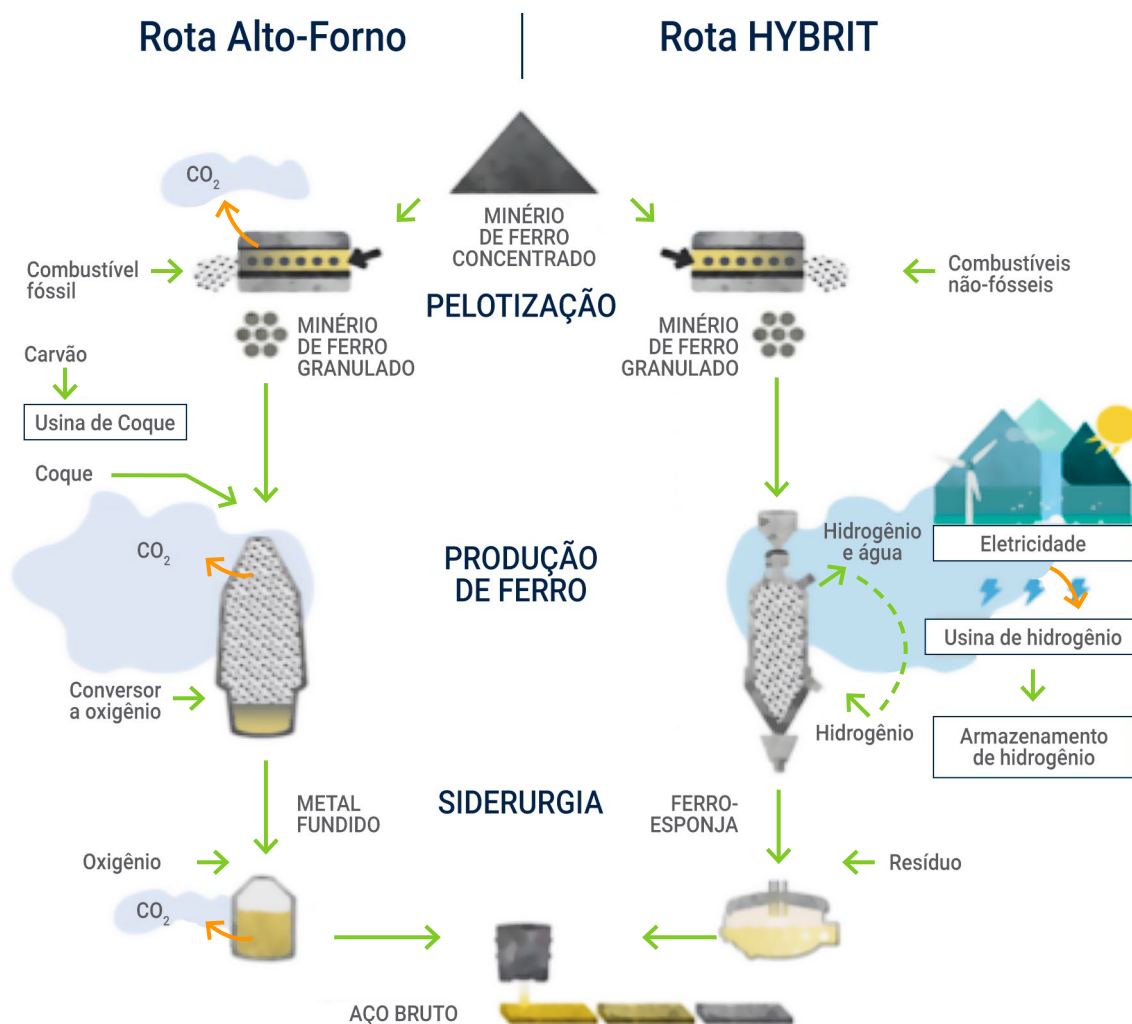
Como o DRI ou HBI é um produto intermediário sólido, seu beneficiamento demanda a fundição num forno elétrico a arco (EAF), que também é usado para o processo de conversão

em aço. Sendo assim, a combinação do processo de redução direta a hidrogênio verde com a produção de aço em fornos elétricos representa uma estratégia de eletrificação do processo de produção de aço que é capaz de substituir o processo tradicional a base de coque metalúrgico. Se a energia elétrica usada no processo vier de fontes exclusivamente renováveis, essa transformação representa uma forma eficaz de descarbonizar a produção do aço. A Figura 4 ilustra as diferenças entre a rota de produção de aço mais difundida, utilizando alto-forno, e a rota HYBRIT de produção de aço utilizando hidrogênio verde como combustível e agente redutor. O processo HYBRIT, da empresa SSAB, está sendo testado em uma planta piloto na Suécia, em operação desde agosto de 2020. A Suécia é um país produtor de minério e tem amplo potencial de geração renovável, tendo assim as condições de se posicionar como um exportador de HBI ou aço renovável.

