

CAPA



NA ROTA DO HIDROGÊNIO SUSTENTÁVEL



H₂

H₂

H₂

H₂

Brasil inicia a produção do combustível, estratégico para a transição rumo a uma economia de baixo carbono

Yuri Vasconcelos | ILUSTRAÇÕES Mauricio Pierro

O Brasil está entre os países mais bem posicionados para a produção em larga escala de hidrogênio de baixa emissão de carbono, combustível com alto poder calorífico apontado como importante vetor para a transição energética. O país tem potencial técnico para gerar 1,8 gigatonelada de hidrogênio por ano, sendo por volta de 90% desse volume com uso de energias renováveis. Os dados integram o Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

O estudo identifica diversas fontes e rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio de baixo carbono, considerado por muitos especialistas o combustível do futuro por sua capacidade de auxiliar na descarbonização do planeta. É esperado que ele venha a substituir o uso de combustíveis fósseis em setores da economia como o de transportes e de indústrias intensivas em energia (siderúrgicas, metalúrgicas, cimenteiras). Os combustíveis fósseis são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), associados ao aquecimento global e às mudanças climáticas.

Hidrogênio de baixa emissão de carbono é a nova terminologia empregada pela Agência Internacional de Energia (IEA) para designar o hidrogênio (H₂) produzido por diferentes rotas com emissão nula ou reduzida de dióxido de carbono (CO₂). Integram esse grupo o hidrogênio produzido a partir da reforma do etanol e de outros biocombustíveis ou biomassas (resíduos agrícolas ou florestais); o hidrogênio gerado a partir da eletrólise da água com uso de fontes renováveis (eólica, solar, hidráulica) ou de energia nuclear; o hidrogênio resultante do processo de reforma

térmica do gás natural com captura, sequestro e uso de carbono (CCUS); o hidrogênio natural, que pode ser extraído do solo, entre outros.

De acordo com o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂), do governo federal, os projetos de hidrogênio de baixa emissão de carbono já anunciados somam cerca de US\$ 30 bilhões. Analistas e pesquisadores do setor energético consultados por *Pesquisa FAPESP* mostram-se otimistas quanto ao protagonismo do país nesse novo mercado. “O Brasil reúne as condições necessárias para ser um dos líderes globais do setor”, avalia o especialista em energias renováveis Ricardo Ruther, professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e coordenador de uma recém-inaugurada usina experimental de produção de hidrogênio verde (H₂V) – o produzido por meio da eletrólise da água – da instituição.

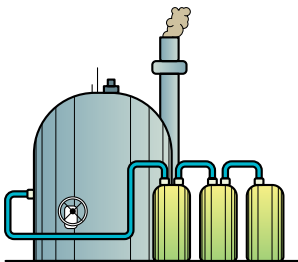
“Temos abundância de fontes renováveis de energia eólica e solar, essenciais para a produção de hidrogênio sustentável; um mercado organizado, competitivo e dinâmico de geração de energia elétrica por fontes renováveis; um parque industrial que pode absorver a produção em larga escala de hidrogênio; e relativa proximidade com o mercado europeu, para onde o combustível será exportado”, afirma.

COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL E LIMPO

A atenção que se dá ao hidrogênio combustível se explica pelo fato de seu poder calorífico ser cerca de três vezes superior ao do gás natural, da gasolina ou do diesel. Embora abundante no Universo, o hidrogênio raramente é achado de forma isolada, mas está presente no etanol (C₂H₆O), no metano (CH₄) e em outros combustíveis fósseis, além da água (H₂O). Para isolar a molécula de hidrogênio e utilizá-la como energia para mo-

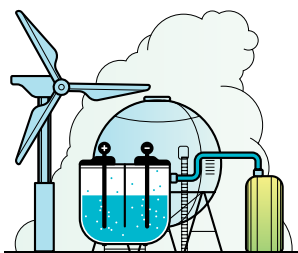
O UNIVERSO DO HIDROGÊNIO

A produção desse combustível pode se dar por diferentes rotas. No passado recente, cores eram usadas para classificar os diversos tipos de hidrogênio gerados. Essa nomenclatura está sendo substituída por uma nova terminologia, a de hidrogênio de baixa emissão de carbono



