

# **Hidrogênio Verde: Conceitos, Usos e Legislação no Brasil**

Por Fernanda Santana\*, SergipeTec

Amanda Gonçalves \*, SergipeTec

A descarbonização do planeta é um dos objetivos estipulados por países de todo o mundo até 2050.

As últimas estimativas da Agência Internacional de Energia (AIE), publicadas no final de 2019, vaticinam um aumento da demanda global de energia entre 25 e 30% até 2040 o que, em uma economia dependente do carvão e do petróleo, significaria mais CO<sub>2</sub> e o agravamento das mudanças climáticas. Porém, a descarbonização do planeta nos propõe um mundo diferente até 2050: mais acessível, eficiente e sustentável e movido por energias limpas como o hidrogênio verde [1]. Nesse contexto, o hidrogênio aponta como uma prioridade na estratégia de energia e climática de diversos países, sobretudo, por viabilizar uma alternativa para setores de difíceis abatimento de emissões de carbono (*hard-to-abate sectors*) [2].

A seguir, conheça um pouco mais sobre esse elemento químico que promete ser o combustível do futuro. Saiba como ele é produzido, como o Brasil está inserido nesse contexto, as normas e legislações pertinentes, as possibilidades de usos nas próximas décadas e quais são as perspectivas de o hidrogênio verde se tornar competitivo.

## **1. Conceitos e Produção do Hidrogênio**

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, mas não existem fontes elementares naturais relevantes na Terra, onde ele pode ser encontrado na sua forma isolada. Na prática, ele precisa ser gerado a partir de outras fontes energéticas e, por isso, é considerado

tecnicamente um “vetor energético” e não uma fonte propriamente dita de energia [3].

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA) e divulgado no Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) em 2021, cerca de 70% da produção de hidrogênio mundial tem como base a reforma a vapor do metano usando gás natural como insumo. As tecnologias de captura, sequestro e uso de carbono (*carbon capture, utilization and storage - CCUS*) podem fazer com que o hidrogênio produzido a partir de gás natural (cinza) se transforme em hidrogênio de baixo carbono (azul), o que reduziria 90% de sua pegada de carbono. Outro ponto importante é que há expectativa de que o hidrogênio produzido através do processo de eletrólise da água usando eletricidade gerada por fontes renováveis (verde), como a hidroeletricidade, a eólica e a solar, atinja um preço competitivo até o ano de 2030. Alternativas de hidrogênio renovável serão ampliadas por meio da reforma a vapor do etanol e de outros biocombustíveis. Além dessas alternativas, outras também permitirão emissões negativas ao associarem CCUS [2]. A energia nuclear também é outra opção de hidrogênio zero carbono, tanto pela rota termoquímica, quanto pela eletrólise da água. Diversas outras rotas para a produção de hidrogênio podem ser citadas como biodegradação, pirólise, gaseificação e micro-ondas (no caso de conversão de resíduos plásticos). O desenvolvimento da economia de hidrogênio de baixo ou zero carbono pode, também, utilizar-se de tecnologias híbridas tendo como base uma variedade de matérias-primas. A Figura 1 representa esquematicamente algumas rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio.

