



# FASCÍCULO HIDROGÊNIO VERDE

Por Jurandir Picanço Jr., Fernando L.M. Antunes e Edilson Mineiro Sá Jr.



## Capítulo I

# O PROMISSOR MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE

32

### 1 - POR QUE O HIDROGÊNIO VERDE

Conforme o Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima (IPCC), desde o período pré-industrial, estima-se que as atividades humanas tenham causado aproximadamente 1 °C de aquecimento global e que, provavelmente, “o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual”. O aquecimento climático de 1,5 °C, ou mais, levará ao consequente aumento na frequência e intensidade dos extremos climáticos, trazendo assim maiores riscos no futuro. Alguns sistemas vulneráveis, como ecossistemas e sistemas agrícolas, poderão sofrer sérias consequências. Para minimizar os potenciais impactos negativos e riscos das mudanças climáticas, países de todo o mundo, em 2015, firmaram o Acordo de Paris assumindo compromissos de metas de neutralidade de carbono (net-zero), que limitassem o aquecimento climático a um valor inferior a 2 °C (HUANG e ZHAI, 2021).

Na Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas de 2021 (COP26), foi sugerido que havia uma chance inferior a 50% de manter o aquecimento abaixo de 2 °C (MEINSHAUSEN et al., 2022). Assim, firmou-se o Pacto Climático de Glasgow, cujas premissas enfatizaram a importância de limitar o aquecimento global em 1,5 °C e alcançar a neutralidade de carbono em 2050. Para o planeta aquecer menos de 1,5 °C, as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE),

devem ser reduzidas em 45% até 2030, em comparação com os índices de 2010, e chegar a zero (neutralidade de carbono) até 2050.

Mais de 70% das emissões mundiais de GEE resultam do setor de energia. Assim, um vetor energético é necessário para conectar a expansão econômica e o declínio das emissões de carbono. Relatórios de organizações internacionais respeitáveis indicam que o hidrogênio pode contribuir para reduzir a produção GEE nas próximas décadas e ser esse o vetor energético (LI et al., 2023).

O hidrogênio pode ser produzido por todas as fontes de energia, de origem fóssil a renovável. A certificadora CertifHy, classifica o Hidrogênio Verde quando a energia utilizada é proveniente de fontes renováveis e Hidrogênio de Baixo Carbono quando produzido de qualquer outra forma. Ainda não está consolidada uma nomenclatura para as diversas formas de produção de hidrogênio para o processo de descarbonização: hidrogênio limpo, hidrogênio sustentável, hidrogênio renovável e hidrogênio de baixa emissão são designações encontradas nos diversos estudos de mercado do hidrogênio. Neste texto será adotada a nomenclatura da CertifHy para Hidrogênio Verde (H2V) e para Hidrogênio de Baixo Carbono e, quando for referido ao conjunto, será utilizada a nomenclatura de Hidrogênio Sustentável. Nas diversas tecnologias para a produção do H2V, predomina o hidrogênio obtido por eletrólise e na produção de hidrogênio de baixo carbono, a prevalência é do hidrogênio azul, que é definido como aquele produzido

a partir de combustíveis fósseis com CCUS (Carbon capture, utilisation and storage – Captura do carbono, utilização e armazenagem).

Como será visto mais adiante, a alternativa do H2V será dominante no horizonte de neutralidade do carbono.

## 2 - VISÕES DO MERCADO DE HIDROGÊNIO

Há um conjunto de ações voltadas à redução das emissões de GEE na produção de energia que compõem a transição energética com destaque para: as energias renováveis, a eficiência energética, a eletrificação e o hidrogênio sustentável.

Os estudos desenvolvidos por instituições do setor energético, consultorias internacionais e estudos acadêmicos apontam para um crescimento exponencial do mercado do hidrogênio sustentável. Neste fascículo serão analisadas as diversas visões desse novo e promissor mercado que poderá promover mudanças geoeconômicas importantes. Nos horizontes 2030 e 2050, todas as projeções de mercado apontam para uma redução da participação dos combustíveis fósseis, um crescimento das energias renováveis e um crescimento acelerado do uso do hidrogênio.