CONVENCIONAL

O hidrogênio extraído do gás natural emite em seu processo produtivo cerca de 11 quilos de CO₂ por quilo de H₂ (kgCO₂/kgH₂). É a principal rota tecnológica da atualidade



DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO

Produzido a partir de quaisquer fontes ou tecnologias com reduzida emissão de carbono, como o hidrogênio eletrolítico (H₂V), o gerado a partir da reforma do etanol e do biometano, o hidrogênio natural, o produzido a partir de combustíveis fósseis com captura do carbono, entre outros

FONTE IEA

ver veículos automotores ou em procedimentos industriais, esses compostos precisam ser submetidos a processos químicos.

A principal rota para a produção de hidrogênio é a reforma a vapor do gás natural, cujo principal elemento constituinte é o metano. Nesse processo, o metano é submetido a altas temperaturas em um reator e transformado em H₂ e CO₂. O hidrogênio gerado não é classificado como sustentável porque, durante o processo, o CO₂ é lançado na atmosfera contribuindo com o aumento de GEE. Para cada quilo de hidrogênio (kgH₂) produzido, são emitidos cerca de 11 kg de CO₂ (kgCO₂).

As diversas rotas para a produção de hidrogênio são comumente identificadas por uma cor. Por essa classificação, que pode sofrer variações conforme o autor, o hidrogênio produzido a partir do metano com emissão de CO₂ é chamado de cinza, mas, caso o carbono seja capturado, passa a ser designado de azul; o hidrogênio eletrolítico é denominado verde; e que usa energia nuclear na sua produção, roxo ou rosa.

Por entender que a classificação de cores é imprecisa e desprovida de aplicação prática em processos decisórios de contratação de projetos na área, podendo gerar dificuldades regulatórias, a IEA propôs recentemente substituí-la por uma nova nomenclatura baseada na intensidade de emissões da produção de hidrogênio (*ver box ao lado*). O organismo passou a sugerir o uso do termo “hidrogênio de baixa emissão”. No Brasil, o PNH2 segue essa recomendação.

Na Europa, para que o hidrogênio receba o rótulo de baixa emissão é preciso que durante seu processo de geração sejam lançados na atmosfera, no máximo, 3,8 kg de CO₂ por kg de H₂ produzido (kgCO₂/kgH₂). O Brasil ainda não definiu seu limite de emissão, mas projeto de lei em tramitação propõe que esse valor seja de até 4 kgCO₂/kgH₂.

A produção de hidrogênio de baixo carbono no mundo ainda é pequena. O relatório “Global hydrogen review 2023”, da IEA, informa que 95 milhões de toneladas (Mt) de hidrogênio de todos os tipos foram gerados em 2022. Desse total, cerca de 94 Mt foram oriundos da reforma térmica do metano, processo com emissão de GEE, e menos de 1 Mt foi de hidrogênio de baixo carbono, sendo que a maior parte veio da reforma do metano com sequestro e captura de carbono. Mas esse panorama deve mudar rapidamente. As projeções de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono para 2030 remontam a 38 Mt.

A China lidera o incipiente mercado de hidrogênio de baixo carbono, com 30% da produção, seguida por Estados Unidos, Oriente Médio, Índia e Rússia, de acordo com o anuário da IEA. A participação do Brasil é pequena. “Estima-se que em 2022 foram produzidas 509 mil toneladas [t] de hidrogênio no país a partir do gás natural e somente 29 mil t de origem eletrolítica”, diz o engenheiro Gustavo Pires da Ponte, da EPE.