O Brasil também tem vantagens comparativas extraordinárias para participar no processo da descarbonização da indústria siderúrgica global. O país tem papel de destaque mundial no suprimento de minério de ferro, ocupando o segundo lugar entre os países produtores (400 Mt de minério em 2020, com um conteúdo de ferro equivalente a 252 Mt) e em reservas (15 bilhões de toneladas de ferro, o que equivale a 18% do total de ferro disponível mundialmente). Somada a isso, a abundância de energias renováveis e água dá ao país o potencial de produzir hidrogênio verde a custos significativamente menores em comparação com outras regiões, o que pode se reverter num preço mais competitivo para o aço verde produzido no país.

Os investimentos para produzir HBI ou aço de baixo carbono para o mercado internacional podem ser uma excelente oportunidade para o setor, atraindo investimentos e gerando empregos na economia brasileira.

Figura 4
Ilustração das diferenças entre rotas de produção de aço



Fonte: IRENA, 2019.

2) PRODUÇÃO DE SUBSTITUTOS SINTÉTICOS PARA PETROQUÍMICOS E COMBUSTÍVEIS (ELETROCOMBUSTÍVEIS)

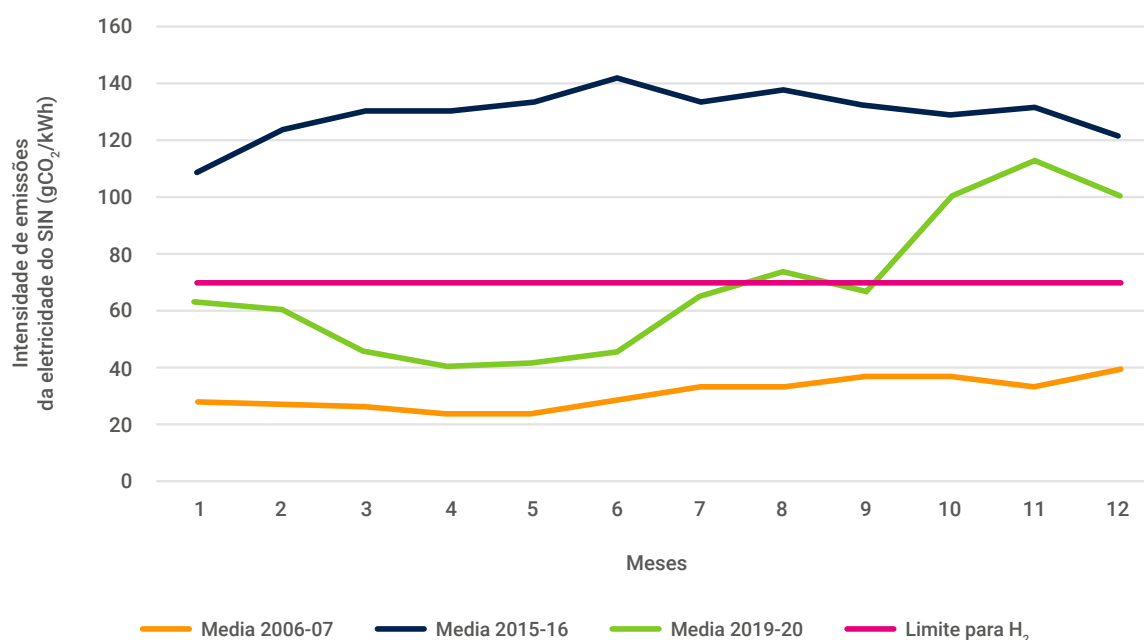
Eletrocombustíveis, ou e-combustíveis, constituem um conceito no qual o hidrogênio da eletrólise é combinado com CO_2 para a produção de combustíveis líquidos – também conhecido como *Power-to-X*. A combinação de H_2 e CO_2 pode produzir hidrocarbonetos sintéticos tais como metano, ou combustíveis líquidos sintéticos, como metanol, diesel, gasolina e querosene de aviação. Alguns desses produtos têm densidades de energia mais altas do que hidrogênio ou amônia e podem ser substitutos diretos para seus equivalentes fósseis. Vale ressaltar, entretanto, que a produção de combustíveis por essa rota dificilmente encontrará viabilidade econômica nas aplicações em que a eletrificação direta ou o uso de células a combustível é possível, dada a significativa diferença de eficiência.

Apesar dessa desvantagem, eletrocombustíveis são considerados pela Europa como uma estratégia para atingir as metas de redução das emissões de carbono na matriz energética do transporte, sobretudo nas modalidades onde a eletrificação direta não é possível, a exemplo da aviação e do transporte de carga. A Comunidade Europeia discute a participação mínima desses novos combustíveis no contexto da segunda revisão da “Diretiva sobre energia renovável” (*Renewable Energy Directive (RED) II*). A diretiva define a meta de aumentar a participação das energias renováveis no consumo final total de energia do setor de transporte em 14% para 2030. Para alcançar esse objetivo, a Comunidade Europeia limita a participação de biocombustíveis convencionais para assim promover os biocombustíveis avançados, como também os eletrocombustíveis, produzidos a partir do hidrogênio verde. Para definir as especificações que habilitam os eletrocombustíveis a participarem do mercado a diretiva exige que a redução de emissões do eletrocombustível em relação ao combustível convencional (de origem fóssil), medido no seu ciclo de vida, deve ser de, pelo menos, 70%. Embora a metodologia de cálculo ainda esteja em definição, a regra resulta numa intensidade máxima de emissões de GEE na geração elétrica no país de origem de algo em torno de $70 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$, especificação que poucos países do mundo são capazes de atender.