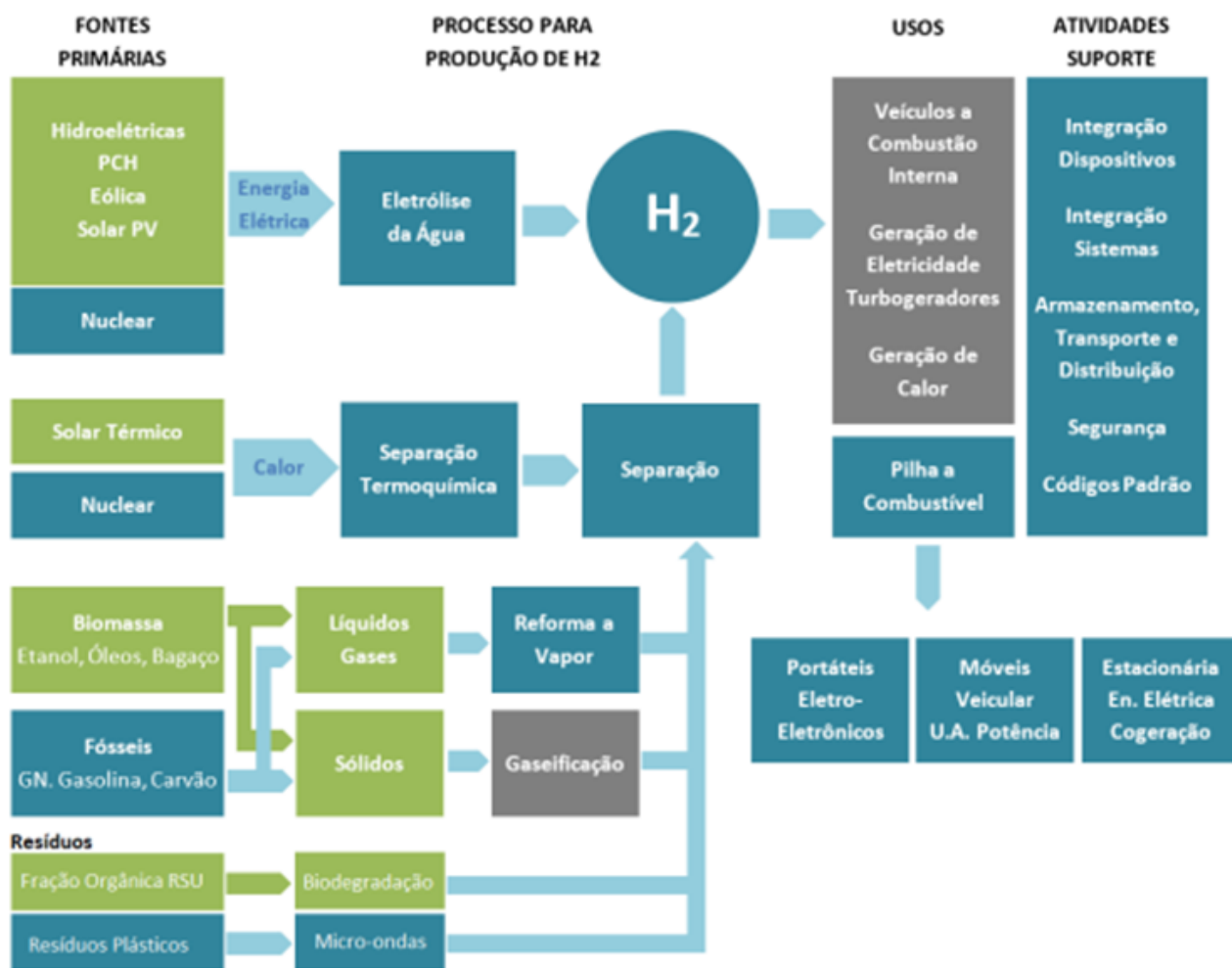


Figura 1: Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção do hidrogênio  
 Fonte: PNH2 2021 a partir de [4]

Uma vez que o hidrogênio tem despontado como um vetor energético de grande importância, há uma busca para diferenciá-lo de acordo com a origem de sua produção, assim como ao acoplamento ou não de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS – *Carbon Capture Utilization and Storage*). Essa diferenciação de acordo com o teor de carbono envolvido na produção de hidrogênio busca integrar o diferencial por qualidade ambiental, possibilitando a existência de preço “prêmio” a depender da origem da produção sem, contudo, alterar a natureza intrínseca de homogeneidade química da molécula de H<sub>2</sub>, a qual é indistinta da fonte que a produziu.

Um exemplo similar é o que acontece com a eletricidade, cuja utilização independe da fonte de geração, mas cuja diferenciação (econômica) pode ocorrer quando é considerada a origem de sua produção como atributo para fins de políticas públicas (por exemplo, redução das emissões de GEE - Gases de Efeito Estufa) e, também, precificação no mercado de energia elétrica [5].

A diferenciação do hidrogênio por teor de carbono associado à sua produção tem implicações diferentes em termos de contribuições à mitigação das emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) e prevenção das mudanças climáticas globais. Nesse contexto, ainda que sob o ponto de vista técnico possa ser mais apropriado diferenciar o hidrogênio através de um índice que reflita o teor de carbono associado à sua produção, correntemente tem-se buscado diferenciar essa origem de produção através do uso de jargões com referência à distinção de cores. Segundo a IEA – *International Energy Agency* as seguintes definições podem ser citadas [6]:

- “Hidrogênio marrom ou preto”: produzido de carvão mineral (de linhito é o “marrom” e o de hulha ou antracito corresponde à cor “preta”) sem CCUS;
- “Hidrogênio cinza”: produzido do gás natural sem CCUS;
- “Hidrogênio azul”: produzido a partir de gás natural com CCUS (eventualmente, se utiliza essa denominação também para o hidrogênio gerado a partir de outros combustíveis fósseis com CCUS);
- “Hidrogênio verde” tem sido definido, no jargão de mercado, como aquele é o produzido de fontes renováveis variáveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.

A classificação do hidrogênio em cores pode apresentar definições diferentes dependendo da referência. Podem ser encontradas menções a outras cores como o branco, referente ao hidrogênio natural ou geológico, e o turquesa, obtido através craqueamento térmico do metano, sem gerar CO<sub>2</sub>. Nem sempre os critérios são os mesmos e publicações diferentes utilizam, não raramente, certas cores para designar o hidrogênio obtido por processos distintos. A IEA (*International Energy Agency*) questiona o rigor técnico do uso de cores para definir o hidrogênio por rotas tecnológicas [6]. Ainda assim, para facilitar a referência às outras rotas e utilizar os jargões de mercado usuais (marrom, cinza, azul e verde), propõem-se para o hidrogênio produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica a cor musgo (com variações de tons de verde que podem ir do “amarronzado”, caso de alterações significativas do uso do solo, ao “esverdeado”, caso de carbono nulo ou negativo). Com base no exposto acima, a Tabela 1 apresenta a síntese da classificação de hidrogênio em escada de cores.