Esse volume deve crescer nos próximos anos em razão de diversas ações e projetos na área. Em junho, o governo paulista lançou uma iniciativa que busca incentivar projetos com foco na descarbonização das cadeias produtivas no estado. Uma das frentes é a Rota Paulista Verde, no âmbito da qual está estruturado o Programa de Hidrogênio de Baixo Carbono, criado com o objetivo de estimular o potencial do estado para diferentes rotas de produção do gás.

“Pretendemos desenvolver a cadeia de valor para toda a indústria de hidrogênio de baixo carbono, o que inclui equipamentos, componentes, serviços e capacitação, sem pré-selecionar uma

Carro da Toyota preparado para rodar com hidrogênio gerado com álcool combustível





Cana-de-açúcar: etanol produzido a partir da planta pode ser convertido em hidrogênio

rota tecnológica ou outra”, declara Marisa Maia de Barros, subsecretária de Energia e Mineração da Secretaria do Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo. “Queremos estimular a produção de hidrogênio de baixo carbono, privilegiando a vocação energética paulista.”

O estado de São Paulo, segundo Barros, tem potencial para produzir hidrogênio a partir de diversas fontes, entre elas o etanol e o biometano, biocombustível gasoso gerado a partir do processamento de resíduos do setor sucroenergético, entre outros. “Biometano e gás natural são exatamente a mesma molécula [CH₄]. A diferença é que o primeiro é de origem renovável e o segundo de origem fóssil. A mesma tecnologia, já dominada, que utiliza gás natural para produzir hidrogênio, pode usar o biometano”, diz a subsecretária. “O desafio é dar escala à produção do biometano.”

O principal projeto de produção de hidrogênio a partir de produtos ou subprodutos do setor sucroenergético, como etanol e vinhaça, é desenvolvido pelo Centro de Pesquisa e Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI), um Centro de Pesquisa em Engenharia (CPE) constituído pela FAPESP e Shell, que recebeu R\$ 465 milhões em investimentos desde sua criação, em 2015, sendo R\$ 45 milhões da Fundação. O grupo trabalha em três frentes, sendo que a investigação mais adiantada é a que prevê a reforma a vapor do etanol.

Nesse método, o combustível é submetido a temperaturas e pressões específicas e reage com a água em um reator químico, dando origem ao hidrogênio (ver infográfico abaixo). Carbono biogênico, de origem não fóssil, oriundo da cana-de-açúcar, é emitido no processo. Uma unidade de demonstração está sendo instalada na Universidade de São Paulo (USP) na capital paulista.

O projeto, no valor de R\$ 50 milhões, financiados pela Shell, tem como parceiros a empresa Hytron, a companhia do setor sucroenergético Raizen, a montadora japonesa Toyota, o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) e a USP, por meio do RCGI. A planta-piloto, prevista para entrar em operação no segundo semestre de 2024, terá 425 metros quadrados e capacidade para gerar 4,5 kg de hidrogênio por hora.

“Será a primeira estação experimental de abastecimento de hidrogênio renovável do mundo a partir de etanol”, diz o engenheiro e físico Julio Meneghini, diretor científico do RCGI e professor da Escola Politécnica (Poli) da USP. O combustível será usado em três ônibus e um automóvel, todos elétricos e dotados de um dispositivo chamado célula a combustível, que gera eletricidade a partir do hidrogênio, sem emitir GEE.

“Se o etanol tiver uma pegada negativa de emissão de CO₂ em seu processo produtivo, ou seja,

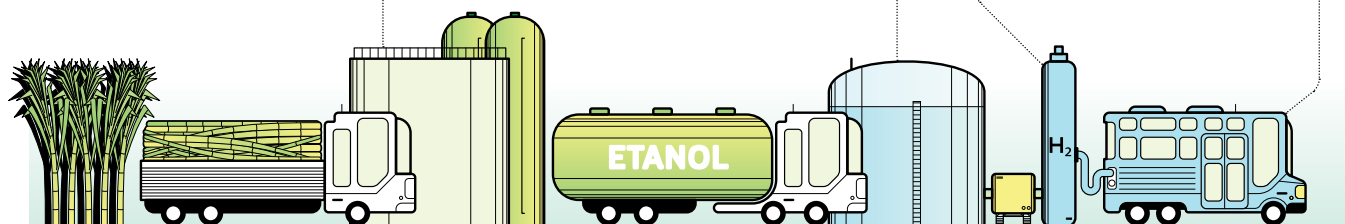
DO CAMPO AO CAMPUS DA USP

Saiba como será feita a transformação de etanol em hidrogênio renovável no projeto-piloto paulista