A Figura 5 apresenta a intensidade de emissões da eletricidade disponível no Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro ao longo dos meses do ano para alguns anos de referência. É possível verificar que a matriz de geração elétrica nos anos 2006-2007 atendia com facilidade o limite especificado pela regra europeia, o que mudou ao longo do tempo com as crises hidrológicas e o aumento da participação de térmicas a combustíveis fósseis – como se observa na média dos anos 2014-2015. Nos anos mais recentes, a intensidade de emissões tem variado ao longo do ano, habilitando o país a fazer parte deste mercado apenas durante alguns meses.

A redução das emissões no setor elétrico no Brasil abre, portanto, oportunidades de atender a esse mercado utilizando eletricidade da rede, integrando as vantagens sistêmicas da nova capacidade instalada com este fim e trazendo investimentos, empregos e renda gerada por essa cadeia produtiva.¹⁴

Figura 5
Intensidade de emissões da eletricidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro



Fonte: Elaboração própria com dados de MCTI (2021).

Outro diferencial do Brasil se apresenta na disponibilidade de fontes de carbono renovável, sustentável e de baixo custo. A produção de matérias-primas e combustíveis líquidos a partir de hidrogênio depende de quantidades significativas de CO₂ como insumo. Por exemplo, a substituição de toda a demanda global atual de querosene fóssil (em torno de 2.600 milhões de barris por ano) por querosene de aviação sintético exigiria 1 GtCO₂ por ano. Quando o combustível sintético for queimado, este CO₂ é novamente liberado para a atmosfera. Portanto, de uma perspectiva climática, a fonte de CO₂ tem importância central.

¹⁴ Embora os detalhes do cálculo da redução de emissão com base na análise de ciclo de vida ainda estejam em desenvolvimento, a opção mais simples indicada no caso do uso de eletricidade da rede elétrica é de usar como base a intensidade média de emissões de dois anos antes do ano em questão.

Uma possibilidade de obtenção de CO₂ se dá pela captura do gás gerado no processo da indústria sucroalcooleira, setor de bastante destaque na economia brasileira. Um estudo realizado por Silva et al. (2018) mapeia as principais destilarias do Brasil e calcula uma disponibilidade de 15 MtCO₂/ano. Como o CO₂ sai puro do processo, o custo da captura é bastante baixo (em torno de US\$ 11/tCO₂). Embora ainda incerto, o custo de captura de processos alternativos como o *Direct Air Capture* (DAC), por exemplo, pode chegar a uma faixa de US\$ 94 a 232/tCO₂, já considerando as projeções para uma redução dos custos no longo prazo (IEA, 2019).

A produção de eletrocombustíveis a partir do hidrogênio demanda ainda desenvolvimento tecnológico, e as vantagens competitivas listadas acima tornam o Brasil um potencial parceiro para países interessados em investir nesse desenvolvimento. Um exemplo disso é o projeto o “Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos” (ProQR), instituído pelo Acordo de Cooperação Técnica entre o Governo do Brasil e o Governo da Alemanha através da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) para desenvolvimento de um projeto de referência aplicável à produção local e ao uso de eletrocombustíveis renováveis para a aviação. Entre os desafios tecnológicos da rota pode ser citado o desenvolvimento de catalisadores para maximizar a produção de hidrocarbonetos na faixa do querosene de aviação.

Vale citar o histórico do país no desenvolvimento de tecnologias inovadoras na produção de combustíveis, permitidas pelo massivo investimento na indústria petrolífera nacional e por programas de incentivo aos biocombustíveis. O investimento em iniciativas como o Programa de Mobilização da Indústria Nacional de Petróleo e Gás Natural (PROMINP), iniciado em 2003 para responder ao aumento da demanda por profissionais qualificados para atuar no setor, permitiu a capacitação de um corpo técnico nacional especializado em processos relacionados à indústria de petróleo e gás natural. Com a redução de empregos disponíveis no setor, que vem ocorrendo nos últimos anos, há a oportunidade de aproveitar esse corpo técnico para se dedicar aos desafios apresentados no desenvolvimento tecnológico da cadeia de combustíveis sintéticos.