Tabela 1 – Classificação de hidrogênio em escada de cores

Cor	Classificação	Descrição
■	hidrogênio preto	produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
■	hidrogênio marrom	produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	hidrogênio cinza	produzido do gás natural sem CCUS
■	hidrogênio azul	produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS
■	hidrogênio verde	produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.
□	hidrogênio branco	hidrogênio natural ou geológico
■	hidrogênio turquesa	produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO <sub>2</sub>
■	hidrogênio musgo	produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica

Fonte: [5]

## Usos do Hidrogênio

O mercado de hidrogênio atingiu um novo *momentum* com anúncios por diferentes governos de seus planos estratégicos para o aproveitamento desse recurso como elemento fundamental para a transição energética. Isto porque o hidrogênio (H<sub>2</sub>) tem vantagens como alta densidade energética, versatilidade de uso, ser um combustível sem carbono (*carbon-free*) e a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia. Várias iniciativas foram criadas, então, para tentar viabilizar, em especial, o “hidrogênio verde” com foco em um duplo objetivo: recuperação da economia e aceleração da transição energética em segmentos de mercado de difícil descarbonização [5].

Até o cenário atual, percebe-se que o uso do hidrogênio se concentrou em aplicações muito específicas, como no refino de petróleo ou na produção de amônia. Entretanto, há perspectivas diferentes a partir de agora com o crescente investimento em fontes de energias renováveis, principalmente eólica e solar, que têm apresentado um custo cada vez menor. Além disso, a evolução tecnológica e industrial dos eletrolisadores têm proporcionado uma grande queda no custo de produção do hidrogênio verde. Para cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris, será necessário cortar em 60% as emissões de dióxido de carbono até 2050. Nesse contexto, pode-se afirmar que o hidrogênio verde, e somente ele, permitirá a descarbonização de alguns setores, como a siderurgia e a produção de fertilizantes. Sabendo-se que 70% do custo de produção do hidrogênio é o custo de energia, os investimentos para a produção de hidrogênio verde no Brasil podem se beneficiar da rede elétrica nacional, uma vez que o Brasil possui uma matriz elétrica composta por 85% de energia renovável (hidrelétrica mas com presença crescente de energia eólica, solar e de biomassa) [7].

A seguir seguem aplicações potenciais para o hidrogênio:

**Refinarias de petróleo:** O hidrogênio cinza pode ser substituído diretamente pelo hidrogênio verde nos processos da refinaria [7].

**Combustível rodoviário:** A maior densidade de energia do hidrogênio torna os veículos elétricos de célula de combustível de hidrogênio (*FCEVs - fuel-cell electric vehicles*) adequados para transporte rodoviário de longa distância ou pesado. Para que os veículos elétricos de célula de combustível de hidrogênio fossem amplamente adotados, eles precisariam se tornar mais baratos e os postos de abastecimento precisariam ser construídos [8].

**Produção de amônia.** Este é um dos usos de curto prazo mais promissores para o hidrogênio de baixo carbono. A amônia verde, feita

com hidrogênio verde, deve ser a primeira variedade a igualar o custo da produção convencional de amônia. O hidrogênio também é relativamente simples de integrar na produção de amônia, portanto, é necessária menos infraestrutura de apoio. E a amônia pode ser usada como combustível ou como “vetor” para o transporte de hidrogênio [8].

Segundo um relatório técnico da Korean Register (KR) [9] que é líder mundial em suporte técnico à indústria marítima, o ponto forte da amônia é ser relativamente fácil de armazenar devido à energia racional, densidade e temperatura de liquefação em comparação com o hidrogênio, além de ter os custos de produção e transporte mais baixos em comparação com outros combustíveis neutros em carbono.

Do ponto de vista da possibilidade de ser usada como combustível, destaca-se a indústria naval onde há esforços em andamento para queimar amônia diretamente em usinas de energia e motores de navios, segundo os especialistas da Chemical & Engineering New [10]. Apesar disso, os motores que queimam amônia ainda são experimentais. Segundo os especialistas, em 2024 será possível ter desenvolvida essa tecnologia. Em uma dessas iniciativas, a fabricante de motores finlandesa Wartsila testou, em 2021, um motor marítimo de quatro tempos movido a amônia. Em outra, a MAN Energy está aperfeiçoando um motor de dois tempos com amônia.

**Produção de aço.** O setor siderúrgico é um dos maiores emissores industriais, produzindo cerca de 7 a 9% das emissões globais. Usar hidrogênio verde para alimentar a redução direta de ferro como matéria-prima para fornos elétricos é um caminho para o aço com zero carbono. Os principais produtores de aço da Europa estão liderando a produção de aço com hidrogênio [8].

**Combustível de aviação.** À medida que a indústria de viagens se recupera da pandemia do COVID-19, espera-se que as viagens aéreas



produzam 3% das emissões globais de carbono. Essas emissões serão difíceis de diminuir até que os aviões sejam feitos para voar com combustíveis diferentes do combustível de aviação à base de petróleo. A melhor alternativa de curto prazo, de acordo com a *Clean Skies for Tomorrow Coalition*, pode ser combustíveis de aviação sustentáveis feitos de matérias-primas renováveis, como biomassa agrícola. Na próxima década, o hidrogênio poderá fornecer energia elétrica para aeronaves menores equipadas com células de combustível. Eventualmente, o hidrogênio também poderia ser usado para combustão em aviões maiores [8].