1. A cana-de-açúcar, matéria-prima para a produção de etanol, **é colhida na lavoura e levada a uma usina**, onde é destilada, dando origem ao álcool combustível

2. Na **usina de reforma a vapor**, o etanol é misturado à água em um reator. Submetidas a pressão de 113 bar e temperatura de 800 °C, as substâncias reagem formando hidrogênio. O processo gera CO₂, mas, como vem da cana, é considerado biogênico (de origem não fóssil)

3. O gás, comprimido e **estocado em tanques**, abastecerá **quatro veículos elétricos**. Em uma segunda fase do projeto, o combustível será usado em aplicações industriais



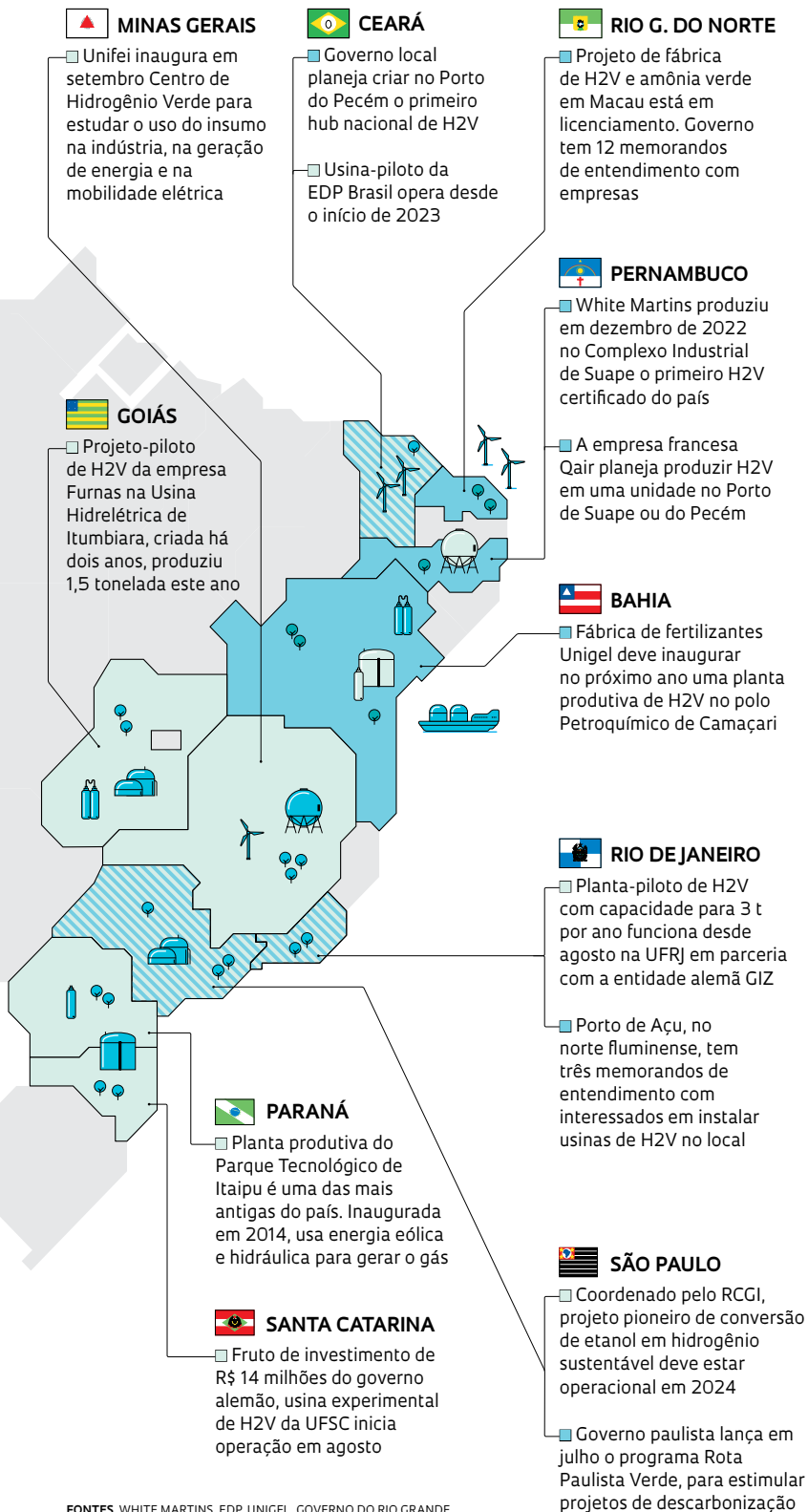
FONTES SHELL E HYTRON



O MAPA DA PRODUÇÃO

Conheça os principais projetos de hidrogênio de baixo carbono no país

Experimental Comercial



FONTES: WHITE MARTINS, EDP, UNIGEL, GOVERNO DO RIO GRANDE DO NORTE, SHELL, USP, UFRJ, PORTO DE AÇU, UFSC, UNIFEI, PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU E ELETROBRÁS

eliminando mais carbono do que o lançado na atmosfera, o hidrogênio gerado passará a ter uma pegada negativa”, afirma Meneghini. O etanol pode ser negativo em carbono se não forem usados fertilizantes nitrogenados no plantio da cana nem combustíveis fósseis nas máquinas agrícolas e caminhões de transporte do insumo. O carbono emitido no processo de fermentação da cana teria que ser capturado e armazenado.

Thiago Lopes, coordenador de projetos do RCGI, destaca uma vantagem do hidrogênio gerado a partir da reforma térmica do etanol: a logística de transporte. Ele explica que o transporte do hidrogênio produzido no processo de eletrólise ainda é complexo e caro, pois exige a compressão do gás em cilindros