Diante de um mercado ainda incipiente, em processo de desenvolvimento tecnológico desde a produção, armazenamento, transporte até o uso final do hidrogênio sustentável, é certo que, dependendo das premissas assumidas, grandes distorções podem ocorrer nas projeções, mas, invariavelmente, concluem pela formação de um bilionário mercado futuro. Assim, alguns estudos mais recentes que prospectam o mercado de hidrogênio sustentável a longo prazo serão analisados.

## 3 - VISÃO DA AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – IEA

Em setembro de 2022, a Agência Internacional de Energia (IEA – International Energy Agency) publicou a Global Hydrogen Review 2022 (IEA, 2022a). Posteriormente, em outubro de 2022, publicou o World Energy Outlook 2022 (IEA, 2022b). Em ambas as publicações, o objetivo da neutralidade de carbono em 2050 e a crise energética decorrente da invasão russa na Ucrânia foram abordados. Fontes tradicionais de oferta diminuindo em quase um terço, com o carvão caindo quase pela metade e o gás natural caindo em mais de um quarto até 2030. Contrasta com a análise de 2021, em que o gás natural manteria uma parcela maior do mix de energia global por um pouco mais de tempo, essa mudança reflete maiores preocupações de segurança energética em torno do gás natural, precipitadas pela invasão russa na Ucrânia. Muitos governos, particularmente na Europa, estão olhando para o hidrogênio sustentável como uma forma de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, oferecendo oportunidades para contribuir, simultaneamente, para as metas de descarbonização e para aumentar a segurança energética (IEA,

2022a). O petróleo também diminuirá cerca de um quinto até 2030 como resultado de ganhos de eficiência energética, mudança de comportamento e aumento da eletrificação nos transportes.

A implantação acelerada de certas tecnologias-chave de hidrogênio ficou evidente em 2021, pois foi um ano recorde na implantação da eletrólise, com mais de 200 MW de capacidade instalada adicional, três vezes mais que o ano recorde anterior (2020) e trazendo uma capacidade operacional total acima de 500 MW. No portfólio de projetos em planejamento apresentado até outubro 2022, se todos forem realizados, a capacidade de eletrólise poderá ser de 134–240 GW até 2030. Na edição de 2021 da Global Hydrogen Review, a perspectiva era de 54–91 GW até 2030, o que demonstra o crescimento acelerado do mercado de hidrogênio. Entretanto, apenas uma pequena fração dos projetos (cerca de 9 GW) chegou à fase final de decisão de investimento. As perspectivas favoráveis para o crescimento da demanda de eletrolisadores estimularam um aumento na sua capacidade de fabricação, que atingiu cerca de 8 GW/ano em todo o mundo. As expansões anunciadas podem elevar essa capacidade de fabricação para quase 50 GW até 2025 (IEA, 2022a).

A demanda global de hidrogênio foi de quase 94 milhões de toneladas (Mt) em 2021, um aumento de 5% em relação ao ano anterior. A maior parte desse crescimento da demanda veio de usos tradicionais de hidrogênio, principalmente no refino e na indústria. Algumas novas aplicações estão tendo implantação acelerada, como veículos elétricos com célula a combustível (FCEVs – Fuel Cell Electric Vehicles). No final de 2021, o estoque global de FCEVs era superior a 51.000, contra cerca de 33.000 em 2020, representando a maior implantação anual de FCEVs desde que se tornaram disponíveis comercialmente em 2014. A maioria dos FCEVs são carros de passageiros, mas vários projetos de demonstração para caminhões com células a combustível e um forte impulso na China, colocaram quase 800 caminhões pesados com células a combustível de hidrogênio em operação em 2021. No início de 2022, pela primeira vez, o transporte internacional de hidrogênio liquefeito foi demonstrado com uma remessa da Austrália para o Japão. Além disso, vários grandes projetos foram anunciados para exportar hidrogênio sustentável, a maioria usando amônia como transportador, seja para uso direto, como matéria prima para produtos químicos ou como combustível para geração de energia e transporte marítimo, ou para ser reconvertido em hidrogênio (IEA, 2022a).