## **2. Hidrogênio Verde no Brasil**

O Brasil possui vantagens na produção do hidrogênio verde por seu potencial abundante de energia eólica e solar, sistema elétrico integrado e de baixo carbono, e sua posição geográfica vantajosa para alcançar a Europa e a Costa Leste Norte-Americana. [7]. O desenvolvimento de tecnologias para a economia do hidrogênio certamente contribuirá para uma utilização mais eficiente dessas fontes energéticas, além de possibilitar uma participação importante no mercado mundial de equipamentos e serviços relacionados às energias renováveis e ao hidrogênio. Dessa forma, o engajamento do país na corrida para a implantação da economia do hidrogênio é altamente estratégico dos pontos de vista econômico, tecnológico e ambiental [4].

No Brasil, um dos primeiros passos importantes na temática do hidrogênio consistiu na criação, em 1998 do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH). Posteriormente, em 2002, foi instituído o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCac) pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), tendo

como objetivo “organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada”. Em 2005 esse Programa passou por reformulação, recebendo o nome de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH<sub>2</sub>) [11].

Em 2003, o país tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (*International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*), visando trocar informações governamentais, industriais e acadêmicas no assunto de células a combustível e o hidrogênio na sociedade. Em 2005, foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, com metas ao longo de 20 anos, apontando: i) a importância das diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas; ii) o papel do gás natural na transição até o predomínio do hidrogênio verde; iii) a difusão nos mercados de geração distribuída, regiões isoladas e ônibus urbanos [11].

Nesse ponto, vale destacar a importância do gás natural no processo de transição energética até que o hidrogênio verde esteja completamente estabelecido do ponto de vista econômico.

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE divulgou, no início de 2022, duas notas técnicas dedicadas ao hidrogênio cinza e ao hidrogênio azul [12]. Os dois estudos apresentam a produção de hidrogênio através do gás natural usando a tecnologia de reforma a vapor [13], [14]. Além disso, apontam que a entrada de múltiplas rotas de produção de hidrogênio, com participação de fósseis e renováveis, pode contribuir para a ampliação do uso do gás natural na estratégia brasileira de transição energética. Especificamente as rotas de produção do hidrogênio azul e turquesa têm potencial para gerar um energético flexível e limpo a partir do gás natural e abrem oportunidades para a cadeia do gás desempenhar

papel essencial na energia e na indústria de baixo carbono, expandindo a função de combustível de transição. A geração e valorização do hidrogênio azul pode ser entendida como estratégia de manutenção e expansão da indústria de gás natural e seu consumo tenderá a ser favorecido pelas mesmas pressões que buscam acelerar a substituição de combustíveis fósseis.

Em 2012 uma apresentação do MCTI mostrou algumas questões importantes após dez anos de investimentos em projetos durante o Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC): i) uma “euforia” no início dos anos 2000, que perdurou até 2008; ii) após esse período, uma desaceleração de investimentos. Em 2017, foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH<sub>2</sub>), iniciativa para organizar melhor as ações e recursos (públicos e privados), gerando bons resultados com uma ação coordenada junto ao MCTI, MEC, MME, ANEEL, ANP e Eletrobrás, entre outros órgãos do Governo Federal [15].

Em 2018, o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis explicita que o “uso de energias renováveis no Brasil representa uma oportunidade para a produção de hidrogênio por eletrólise quando houver excesso de oferta de energia elétrica de origem intermitente. O hidrogênio possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia [11].

Mais recentemente, em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) [16] apontou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e como elemento de interesse no contexto da descarbonização da matriz energética, elencando diversos usos e aplicações, além de trazer recomendações para a política energética, entre as quais se podem destacar o adequado desenho do arcabouço jurídico-regulatório, que incentive a entrada de tecnologias aplicáveis à cadeia energética do

hidrogênio como um todo (produção, transporte, armazenamento e consumo). Já em 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou as “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio” [5], abordando o panorama do mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, o papel do hidrogênio na transição energética e, por fim, as implicações para políticas públicas. Este documento buscou consolidar aspectos conceituais e fundamentais para subsidiar a construção da estratégia brasileira de hidrogênio, destacando a importância de o “país aproveitar ao máximo suas vantagens competitivas existentes e construir novas vantagens competitivas em benefício de sua sociedade”. O MME também desenvolveu, no âmbito do Parceria Energética Brasil-Alemanha, o estudo “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde”[17], o qual ofereceu um panorama da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais atuantes no Brasil na área de hidrogênio, bem como uma visão geral sobre as principais tecnologias de aplicação de hidrogênio e *Power-to-X*<sup>1</sup>, e o seu estado de maturidade no Brasil em comparação aos países líderes nessas tecnologias [11].

Desse modo, tem-se observado que o Brasil está abordando o assunto do hidrogênio em nível nacional, contando com o envolvimento de diversos atores da sociedade. Nesse contexto, o Conselho Nacional de Política Econômica (CNPE) publicou, em 2021, duas resoluções com implicações positivas para o desenvolvimento do hidrogênio no país. A primeira delas, a Resolução CNPE nº 2 de 2021 [18], orienta a priorização da destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e pela Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustível - ANP para o

---

<sup>1</sup> *Power-to-X*: diferentes caminhos de conversão, armazenamento e reconversão de eletricidade que usam hidrogênio como vetor para produção de combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos.

hidrogênio, entre outros temas relacionados ao setor de energia e à transição energética. Já a segunda, a Resolução CNPE nº 6 de 2021, trata de determinação para a proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) [2].