de alta pressão ou sua liquefação em tanques criogênicos (mantidos em baixíssima temperatura), o que encarece o envio do combustível de seu local de produção para o de consumo. “Esse problema não existe na conversão do etanol em hidrogênio. O etanol já tem uma cadeia de transporte estabelecida. É muito mais fácil transportá-lo na forma líquida do que comprimir ou liquefazer o hidrogênio”, destaca Lopes.

O reformador de etanol do projeto foi desenvolvido pela Hytron. “Projetamos essa nova tecnologia com o apoio da FAPESP e chegamos a um estágio pré-comercial. Com o teste do equipamento na USP, vamos elevar o grau de maturidade da tecnologia, chegando ao nível comercial”, ressalta Daniel Lopes, diretor comercial da Hytron.

Otra frente de investigação com etanol no RCGI, em estágio inicial, é sua transformação em hidrogênio por meio de uma reforma eletroquímica. “Nesse caso, utiliza-se eletricidade para quebrar a molécula de etanol e gerar hidrogênio, em um processo parecido ao da eletrólise da água”, explica o coordenador do projeto, o engenheiro químico Hamilton Varela, diretor do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da USP.

De acordo com o químico Edson Antonio Ticianelli, professor do IQSC e participante do estudo, uma das propostas do grupo foi substituir a reação anódica do eletrolisador, que no sistema convencional é a reação de oxidação da água, pela oxidação do etanol, o que melhora a eficiência energética do processo. Os pesquisadores investigam materiais adequados à produção de catalisadores que favoreçam a quebra da molécula do etanol. Superado esse desafio, o próximo será desenvolver um reformador eletroquímico para o etanol.