Considerando as políticas e medidas que os governos de todo o mundo já implementaram, a IEA (2022a) estima que a demanda por hidrogênio, incluindo o hidrogênio cinza, poderá chegar a 115 Mt até 2030.

A produção de hidrogênio sustentável esperada dos projetos planejados (Figura 1) é maior do que 24 Mt em 2030, sendo 14 Mt por eletrólise (H2V) e mais 10 Mt de origem fóssil com CCUS (hidrogênio azul). Contrasta com a produção projetada de 34 Mt no



cenário de promessas anunciadas, em grande parte para a produção de hidrogênio a partir de eletrólise com uma diferença de quase 8 Mt, enquanto os projetos canalizados que usam combustíveis fósseis com CCUS está próximo das perspectivas do cenário de promessas anunciadas [IEA, 2022a]. Ainda segundo a IEA [2022b], o uso de hidrogênio sustentável com o cenário de promessas anunciadas poderia chegar a 225 Mt em 2050. Para um cenário de neutralidade de carbono, o uso de hidrogênio sustentável deveria chegar a 90 Mt (~58 Mt por eletrólise e mais ~31 Mt de origem fóssil com CCUS) em 2030 e 452 Mt em 2050 (~329 Mt por eletrólise, mais ~122 Mt de origem fóssil com CCUS e mais ~2 Mt oriundos da bioenergia e outros).

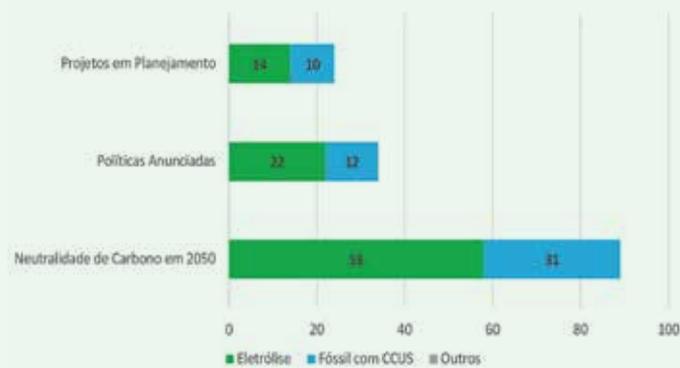


Figura 1 - Cenários previstos pela IEA para o hidrogênio sustentável em 2030 (em Mt de H<sub>2</sub>). Fonte: Dados obtidos de IEA (2022a).

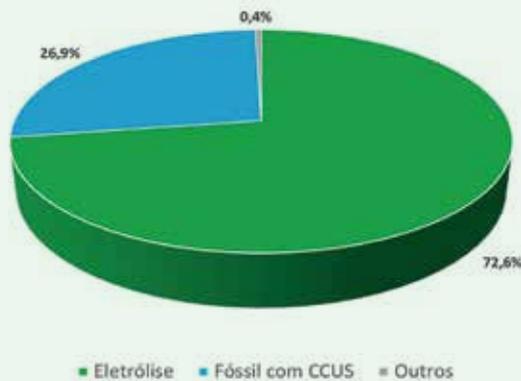


Figura 2 - Demanda prevista pela IEA para o hidrogênio sustentável em 2050 no cenário de neutralidade de carbono (total de 452 Mt). Fonte: Dados obtidos de IEA (2022b).

#### 4 - VISÃO DA AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS – IRENA

Segundo a IRENA (International Renewable Energy Agency – Agência Internacional de Energias Renováveis) em World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5 oC Pathway de outubro de 2022 [IRENA,2022], o hidrogênio sustentável e seus derivados contribuirão com 10% das reduções totais de emissões até 2050. O hidrogênio pode ser o mais desafiador de todos os caminhos tecnológicos considerados, pois os mercados ainda são incipientes. A capacidade

dos eletrolisadores mais que dobrou em 2021, atingindo 458 MW e projetava-se um crescimento de quatro a cinco vezes em 2022. O mercado de eletrolisadores necessário para produzir H2V ainda é um nicho, mas desempenhará um papel significativo na descarbonização do setor de energia nas próximas décadas [IRENA, 2022].