3) PRODUÇÃO DE AMÔNIA

A amônia é um composto de nitrogênio e hidrogênio e, portanto, não emite CO₂ quando queimado. É um gás à temperatura e pressão normais, mas pode ser liquefeito a -33° C uma temperatura que não é muito difícil de alcançar, sobretudo quando comparado com a temperatura de -253° C necessária para a liquefação do hidrogênio. Além disso, a amônia líquida tem densidade energética em relação ao volume 50% maior em rela-

ção ao hidrogênio líquido. Embora seja um composto tóxico, que requer cuidados no manuseio, a indústria tem experiência em seu armazenamento e transporte, inclusive em navios-tanque.

A amônia tem aplicações consolidadas como refrigerante e como matéria-prima para as indústrias de fertilizantes nitrogenados, explosivos e outros produtos químicos. Pode ainda, em princípio, ser usada como um combustível em várias aplicações de energia (por exemplo, para co-queima em usinas a carvão ou como combustível no transporte marítimo) e para permitir o transporte de hidrogênio à distância no futuro, atuando como um intermediário portador de hidrogênio, embora nenhuma dessas aplicações tenha uso comercial atualmente.

Se o hidrogênio precisa ser transportado em longas distâncias (maiores do que 1.500 km), como seria o caso da exportação do Brasil para o mercado europeu, a conversão em amônia com posterior reconversão pode se configurar a forma de transporte mais econômica. Apesar disso, os custos de conversão antes da exportação e reconversão de volta ao hidrogênio antes do consumo são significativos, e podem dar origem a questões de segurança e aceitação pública.

RISCOS

A atratividade da estratégia de exportação de hidrogênio verde ou de bens produzidos a partir de hidrogênio depende da competitividade nacional em relação a potenciais competidores. Por exemplo, se regiões (Chile, Austrália e Arábia Saudita) com energia renovável muito competitiva entrarem na corrida pela produção de hidrogênio verde, podem atrair para si segmentos industriais de grande consumo de energia em que o país hoje apresenta competitividade. Mesmo países com produção de hidrogênio azul com acesso a combustíveis fósseis competitivos e baixo custo de CCS poderiam também disputar mercado com o Brasil. Nesse caso, é necessário fazer uma análise mais aprofundada da competitividade por segmento industrial de interesse para avaliar a extensão da sua competitividade em termos internacionais.

Há ainda um risco associado ao *timing* de entrada na produção do hidrogênio verde. Como a eletrólise depende de ganhos de escala para redução significativa do custo e vários países já mostraram interesse em seu escalonamento, é possível o Brasil esperar queda suficiente no custo do eletrolisador para começar a produção de hidrogênio verde. Nesse caso, o risco maior ocorreria se o acesso aos potenciais mercados consumidores for baseado principalmente por meio de contratos de longo prazo, caso em

que fornecedores posteriores teriam maior dificuldade em entrar no mercado. Por outro lado, a possibilidade de acesso a financiamento externo associado a projetos de hidrogênio gera um incentivo à entrada mais cedo. Certamente, regiões em que o custo da eletricidade renovável é mais competitivo, além de custos de condicionamento, distribuição e transporte relativamente contidos, são candidatas com mais chance de acessar tais financiamentos.

A ausência de uma estratégia governamental específica para o hidrogênio verde também representa riscos que devem ser considerados. Visto que há regiões como o Chile, com elevado potencial de geração renovável de baixo custo e com posicionamento ambicioso, o Brasil pode perder espaço na onda de investidores internacionais. Dadas as expressivas vantagens competitivas descritas neste documento, é provável que as iniciativas em hidrogênio verde aconteçam no país mesmo sem a coordenação governamental. Entretanto, sem uma estratégia que norteie e coordene as iniciativas, seu avanço pode ocorrer em ritmo mais lento e a abrangência ficar limitada a projetos de menor escala, locais ou regionais, comprometendo o aproveitamento ótimo das oportunidades que se apresentam.

DESAFIOS

Apesar da perspectiva mais favorável ao hidrogênio nos últimos anos, sua trajetória de competitividade e o real comprometimento das políticas energéticas em relação ao hidrogênio ainda são incertos.

No curto prazo, dificilmente o hidrogênio conseguirá expandir seu uso para além dos setores em que é utilizado atualmente por conta do seu custo de fornecimento mais alto, além da infraestrutura e escala limitadas em relação às alternativas convencionais. Para aumentar a competitividade do hidrogênio verde neste estágio, o avanço na precificação do carbono emitido é uma ferramenta importante.

Em relação ao custo, a queda no custo de produção depende de aumento da escala de produção (o que resultaria em reduções significativas no CAPEX dos eletrolisadores) e da disponibilidade de energia em larga escala a preços competitivos.

O escalonamento dos sistemas de eletrólise da água é o foco de desenvolvimento dos países pioneiros, liderados por Alemanha e China. No entanto,

países como Holanda, Áustria, Austrália, França, Reino Unido, Noruega, Estados Unidos e Canadá também estão na corrida por tecnologias custo-efetivas de eletrolisadores (IRENA, 2019). A expansão inicial do hidrogênio a partir de eletrólise pode ser mais efetiva se associada ao acesso à energia renovável competitiva.