A terceira linha de pesquisa usa como matéria-prima a vinhaça. Para cada litro de etanol produzido, são gerados cerca de 12 litros desse ma-



terial, um subproduto 95% composto por água. A vinhaça tem alto potencial de contaminação do lençol freático e emissão de GEE. Para minimizar esses efeitos, hoje ela é reaproveitada como biofertilizante no plantio da cana. No projeto do RCGI, a vinhaça é concentrada em um reator eletroquímico para reduzir a fração de água e gerar hidrogênio sustentável e oxigênio. O grupo já depositou uma patente do processo.

Além das três rotas investigadas pelo RCGI, também há no Brasil estudos prevendo o uso direto de etanol em células a combustível de óxido sólido (Sofc). Nesse caso, a quebra da molécula do etanol para a geração de hidrogênio ocorrerá no veículo – e não em uma estação independente, como no projeto da USP. Pesquisas com esse foco são feitas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen), com apoio da FAPESP (ver Pesquisa FAPESP nº 308).

HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

Além de iniciativas focadas na conversão de biomassa e biocombustíveis em hidrogênio de baixo carbono, avançam no país projetos de geração do chamado hidrogênio verde (H2V), cujo processo produtivo é nulo ou praticamente nulo em emissão de CO₂ (ver infográfico na página 19). São plantas comerciais ou experimentais, boa parte em estágio inicial. Em Pernambuco, a fabricante de gases industriais White Martins iniciou em 2022 a produção no Complexo Industrial de Suape. Foi o primeiro H2V certificado no país e na América do Sul. Usando energia solar, a planta pode pro-

duzir 156 t do gás por ano, que serão destinadas a uma indústria de alimentos da região.

Na Bahia, a fábrica de fertilizantes nitrogenados Unigel pretende começar em 2024 a produzir hidrogênio verde em escala industrial no Polo Petroquímico de Camaçari, com uso de energia eólica. Ao custo de R\$ 120 milhões, a fábrica terá capacidade de 10 mil t anuais do gás. Em dois anos, a produção deve quadruplicar.

Outro projeto em operação no país fica no Complexo Termelétrico do Pecém, no Ceará, onde a companhia energética EDP Brasil produz H2V em uma usina-piloto, um projeto de pesquisa e desenvolvimento com capacidade para produzir 197 t por ano a partir de energia solar. O governo cearense planeja estabelecer no Porto do Pecém o primeiro hub nacional de H2V.

“Trinta e três memorandos de entendimento já foram assinados com empresas nacionais e estrangeiras, sendo que três avançaram para a fase de pré-contrato”, informa Joaquim Rolim, secretário-executivo da Indústria da Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado do Ceará. “Devemos começar a produção comercial em 2026 ou 2027 e projetamos gerar cerca de 1Mt de hidrogênio verde a partir de 2030”, diz.

“O Ceará, assim como todo o Nordeste, tem grande potencial para a geração de energia eólica e solar, principal insumo para a geração de hidrogênio verde. A localização do estado, mais próxima dos portos europeus e norte-americanos, favorece a exportação do combustível renovável”, analisa a engenheira química Diana Azevedo, vice-

Tanques de armazenamento da maior refinaria chinesa de hidrogênio verde, na cidade de Kuqa, no noroeste do país





Bicicletas elétricas híbridas movidas a hidrogênio no campus da UFRJ

-reitora da Universidade Federal do Ceará (UFC) e diretora do Centro de Tecnologia da universidade.