À medida que as economias globais pretendem se tornar neutras em carbono, o hidrogênio sustentável competitivo e os combustíveis sintéticos derivados do hidrogênio sustentável (como amônia, metanol e querosene) oferecerão uma solução de mitigação de emissões para processos industriais e de transporte difíceis de descarbonizar por meio da eletrificação direta. No cenário de 1,5°C da IRENA, a produção de H2V e azul deve crescer de níveis insignificantes para 154 Mt até 2030 e mais de 614 Mt até 2050 [Figura 3]. O H2V custa atualmente entre duas e três vezes mais do que o hidrogênio azul. A queda nos custos de energia renovável e a melhoria das tecnologias de eletrolisadores podem tornar o custo do H2V competitivo até 2030. A capacidade instalada cumulativa de eletrolisadores precisa crescer para cerca de 350 GW até 2030. As reduções de emissão de GEE [Figura 4] podem ser alcançadas por meio de seis caminhos tecnológicos: 1) aumentos significativos na geração e usos diretos de eletricidade baseada em fontes renováveis; 2) melhorias substanciais na eficiência energética; 3) a eletrificação de setores de uso final (por exemplo, veículos elétricos e bombas de calor); 4) hidrogênio sustentável e seus derivados; 5) bioenergia aliada à captura e armazenamento de carbono; e 6) uso de combustível fóssil com captura e armazenamento de carbono.

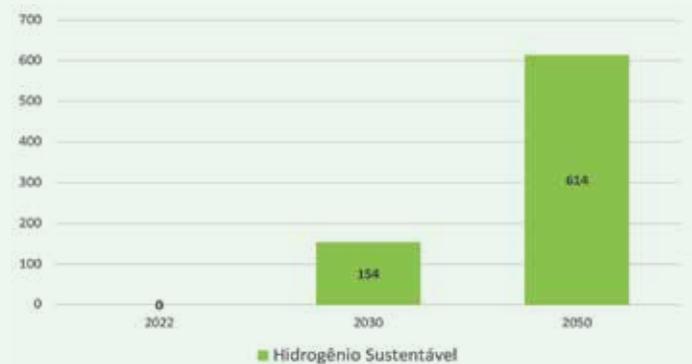


Figura 3 - IRENA - Demanda de hidrogênio sustentável (em Mt de H<sub>2</sub>). Fonte: Modificado de IRENA (2022).

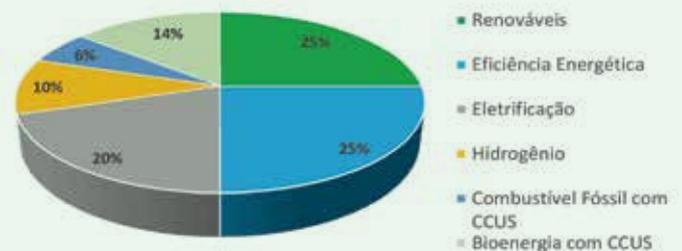


Figura 4 - IRENA - Reduzir as emissões até 2050 por meio de seis caminhos tecnológicos (36,9 Gt CO<sub>2</sub>). Fonte: Modificado de IRENA (2022).

# POTÊNCIA E PERFORMANCE

SOB DEMANDA PARA PROJETOS ESPECIAIS.

*Transformador de Força Itaipu*

Potência de até 40.000 kVA

CLASSE DE TENSÃO DE 15, 24.2, 36.2, 72.5 E AGORA TAMBÉM DE 145 KV

#### CUSTOMIZADOS COM

- Óleo Mineral ou Vegetal
- Caixas Flangeadas
- Ventilação Forçada
- Relés de Proteção
- Termômetros com ou sem contato
- Comutador sob carga e muito mais



ENTRE EM CONTATO E SOLICITE UM ORÇAMENTO

+55 16 3263 9400



**ITAIPU**  
TRANSFORMADORES

[www.itaiputransformadores.com.br](http://www.itaiputransformadores.com.br)

Av. Sérgio Abdul Nour . 2106  
Distrito Ind. II . 14900 000  
Itápolis, São Paulo, Brasil.