Ainda durante o ano de 2021, o Brasil co-liderou o Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, apresentando o pacto energético sobre hidrogênio. Os pactos energéticos são compromissos voluntários, que visam acelerar o cumprimento das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7), que trata do acesso universal a energias limpas. O pacto energético sobre hidrogênio tem por objetivo fomentar o desenvolvimento da indústria e mercado do hidrogênio no país por meio de consolidação de uma base de conhecimento sobre esse vetor energético no Brasil, com base em três pilares: i) políticas de pesquisa, desenvolvimento e inovação; ii) capacitação e treinamento; iii) criação de uma plataforma para consolidação e disseminação de informações sobre hidrogênio no país [2].

Dentre as iniciativas em prol do desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil, cabe destacar a criação pelo Governo do Estado do Ceará do primeiro HUB de Hidrogênio Verde do país, em 19 de fevereiro de 2021. Essa iniciativa foi seguida pelos estados de Pernambuco, Rio de Janeiro, Bahia e Minas Gerais, que também anunciaram a criação de HUBs de hidrogênio verde, dando visibilidade às potencialidades desses estados, possibilitando a atração de investimentos [11].

### **3. Contextualização do Hidrogênio Verde na Matriz Energética, Normas e Legislações**

Em 2006 a ISO designou pela norma ABNT NBR ISO 14064 de 2007, uma série de diretrizes técnicas com princípios e requisitos para desenvolver, relatar e gerenciar inventários de Gases de Efeito Estufa (GEE). A ISO 14064-1 especifica e orienta a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Além disso, inclui requisitos e orientação sobre o gerenciamento da qualidade do inventário, com recomendações sobre os procedimentos de informações de GEE da organização [19]. Em 2009 foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima que considera em seu art. 11, no parágrafo único da Lei 12.187, a necessidade de aumentar a participação das fontes renováveis e mitigar a emissão de carbono fóssil na matriz energética [20].

No âmbito do novo acordo sobre o clima, adotado pela 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21/UNFCCC) em 2015, os países envolvidos assumiram o compromisso de manter o aumento da temperatura média global em menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. O Brasil, em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), compromete-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, e em 43% até o ano de 2030, tendo como base o ano de 2005.

É crescente o interesse pelo desenvolvimento da geração de energia a partir de outras fontes renováveis, tais como a heliotérmica, as oceânicas, a do hidrogênio e o uso de biocombustíveis por meio de resíduos urbanos e agroindustriais, como, por exemplo, o biogás e o biometano. No que se refere aos combustíveis, os biocombustíveis despontam como uma alternativa sustentável à dependência energética de origem fóssil, bem

como auxiliam na redução de GEE e de outras substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2026), o aumento da demanda desses energéticos nos próximos 10 anos está estimado em, aproximadamente, 27% [21].

Para suportar esse avanço, foi estabelecida a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) pela Lei nº 13.576/2017, como parte integrante da política nacional de que trata o art. 1º da Lei nº 9478 de 1997. A 13.576/2017 foi criada com o objetivo de contribuir para o atendimento aos compromissos do país no âmbito do Acordo de Paris sob COP 21/UNFCCC, priorizando o uso eficiente da biomassa para fins energéticos e possui como objetivo principal a redução de GEE pela utilização sustentável dos biocombustíveis como alternativa aos combustíveis de origem fóssil [22].

Esta legislação aborda os seus instrumentos em relação às metas de redução das emissões dos GEE, a exemplo dos créditos de descarbonização e ações no âmbito do Acordo de Paris sobre mudanças climáticas. Esta lei foi importante para impulsionar o apoio à pesquisa, ao desenvolvimento tecnológico e à inovação em biocombustíveis, sendo este um dos princípios do RenovaBio.

Outra grande iniciativa na temática de biocombustíveis é o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), uma experiência única em relação à combinação de uma política social e um programa energético. Os avanços evidenciados nas cadeias produtivas de energias renováveis e biocombustíveis somente foram possíveis devido à estruturação de uma base tecnológica forte, com capacidade laboratorial adequada e com a formação de recursos humanos especializados nas diferentes áreas de conhecimento [23].

Dessa forma, o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis identifica os principais desafios

tecnológicos nas cadeias produtivas de energias renováveis e biocombustíveis, bem como propõe metas e ações de CT&I voltadas para superar os desafios identificados. As ações deste Plano envolvem as atividades desenvolvidas pelo MCTIC (Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação), suas agências, unidades de pesquisa, organizações sociais e empresas públicas, bem como outras instituições pertencentes ao Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI) [24].

Dentre os desafios deste plano pode destacar as metas referentes ao hidrogênio, tais como: diversificar as fontes de geração renovável na matriz energética, promovendo estudos sobre o potencial das energias oceânicas, heliotérmica, eólica *offshore* e hidrogênio, e articulando a formação e consolidação de redes pesquisa e desenvolvimento com foco em energia heliotérmica e hidrogênio; contribuir para agregação de novas tecnologias para eletromobilidade, incentivando projetos demonstrativos de uso de energias e combustíveis renováveis para produção de hidrogênio para uso veicular e para produção de gás de síntese; além de incentivar novas aplicações para o biogás e o biometano, promovendo projetos demonstrativos de produção de hidrogênio e gás de síntese [24].