A DEMANDA DE ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A eletrólise requer cerca de 9 - 15 litros de água doce para produzir um kg de hidrogênio (e 8 kg de oxigênio). De acordo com Agora Energiewende (2021), o atendimento de toda demanda de hidrogênio verde que a Alemanha projeta importar em 2030 (44 TWh) exigiria cerca de 12 - 20 milhões de m³ de água, aumentando para cerca de 50 - 83 milhões de m³ em 2050 (para a produção de 184 TWh de hidrogênio).

No ano de 2017, o consumo total de água no Brasil foi de 329,8 bilhões de m³ (ANA, 2020), sendo os principais responsáveis os setores de agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura (97,4%), a indústria de transformação e construção (1,0%) e água e esgoto (0,8%).¹⁵ Com base nisso, ainda que o Brasil atendesse a toda a demanda alemã de hidrogênio verde importado, a água requerida para a eletrólise corresponderia a apenas 0,02% do consumo de água atual do país.

Embora, em um nível agregado, o consumo de água para eletrólise pareça ser um problema menor, é importante considerar a questão de estresse hídrico para o planejamento da instalação das unidades. Embora o Brasil seja o país com mais reservas de água doce no mundo e não apareça entre os países mais críticos quando se trata de estresse hídrico, as crises hídricas já são fato quando se avaliam regiões ou cidades específicas. De acordo com o *Aqueduct Water Risk Atlas*, publicado pelo World Resources Institute (WRI) em 2019, o Brasil ocupa a 116ª posição entre os países com maior risco de estresse hídrico, mas as regiões da Bahia, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte sofrem com níveis “extremamente altos” de risco de crise hídrica, um nível semelhante ao dos países do Oriente Médio.

Embora a crise hídrica precise ser considerada, há alternativas. A dessalinização em grande escala da água do mar tem um custo potencial relativamente baixo, em torno de US\$ 2/m³ de água, o que equivale a cerca de US\$ 0,02/kg de hidrogênio verde (IEA, 2019).

¹⁵ O consumo de água apresentado corresponde a água utilizada menos a água que retorna para o meio ambiente.

O custo de fornecimento do hidrogênio é também afetado pelas etapas de condicionamento e armazenamento, e de transporte e distribuição local, que podem chegar a ser equivalentes ao custo de produção do hidrogênio. Dessa forma, a produção descentralizada ou o consumo no próprio local de produção (*onsite*) permitem contornar tais tipos de custos na expansão inicial do hidrogênio, como ocorre já nos usos atualmente comerciais.

Para que o transporte de hidrogênio se torne viável economicamente, será necessário ampliar a infraestrutura, visando atingir patamar semelhante à movimentação de gás natural. Igualmente, duas possibilidades de transporte se apresentam: o transporte por dutos e o transporte marítimo. No caso dos dutos, será necessário levar em conta o custo de adaptação da malha existente de gás natural para o hidrogênio para transporte a longa distância. A necessidade de expansão da malha para transporte de hidrogênio pode torná-lo não-econômico frente às alternativas convencionais. Em relação ao transporte marítimo internacional,¹⁶ os principais desafios estão em viabilizar o escalonamento e distribuição geográfica das aplicações em virtude dos requisitos de segurança operacional e dos custos com logística, especialmente na perspectiva de um mercado internacional. A logística de exportação nos curto e médio prazos ainda é muito restritiva para o transporte do hidrogênio molecular, implicando em custos muito elevados para compressão ou liquefação do gás e garantia da segurança operacional. Desse modo, a alternativa que se destaca é a conversão do hidrogênio em produtos cujo transporte entre longas distâncias tenha soluções comerciais, como é o caso do aço verde, da amônia, do metanol, da nafta e dos eletrocombustíveis. No caso da amônia, entretanto, se for necessária a reconversão para obtenção do hidrogênio, há que se acrescentar o custo adicional desta etapa de processamento. Desse modo, um caminho de desenvolvimento e aprendizado ainda precisa ser trilhado para uma rede de transporte e armazenamento de hidrogênio além-mares.

Em relação à infraestrutura de distribuição, também são fundamentais ganhos de escala nos canais de distribuição e postos de abastecimento para tornar o hidrogênio mais atrativo para os consumidores finais frente às alternativas usuais. Por outro lado, a necessidade de investimentos significativos na construção ou reaproveitamento das redes de distribuição do gás natural para o hidrogênio podem tornar a substituição menos interessante. Neste caso, a eletrificação direta é mais factível e eficaz, e ressalta-se o risco de investimentos em infraestrutura para gás natural com intenções de adaptação futura para o hidrogênio se tornarem ativos encalhados.