### 5 - VISÃO DA MCKINSEY & COMPANY

A McKinsey & Company, em Global Energy Perspective 2022 de abril de 2022 (McKinsey, 2022) (com análise realizada antes da invasão da Ucrânia em fevereiro de 2022), prevê que o fornecimento de hidrogênio mude de quase 100% de hidrogênio cinza para 60% de produção limpa (hidrogênio sustentável) até 2035, na medida que os custos diminuam e os formuladores de políticas apoiem a adoção da tecnologia de hidrogênio. No cenário de Aceleração Adicional, o suprimento de hidrogênio sustentável totalizaria cerca de 110 Mt (~60% do suprimento total) até 2035 e cerca de 510 Mt (~95%) até 2050. A União Europeia e alguns países planejaram eliminar totalmente o hidrogênio cinza até 2050. Anúncios de novos projetos de produção de hidrogênio sustentável triplicaram em 2021. Cerca de 22 Mt de capacidade de hidrogênio sustentável foram anunciados até abril de 2022, aproximadamente 15–20% do que é necessário até 2035. A produção de hidrogênio será um dos principais impulsores do crescimento da demanda de energia. Até 2050, o hidrogênio deverá adicionar aproximadamente 18.000 TWh de consumo de eletricidade (~ 36% do crescimento da demanda elétrica) e cerca de 300 bcm (billion cubic meters – bilhões de metros cúbicos) à demanda de gás natural (McKinsey, 2022).

36

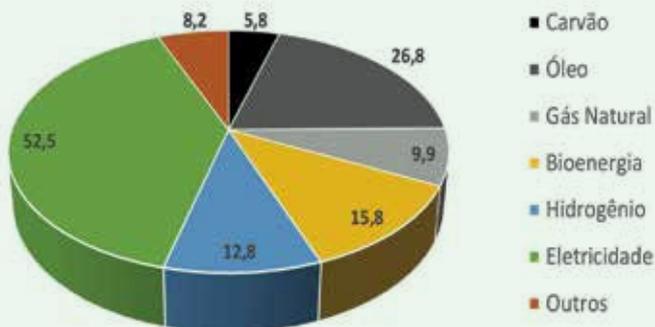


Figura 5 - Mckinsey & Company - Consumo Final de Energia por Combustível em 2050 (em Milhões de GWh - total de 132 MGWh) Fonte: Dados obtidos de Mckinsey & Company (2022).

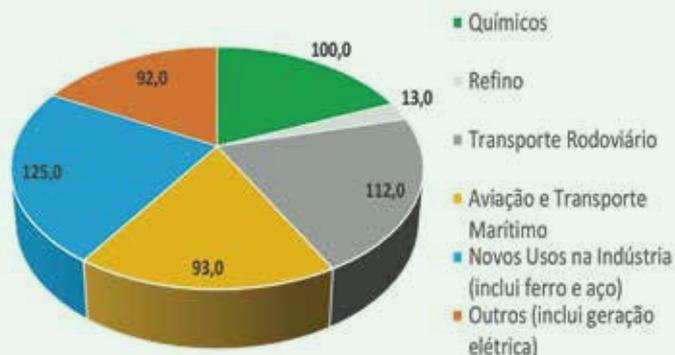


Figura 6 - Mckinsey & Company - Demanda Global de Hidrogênio em 2050 (em Mt - total 536 Mt) Fonte: Dados obtidos de Mckinsey & Company (2022).