#### **4. Quando o Hidrogênio Verde (H<sub>2</sub>V) terá um custo competitivo?**

Ao se levantar informações sobre custos e competitividade por rota tecnológica do hidrogênio, percebe-se a existência de uma escolha estratégica para o desenvolvimento de mercado. Por um lado, a rota tecnológica que tem mais potencial para desenvolver novos mercados por ser dominante e mais competitiva atualmente é a reforma a vapor do metano de gás natural (“hidrogênio cinza”). Entretanto, em um futuro cenário de descarbonização profunda essa rota pode enfrentar riscos e plantas novas podem virar “ativos encalhados” – *stranded assets*. Por



outro lado, a rota tecnológica do “hidrogênio verde” ainda é menos competitiva. Contudo, essa rota apresenta grandes oportunidades no futuro em um cenário de aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com fontes renováveis variáveis (eólica e solar, particularmente). Os compromissos de descarbonização profunda das economias contribuem para este cenário.

De fato, os menores custos de produção do hidrogênio, atualmente, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, as quais consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. A eletrólise da água usando fontes renováveis (eólica e solar) é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado [5].

A Figura 2 mostra a curva de preços do hidrogênio ao longo do primeiro trimestre de 2020, na Califórnia, para as tecnologias de Eletrólise PEM e Reforma a vapor do metano sem CCUS (*Carbon Capture Utilization and Storage*).

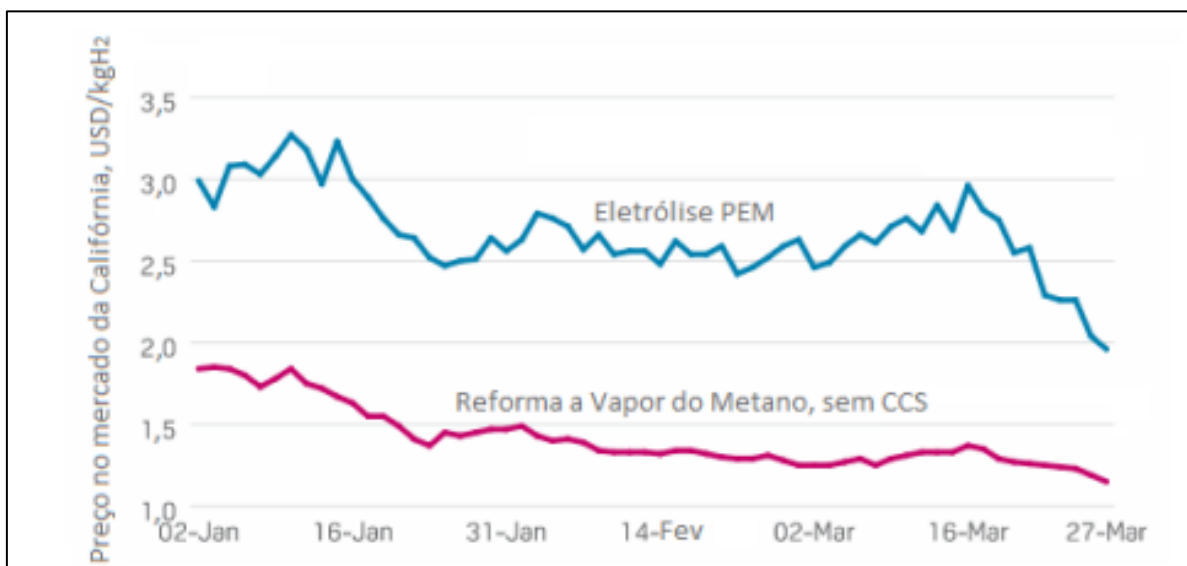


Figura 2 – Levantamento de preços do hidrogênio no mercado da Califórnia, Estados Unidos, por processo de produção, no primeiro trimestre de 2020.

Fonte: [25]

Pode-se perceber um estreitamento do diferencial de preços entre o H<sub>2</sub> obtido por eletrólise e aquele gerado por reforma a vapor do metano no final de março de 2020. Todavia, não é possível afirmar se é um efeito conjuntural relacionado a influências assimétricas da pandemia no mercado ou se é o início de um efeito mais estrutural relacionado à queda de custos da eletrólise. Entretanto, estudos têm apontado para expectativas na redução significativa de custos até 2030. A Bloomberg New Energy Finance [26], por exemplo, projeta reduções de custos para a produção de hidrogênio de fontes renováveis. De acordo com esse estudo, estima-se que esta tecnologia deva se tornar mais competitiva até 2030, ampliando sua vantagem sobre o hidrogênio de fontes fósseis até 2050, conforme apresentado na Figura 3.