Em relação à escala, é necessária a implantação de uma capacidade suficiente de eletrolisadores para gerar queda no seu custo de produção. A maior produção de hidrogênio

¹⁶ O hidrogênio pode ser movimentado de diversas formas, das quais as principais são hidrogênio comprimido, líquido, amônia e transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHC).

também pode levar a ganhos de escala no transporte e distribuição, associados a maiores volumes de consumo na utilização da infraestrutura de transporte e distribuição. Por exemplo, os consumidores de hidrogênio como matéria-prima podem garantir escala para viabilizar a indústria de hidrogênio. Como são em geral em menor número e têm necessidades expressivas de consumo, esses consumidores poderiam acelerar o processo de substituição para hidrogênio mais limpo em comparação com uma estratégia de expandir a produção baseada no uso distribuído, o que é mais comum em segmentos como transportes e aquecimento residencial.

Políticas de incentivo bem desenhadas e com *roadmaps* bem fundamentados podem gerar a expansão inicial necessária para o hidrogênio se beneficiar dos ganhos de escala que o tornarão mais atrativo economicamente. A divulgação de *roadmaps* e estratégias nacionais feita por diversos países é um passo necessário para dar uma visão de longo prazo para o hidrogênio, mas a coordenação das estratégias dos diversos *stakeholders* é outra função essencial do governo para atingir os objetivos traçados.

Outro desafio consiste em amplificar a cooperação internacional para que soluções específicas não impeçam o desenvolvimento do comércio internacional de hidrogênio. Nesse sentido, o desenvolvimento de regulação internacional consistente para reduzir as especificidades regionais e o aumento da padronização internacional do hidrogênio podem constar como aprimoramentos regulatórios para permitir a expansão do hidrogênio. Por exemplo, é improvável que o hidrogênio líquido se torne uma opção viável para navios de contêineres intercontinentais se só puderem ser reabastecidos em apenas uma região. E o mesmo pode ser pensado para a aviação.

A adequação da regulação não deve visar apenas às questões para maior *commoditização* do hidrogênio em relação ao mercado mundial. No nível doméstico, há também questões relacionadas à precificação (ou taxação) de carbono. Neste caso, o preço (ou taxa) de carbono é necessário(a) para tornar o hidrogênio competitivo com os combustíveis convencionais em atividades econômicas em que o hidrogênio não é uma opção econômica. O exato valor da taxa de carbono depende de qual é o seu papel na descarbonização da matriz energética e dos impactos na competitividade econômica do país.

Contudo, ainda que o hidrogênio apresente uma trajetória de queda expressiva de custos, ainda é necessário avaliar sua competitividade relativa frente aos potenciais energéticos competidores.

Por exemplo, sempre que comparado à eletrificação direta, a atratividade do hidrogênio como opção de descarbonização fica reduzida. Analogamente, a disponibilidade de tecnologias de CCS a baixo custo em países com acesso a fontes fósseis muito competitivas também dificultaria a expansão da participação do hidrogênio na matriz energética.

A possibilidade de avanços em outras tecnologias competidoras (como a bateria) nas potenciais aplicações de uso do hidrogênio pode também reduzir sua atratividade. A suplantação dos veículos a células a combustível pelos veículos elétricos como alternativa de descarbonização no transporte individual é um bom exemplo de como apostas direcionadoras em tecnologias particulares podem se mostrar *ex-post* equivocadas e eventuais causadoras de *lock-in* tecnológico. Assim, a transformação para uma opção tecnológica mais competitiva pode ser custosa devido ao uso amplo e disseminado de outra opção menos competitiva, dificultando (ou impedindo) a sua substituição.

Um desafio que pode se mostrar relevante na ausência de energia renovável dedicada à produção de hidrogênio está relacionado à prova de origem do hidrogênio de baixa emissão. Uma vez produzido o hidrogênio, não é possível atestar qual a fonte energética utilizada. Assim, plantas de hidrogênio ligadas à rede de energia podem ter contestadas sua classificação de hidrogênio verde. Para este caso, torna-se necessário estabelecer um sistema de certificação, que precisa ser bem pensado para não encarecer sobremaneira e até inviabilizar a cadeia produtiva. No caso do Brasil, que apresenta uma matriz elétrica de baixas taxas de emissão de GEE relativamente a outros países do mundo, as sinergias da produção de hidrogênio associada ao sistema elétrico como uma forma de fornecer flexibilidade trazem um estímulo à manutenção de um sistema elétrico de baixa emissão.