Também professora do Departamento de Engenharia Química da UFC, Azevedo coordena uma pesquisa relacionada à cadeia produtiva do hidrogênio verde, mais especificamente à estocagem e ao transporte do combustível. “Transportar o hidrogênio do ponto onde é gerado ao de consumo é desafiador, pois ele é um gás extremamente leve que requer muita energia para ser armazenado, na forma gasosa ou liquefeita”, esclarece Azevedo. Uma forma de superar essa dificuldade é transformar o hidrogênio em compostos líquidos, como amônia, ou incorporá-lo em sólidos, como no hidreto de magnésio, e depois recuperá-lo. “Nossas pesquisas preveem a criação de compósitos com magnésio, ferro e suportes carbonosos para o armazenamento químico de hidrogênio”, diz a pesquisadora.

Pesquisas para a produção de hidrogênio de baixo carbono também são realizadas na UFSC e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), entre outras universidades e centros de pesquisa brasileiros, que inauguraram recentemente plantas-piloto para a geração de H₂V. As duas iniciativas têm apoio da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ). “Nosso projeto tem capacidade para produzir 3 t de hidrogênio por ano a partir de eletrolisadores, que usam energia fotovoltaica”, informa Andrea Santos, coordenadora do projeto e professora do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) da UFRJ.

“Vamos testar o combustível em bicicletas elétricas híbridas movidas a hidrogênio e células a combustível, em processos industriais e em células a combustível de óxido sólido. Também investigaremos novos catalisadores para a produção de biocombustíveis e combustíveis sustentáveis de aviação [SAF], que podem ser fabricados a partir de H₂V”, afirma Santos.

Em setembro, a pesquisadora publicou com colegas da UFRJ um artigo de revisão avaliando a produção de hidrogênio no país a partir de uma perspectiva técnico-econômica. Segundo o estudo, publicado na revista *Energies*, “a eletrólise é o processo mais investigado na literatura, pois contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e apresenta outras vantagens, como maturidade, eficiência energética, flexibilidade e potencial de armazenamento de energia”.

PEDRAS NO CAMINHO

Apesar do potencial brasileiro para a produção de hidrogênio de baixo carbono, muitos desafios ainda precisam ser superados para o país elevar a escala produtiva, a começar pelo seu preço final. De acordo com a IEA, em 2022 a produção de

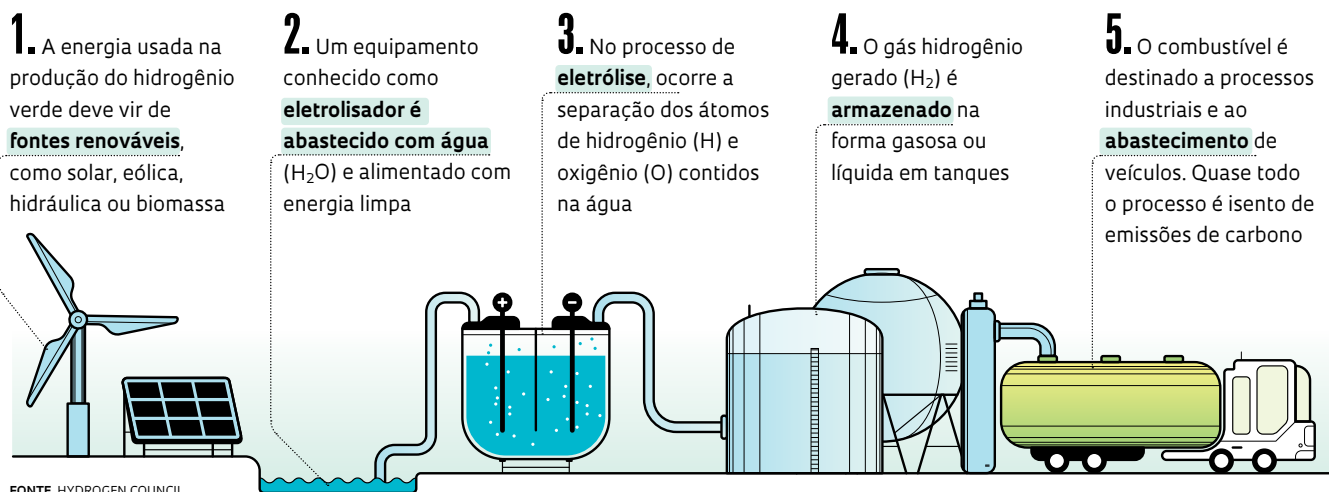


Usina-piloto da EDP no Complexo Termelétrico do Pecém, no Ceará



COMO O HIDROGÊNIO VERDE É PRODUZIDO

Eletrólise da água deverá ser a principal rota tecnológica utilizada nos próximos anos