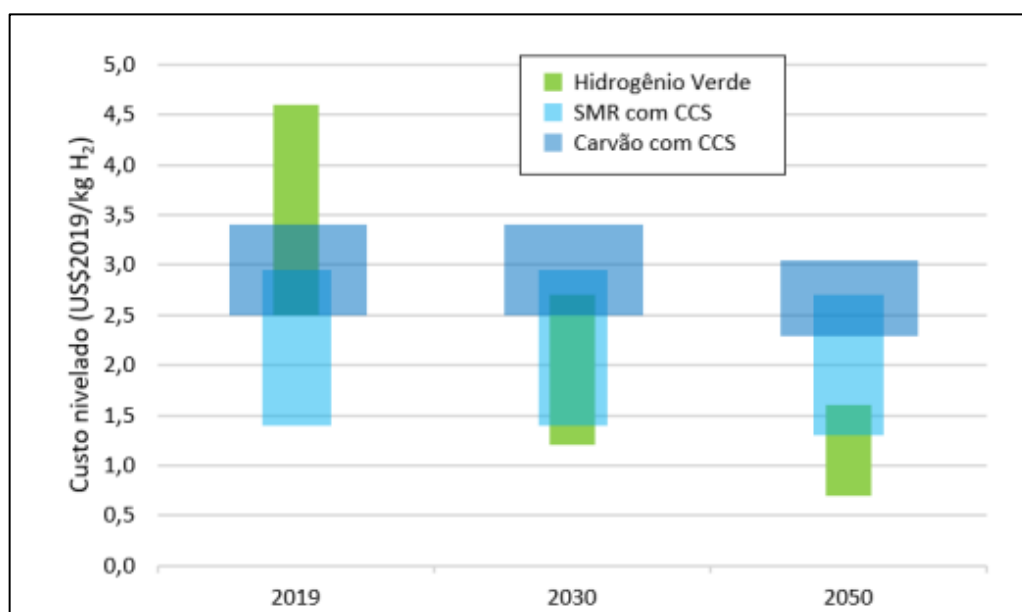


Figura 3 – Projeções das faixas de custo nivelado para projetos de grande escala.

Fonte: Adaptado de [26]

Neste estudo, a projeção para eletrólise com fontes renováveis considera projetos de grande porte com estimativas de redução de Capex significativas.

Um estudo da IRENA- *International Renewable Energy Agency* em 2019 [27] também aponta a expectativa de que hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio de origem fóssil, antes de 2025, para os melhores casos. Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040. As curvas de projeção da evolução de custos são mostradas na Figura 4 [5].

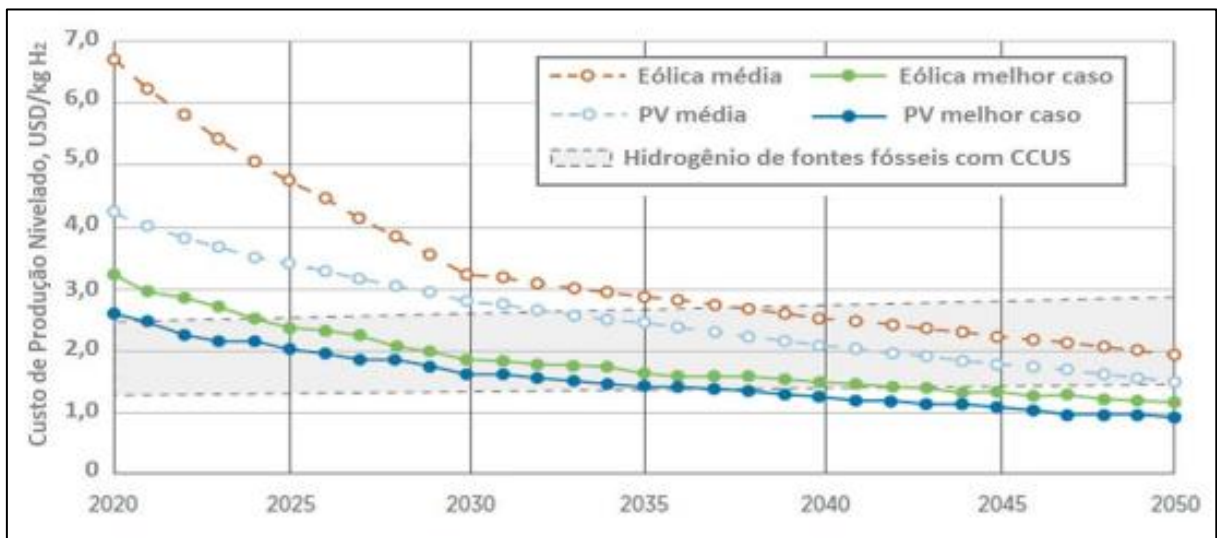


Figura 4 – Projeção da evolução de custos de produção de hidrogênio  
Fonte: [27]

A mesma trajetória de redução de custos do hidrogênio de fontes renováveis é identificada no relatório da Hydrogen Council em 2020 [28]. Este documento, que considera o Custo Total de Aquisição, Utilização e Manutenção (*TCO – Total Cost of Ownership*), analisa a competitividade do hidrogênio em 35 aplicações no horizonte de 2030. O uso do hidrogênio em 22 aplicações poderá se tornar competitivo, em condições favoráveis. Estas condições são específicas de cada aplicação e de cada região, e incluem um preço de carbono, a disponibilidade de outras fontes renováveis e a possibilidade de captura e sequestro de carbono. Também é apontado pelo documento que para acelerar a penetração do hidrogênio no mercado, são necessárias ações governamentais, tais como

desenvolvimento de estratégias nacionais, coordenação dos agentes do mercado para capturar oportunidades, promover uma regulação que elimine barreiras, padronização, investimento em infraestrutura e incentivos. No outro extremo, aplicações como uso em turbinas, matéria-prima para indústria e combustível sintético de aviação deverão requerer um preço de carbono de, no mínimo, USD 100/t CO<sub>2</sub>-eq. para se viabilizarem. A Tabela 2 apresenta as 35 aplicações consideradas, agrupadas em mais ou menos competitivas, em relação a outras fontes de baixo carbono e em relação às fontes de energia convencionais utilizadas em cada aplicação [5].