Por fim, não podem ser deixados de lado os desafios sociais enfrentados pelo Brasil, um dos países mais desiguais do mundo e que enfrenta o sucessivo agravamento da pobreza. Os investimentos relacionados à cadeia de produção de hidrogênio verde e seus usos podem se reverter na geração de emprego e renda no país. Vale ressaltar que o Nordeste, que tem a maior concentração de pobreza entre as regiões brasileiras, se destaca pelo potencial de geração eólica e solar, sendo uma das mais promissoras para empreendimentos dessa natureza. Para tanto, essas oportunidades precisam ser pensadas estrategicamente, prevendo a capacitação necessária para permitir que a população ocupe os postos de trabalho gerados nesses empreendimentos. Além disso, deve haver um amplo processo de discussão dos impactos sociais e ambientais da implantação dessas cadeias de produção, com o envolvimento das comunidades locais, de modo que os investimentos tragam, de fato, impacto positivo para a sociedade brasileira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alavancado pelo renovado interesse como opção viável e escalonável de descarbonização da matriz energética de vários países, a Economia do Hidrogênio está prestes a se consolidar, apresentando um amplo espectro de oportunidades para os diferentes países e empresas interessados nesse mercado. Contudo, a atratividade das aplicações de hidrogênio depende da atividade econômica e da região (preços de energia, disponibilidade de infraestrutura, arcabouço regulatório e políticas energéticas).

Para o Brasil, o hidrogênio, a menos de reduções expressivas de custo nos próximos anos, não deverá ter a mesma importância na descarbonização adicional da matriz energética brasileira (ainda que possíveis aplicações em nível regional sejam interessantes) por conta da ampla disponibilidade de alternativas com baixa ou nula emissão de GEE. No entanto, o Brasil tem a oportunidade de se posicionar com vantagem no mercado internacional, pois pode produzir hidrogênio verde de forma competitiva.

No caso da exportação direta do hidrogênio verde, sua competitividade internacional está diretamente associada ao custo de condicionamento, distribuição e transporte aos principais mercados consumidores. Isso significa que, provavelmente, a produção de hidrogênio deverá ocorrer próxima aos corredores de exportação (por exemplo, nas áreas próximas a portos de exportação), e será competitiva na medida em que os custos de transporte não forem significativos a ponto de influenciar o custo de colocação do hidrogênio verde nacional nos mercados internacionais.

Esse artigo destaca três aplicações para o hidrogênio em que o Brasil tem vantagens competitivas, numa análise preliminar geral: na produção de aço de baixo carbono, na produção de substitutos sintéticos para petroquímicos e combustíveis, e na produção de amônia. Há, contudo, desafios associados à inserção desses produtos no mercado internacional. Assim, uma análise mais detalhada das condições e perspectivas de competitividade do hidrogênio verde nacional nos mercados internacionais é, portanto, necessária. De qualquer forma, a inserção do hidrogênio de baixo carbono nos mercados internacionais demanda ações coordenadas do poder público em parceria com o setor privado.

REFERÊNCIAS

Agora Energiewende (2021). **No-regret hydrogen: Charting early steps for H₂ infrastructure in Europe**. Disponível em: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_EU_H2Grid/A-EW_203_No-regret-hydrogen_WEB.pdf

Agora Energiewende and Wuppertal Institute (2021): **Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe: Policy and Technology Pathways for Raising EU Climate Ambition**. Disponível em: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/breakthrough-strategies-for-climate-neutral-industry-in-europe-study/>

ANA (2020). **Contas econômicas ambientais da água: Brasil 2013-2017**.

BNEF (2021, apud TENGLER (2021)). **1H 2021 Hydrogen Levelized Cost Update**. Citação disponível em: https://www.linkedin.com/posts/martin-tengler-25701a29_1h-2021-hydrogen-levelized-cost-update-activity-6785521378348167168-DmJB

Capital verde (2020). Disponível em: <https://eco.sapo.pt/2020/07/30/do-cinzeno-ao-verde-passando-pelo-azul-porque-tem-o-hidrogenio-tantas-cores/>

Clean Energy Wire (2020). Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/news/europe-vies-china-clean-hydrogen-superpower-status> Acesso em 19 de dezembro de 2020.

DW (2020). Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/jap%C3%A3o-quer-alcan%C3%A7ar-neutralidade-de-carbono-at%C3%A9-2050/a-55401105> Acesso em 19 de dezembro de 2020.

Escopo Energia (2020). **Hidrogênio – Uma aposta para um futuro sustentável**.

EU Diretiva, 2018/2001 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 11 de dezembro de 2018 relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde do Chile (2020). Disponível em: https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf

EPE (2020a). **Balanço Energético Nacional 2020. Relatório Síntese: ano base 2019**. Empresa de Pesquisa Energética. Maio de 2020.

_____ (2020b). **Plano Nacional de Energia 2020**. Empresa de Pesquisa Energética. Dezembro de 2020.

_____ (2021). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Fevereiro de 2021.

Grand View Research (2020). Disponível em: Corrigir: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/hydrogen-generation-market#:~:text=The%20global%20hydrogen%20generation%20market,4.32%25%20over%20the%20forecast%20period.>

Green Car Future (2019). **History of Hydrogen Cars and Technology, from 1802 to present!** 05 de abril de 2019. Disponível em: <https://www.greencarfuture.com/hydrogen/history-of-hydrogen-cars> Acesso em 04 de janeiro de 2021.

Hydrogen Council (2017a). **Hydrogen scaling up – a sustainable pathway for the global energy transition**. Novembro de 2017.