### 6 - VISÃO DA BLOOMBERGNEF

Segundo a BloombergNEF em New Energy Outlook 2022 de dezembro de 2022, o uso global de hidrogênio salta mais de cinco vezes até 2050 sob o cenário de carbono neutro, crescendo de pouco mais de 90 Mt de hidrogênio cinza produzidos em 2022, para 501 Mt (Figura 7) de hidrogênio sustentável (Figura 6). O crescimento será impulsionado pelo uso na indústria de energia (163 Mt), onde ajudará a descarbonizar o refino de combustível, extração de combustível e operação de equipamentos, e para aplicações na fabricação de aço (144 Mt). No transporte, cerca de 88 Mt de hidrogênio serão usadas em sua forma pura ou como combustíveis derivados, como metanol ou amônia, para impulsionar aviões e embarcações. Na energia elétrica, o consumo das usinas de ciclo combinado atingirá 43 Mt. Esse uso será principalmente confinado ao fornecimento de geração de backup, pois a queima de hidrogênio para fornecimento de energia elétrica não é competitiva em relação às energias renováveis e usinas equipadas com CCUS na maioria das regiões. Em edificações, o consumo chegará a 30 Mt em 2050.

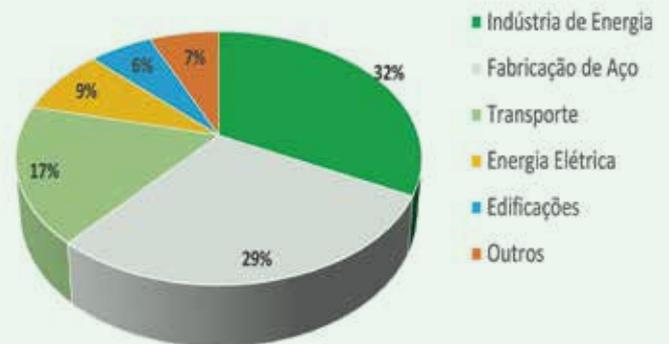
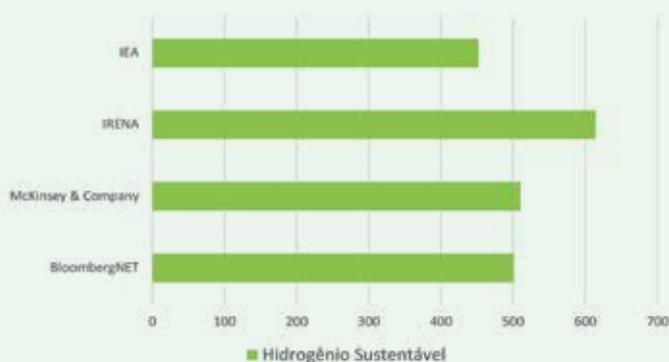


Figura 7 - BlombergNEF - Uso global do hidrogênio sustentável em 2050 (Total 501 Mt). Fonte: Dados obtidos de BloombergNEF (2022).

### 8 - ANÁLISE

Os diversos vetores econômicos mundiais, tais como, commodities agrícolas, minerais, combustíveis fósseis e manufaturados desenvolveram-se espontaneamente em um ambiente em que predominam as forças de mercado. Com o hidrogênio sustentável há um direcionamento diante de seu papel no processo de descarbonização. Todos os estudos avaliados apresentam valores de demanda de hidrogênio sustentável próximos e superiores a 450 Mt em 2050 (Figura 8), para um cenário de carbono neutro. Equivale a um mercado de aproximadamente USD 600 milhões anuais. Com esses valores, não há paralelo no histórico da economia mundial. Segundo Lagioia, Spinelli e Amicarelli (2023), atualmente o H2V obtido pela eletrólise é menos competitivo do que o hidrogênio azul, mesmo com a mesma maturidade dessas tecnologias. Entretanto, a queda nos custos de energia renovável e a melhoria das tecnologias de eletrolisadores podem tornar o custo do H2V competitivo até



**Figura 8 - Demanda de hidrogênio sustentável em 2050 para neutralidade de carbono (em Mt de H<sub>2</sub>). Fonte: Autores.**

2030 (IRENA, 2022), o que deverá acelerar a implantação de novas plantas de eletrólise.