1 kg de hidrogênio de fontes fósseis custava entre US\$ 1,5 e US\$ 6,1, enquanto o de baixa emissão de carbono também a partir de combustíveis fósseis se situava entre US\$ 1,8 e US\$ 7,6. O valor do chamado hidrogênio verde ia de US\$ 3,8 a US\$ 12.

A redução do custo do H₂V depende de algumas variáveis, entre elas a disponibilidade e o preço da energia elétrica renovável usada para converter a água no gás. “O valor da energia elétrica é um elemento crucial na composição do custo do H₂V”, alerta Caroline Chantre, economista do Grupo de Estudos do Setor Elétrico (Gesel) da UFRJ. A pesquisadora é coautora de um artigo publicado em 2022 na revista *Sustainable Production and Consumption* que analisou a percepção de agentes econômicos sobre o desenvolvimento do mercado de hidrogênio no país. “Nosso estudo mostrou que, em termos gerais, o médio prazo, entre seis e 10 anos, foi apontado por 43% dos agentes como uma estimativa adequada para a maturidade do H₂V no Brasil”, informa.

Outra dificuldade para elevar a escala produtiva do H₂V, segundo estudo publicado na *Nature Energy*, em 2022, é a capacidade de eletrólise, que se relaciona à fabricação de eletrolisadores e à construção de usinas que adotem essa rota. “Mesmo que a capacidade de eletrólise cresça tão rapidamente como a energia eólica e solar, o fornecimento de H₂V permanecerá escasso no curto prazo e incerto no longo”, apontam os autores.

Tornar os eletrolisadores mais eficientes é parte da solução do problema. Um campo de pesquisa é o desenvolvimento de catalisadores, materiais que elevam a velocidade das reações químicas na eletrólise, de baixo custo, fácil produção e boa

eficiência energética. Esse é o foco do trabalho da química Lucia Helena Mascaro, professora da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e pesquisadora do Centro de Inovação em Novas Energias (Cine), um CPE apoiado pela FAPESP.

O grupo emprega materiais compostos formados por níquel, molibdênio e cobre, níquel e fósforo, níquel, cobalto e fósforo e molibdênio e enxofre. “Essas ligas têm alta estabilidade e baixo potencial para a reação de redução da água, implicando boa eficiência energética”, diz Mascaro. Diante dos resultados das pesquisas, publicadas no *Journal of the Electrochemical Society* e no *ACS Applied Materials & Interfaces*, entre outros periódicos científicos, a equipe partiu para a montagem e o teste de protótipos de eletrolisadores com os novos catalisadores em escala maior e mais próximos do sistema real.

Especialistas também destacam a necessidade de alinhar as perspectivas de produtor e consumidor, criando demanda pelo hidrogênio. “Esse problema começa a ser resolvido quando surge uma procura em grande escala, como a que se desenha na Europa, estimulando investimentos no Brasil”, diz Ruther, da UFSC.

A elaboração de um marco regulatório e o estabelecimento de políticas públicas de incentivo também são fundamentais para impulsionar os diversos projetos ainda em estágio inicial de hidrogênio de baixo carbono no país. “A regulação é elemento-chave para garantir estabilidade e segurança aos investimentos”, afirma Chantre. “Apesar de o Brasil ter vantagens competitivas expressivas, ainda precisamos avançar em termos de políticas públicas alinhadas a uma estratégia de descarbonização de longo prazo.” ■

Os projetos e os artigos científicos consultados para esta reportagem estão listados na versão on-line.