_____ (2017b). *Roadmap towards a hydrogen economy: market perspective*. Setembro de 2017.

_____ (2020a). *Global interest for hydrogen soars as Hydrogen Council grows to 90+ members*. 27 de julho de 2020. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/newmemberannouncement2020-2/> Acesso em 04 de janeiro de 2021.

_____ (2020b). *Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective*. Janeiro de 2020.

IEA (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. June 2019.

IRENA (2019). *Hydrogen: a renewable energy perspective*. Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan.

_____ (2020). *Green hydrogen: a guide to policy making*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kearney Energy Transition Institute (2020). *Hydrogen applications and business models: going blue and green?* Julho de 2020.

Lameiras (2019), F. L. **O hidrogênio como vetor de energia**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Superior de Guerra. Rio de Janeiro. 2019.

Laurent Truche and Elena F. Bazarkina (2019). *Natural hydrogen the fuel of the 21st century*. E3S Web Conf., 98 (2019) 03006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199803006> Disponível em https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/24/e3sconf_wri-162018_03006.pdf Acesso em 24 de janeiro de 2021.

Lux Research (2019). *The future role of green hydrogen*. Webinar. 20 de março de 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KdEIAVesAH0> Acesso em 05 de janeiro de 2021.

MCTIC (2018). **Plano de ciência, tecnologia e inovação para energias renováveis e biocombustíveis: 2018-2022**. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. Governo Federal.

_____ (2021). **Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho**. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_despacho.html

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020). *Towards a Climate-Neutral Germany. Executive Summary conducted for Agora Energiewende, Agora Verkehrswende and Stiftung Klimaneutralität*.

Siamig (2019). Disponível em: <http://www.siamig.com.br/noticias/startups-desenvolvem-tecnologia-para-atender-futura-demanda-pelo-hidrogenio-combustivel>

Silva et al. (2018). *CO₂ capture in ethanol distilleries in Brazil: Designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.02.018>

Spinacé, E. V. (sem ano). **Redes de Células a Combustível PEMFC – ProH2**. Centro de Células a Combustível e Hidrogênio (CCCH). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP). Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/EstevamVSpinace.PDF> Acesso em 24 de dezembro de 2020.

TENGLER, Martin. Texto do LinkedIn. Disponível em: https://www.linkedin.com/posts/martin-tengler-25701a29_1h-2021-hydrogen-levelized-cost-update-activity-6785521378348167168-DmJB. Data da Publicação: 07 de abril de 2021. Acesso em 09 de abril de 2021.

UNFCC (2020). *Greenhouse gas inventory data* – Flexible Queries Annex I Parties.

USGS (2021). *Iron Ore*. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-iron-ore.pdf>. Acesso em 5 de abril de 2021.

WRI (2019). *Aqueduct Water Risk Atlas*. World Resources Institute.

■■■ HEINRICH
BÖLL
STIFTUNG
21 ANOS
no BRASIL

SOBRE A FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL:

Promover a democracia e defender os direitos humanos; atuar em defesa da justiça socioambiental; promover a igualdade entre mulheres e homens; garantir a paz por meio da prevenção de conflitos em zonas de crise e defender a liberdade dos indivíduos – estes são os objetivos que impulsionam as ideias e ações da Fundação Heinrich Böll, uma organização política alemã, sem fins lucrativos. Embora a Fundação mantenha laços estreitos com o Partido Verde Alemão, ela trabalha de forma independente e nutre um espírito de abertura intelectual. Integramos uma rede internacional que abrange mais de 160 projetos parceiros em aproximadamente 60 países. No Brasil cooperamos com projetos de diversas organizações da sociedade civil que promovem os valores que defendemos. Além de projetos nos campos da segurança pública, gênero, ecologia, entre outros, promovemos debates e produzimos publicações disponíveis em nosso site para download gratuito e na íntegra.

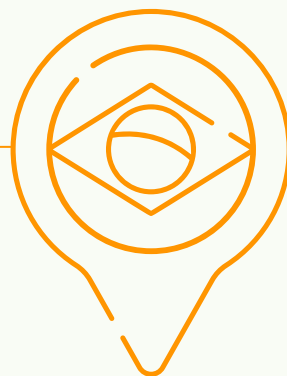
É com prazer que seguimos o conselho de Heinrich Böll de que envolver-se é a única forma de transformar a realidade. Queremos inspirar outras pessoas a fazerem o mesmo.

 transição
energética

SOBRE O INSTITUTO E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA:

O Instituto E+ Transição Energética é um think tank independente que promove o amplo diálogo para pautar a transição energética como vetor para o crescimento econômico de baixo carbono.

Com foco no debate baseado em evidências científicas, o Instituto E+ trabalha com uma equipe multidisciplinar e parceiros, produzindo conhecimento e estudos sobre soluções tecnológicas, sociais e econômicas para uma transição energética eficaz e eficiente.



**DESAFIOS E
OPORTUNIDADES
PARA O BRASIL
COM O **HIDROGÊNIO
VERDE****