Segundo a IEA (2022a), a demanda de H<sub>2</sub>V poderá chegar a 329 Mt em 2050. Considerando que 1 MW de eletrolisador produz aproximadamente 18 kg de hidrogênio por hora e considerando um fator de utilização de 80% do eletrolisador, para cada 1 Mt de H<sub>2</sub>V produzidos por ano, seria necessária uma potência de aproximadamente 7,9 GW em eletrolisadores. Assim, uma potência de 2.599 GW seria necessária para uma demanda de 329 Mt de H<sub>2</sub>V em 2050, o que resultaria em uma energia anual de aproximadamente 18.214 TWh, valor de energia próximo aos 18.000 TWh previstos pela McKinsey & Company. Os valores demonstram o forte crescimento das energias renováveis, as quais serão necessárias para produção do H<sub>2</sub>V.

## 9 - CONCLUSÃO

Há um forte desenvolvimento de pesquisas em todos os segmentos da cadeia para produção e usos do H<sub>2</sub>V com destaque para fontes renováveis de energia, eletrolisadores, armazenamento e seu transporte, geração de energia elétrica, uso nos meios de transporte e para usos industriais. A queda nos custos de energia renovável e avanços das tecnologias de eletrolisadores pode tornar o H<sub>2</sub>V competitivo com o hidrogênio azul até 2030, tornando-o a melhor alternativa tecnológica para possibilitar a transferência de energia entre regiões.

Com o gigantesco potencial de energias renováveis, notadamente solar, eólica onshore e offshore, o Brasil desponta como importante protagonista desse mercado de H<sub>2</sub>V que se forma. Esse protagonismo do Brasil, por produzir o H<sub>2</sub>V ao menor custo foi previsto em estudos diversos de conceituadas instituições.

A oportunidade é indiscutível, mas sua concretização dependerá de regulamentação, certificação, infraestrutura e formação de mão de obra em todos os níveis, providências necessárias para viabilizar a exploração eficiente do que a natureza nos proporcionou.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Meng-Tian Huang, Pan-Mao Zhai, Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society, *Advances in Climate Change Research, Volume 12, Issue 2, 2021, Pages 281–286, ISSN 1674-9278, <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.004>.*
- Meinshausen, M., Lewis, J., McGlade, C. et al. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature* 604, 304–309 [2022]. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04553-z>.
- Xiaona Li, Chaitany Jayprakash Raorane, Changlei Xia, Yingji Wu, Thi Kieu Ngan Tran, Tayebeh Khademi, Latest approaches on green hydrogen as a potential source of renewable energy towards sustainable energy: Spotlighting of recent innovations, challenges, and future insights, *Fuel, Volume 334, Part 1, 2023, 126684, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126684>.*
- IEA – International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2022. França, 2022.*
- IEA – International Energy Agency. *World Energy Outlook 2022. França, 2022.*
- IRENA. *W World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5 oC Pathway. Abu Dhabi, 2022.*
- McKinsey & Company. *Global Energy Perspective 2022. 2022.*
- BloombergNEF. *New Energy Outlook 2022. 2022.*
- CERTIFHY. <https://www.certifyhy.eu/go-labels/>. Acessado em: 16/01/2023.
- Lagioia, G.; Spinelli, M. P.; Amicarelli, V. *Blue and Green Hydrogen Energy to Meet European Union Decarbonisation Objectives. An Overview of Perspectives and the Current State of Affairs. International Journal of Hydrogen Energy, n. 48, pp: 1304–1322, 2023.*

\*Jurandir Picanço Júnior é engenheiro mecânico eletricista, consultor de Energia da Federação das Indústrias do Estado do Ceará – FIEC, membro da Academia Cearense de Engenharia. Sempre esteve ligado às energias renováveis, sendo um dos responsáveis pelas primeiras iniciativas de desenvolvimento das energias eólica e solar, e agora, do hidrogênio verde, no Ceará.

Fernando L.M. Antunes é engenheiro elétrico pela Universidade Federal do Ceará, mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP) e PhD pela Loughborough University of Technology da Inglaterra. Atualmente, é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Edilson Mineiro Sá Jr. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, tem mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará e doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina. É professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Campus Sobral e professor regular do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Campus Sobral.