Tabela 2 – Competitividade de aplicações do hidrogênio até 2030.

<p>H<sub>2</sub> e mais competitivo</p> <p>H<sub>2</sub> e menos competitivo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerador de Back-up</li> <li>• Produção de metanol</li> <li>• Geração de vapor com rede de H<sub>2</sub> existente</li> <li>• Embarcações regionais de pequeno porte</li> <li>• Transporte de médio porte a longa distância</li> <li>• Adição à rede de gás natural</li> <li>• Turbina para carga flexível</li> <li>• Fertilizantes</li> <li>• Refinaria de petróleo</li> <li>• Turbina em ciclo combinado*</li> <li>• Aquecimento a altas temperaturas*</li> <li>• Aquecimento a média temperatura*</li> <li>• Produção de ferro e aço*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferrovias regionais</li> <li>• Veículos Esportivos Utilitários</li> <li>• Frotas de táxi</li> <li>• Veículos de passageiro de grande porte</li> <li>• Empilhadeiras</li> <li>• Caminhões de médio e grande portes</li> <li>• Ônibus urbanos de longa distância</li> <li>• Transporte Rodoviário de Passageiros de longa distância</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geração remota</li> <li>• Combustíveis sintéticos para aviação</li> <li>• Cogeração em prédios pequenos</li> <li>• Veículo de passageiros urbano compacto</li> <li>• Veículos médios de curta distância</li> <li>• Cargueiros Ro-Pax<sup>1</sup></li> <li>• Geração de vapor com rede de H<sub>2</sub> nova</li> <li>• Turbina em ciclo combinado*</li> <li>• Aquecimento a altas temperaturas</li> <li>• Fabricação de cimento*</li> <li>• Aquecimento a média temperatura</li> <li>• Calor para produção de plásticos*</li> <li>• Produção de ferro e aço*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilitários para entregas urbanas</li> <li>• Ônibus urbanos de curta distância</li> </ul>
	<p>H<sub>2</sub> é menos competitivo</p>	<p>H<sub>2</sub> é mais competitivo</p>
<p>Competitividade do hidrogênio em relação às fontes energéticas convencionais de cada aplicação</p>		

Nota: \* Se CCUS não estiver disponível para estas aplicações usando fontes fósseis, o hidrogênio é a única opção de descarbonização  
 Fonte: [28]

Posteriormente, em 2021, a Hydrogen Council reafirmou as trajetórias identificadas no relatório de 2020, apontando aceleração da tendência de queda nos custos de produção do hidrogênio de fontes renováveis (60% de redução de 2020 a 2030). Segundo o documento, ao se introduzir os custos de carbono (USD 50/tCO<sub>2</sub>e em 2030, USD 150/tCO<sub>2</sub>e em 2040 e USD 300/tCO<sub>2</sub>e em 2050), o preço de indiferença (*breakeven*) entre o hidrogênio verde e o cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034 [29].

É fato que há um potencial para que uma variedade de projetos de geração de hidrogênio verde avancem. Seja através de apoio governamental, projetos financiados por empresas de petróleo e gás e, principalmente, pelo menos inicialmente, apoiados pelo financiamento de projetos bancários tradicionais para tornar verde o hidrogênio já usado por plantas e refinarias de amônia. Juntos, eles poderiam formar a base de um ecossistema de hidrogênio verde saudável e crescente [30].

## **5. Considerações Finais**

A necessidade de mudança na matriz energética mundial está cada vez mais clara e urgente. A preocupação com o aquecimento global tem levado ao estabelecimento de metas globais para conter o aumento da temperatura do planeta. O acordo de Paris (2015), por exemplo, objetivou reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono. Entretanto, o uso intenso de combustíveis fósseis como matriz energética no mundo intensifica a liberação desse e de outros gases nocivos à atmosfera. Mais recentemente, a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP26), em Glasgow, se encerrou com o Pacto de Glasgow que teve o papel de manter a meta de aumento em, no máximo, 1,5°C na temperatura média da Terra.

Nesse contexto, o hidrogênio vem sendo apontado como o combustível do futuro, um vetor fundamental para a transição energética. O hidrogênio verde, especificamente, será imprescindível para mercados de difícil descarbonização.

A maior parte da produção atual de hidrogênio ainda é feita através de processos que usam gás natural como matéria-prima e as tecnologias para a produção de hidrogênio verde ainda estão entre as mais caras do mercado. Apesar disso, diversos estudos apontam que esse “combustível” possa ser competitivo até 2030, tomando-se como base a redução do custo de investimento em eletrólise e em geração de energias com fontes renováveis.

Considerando-se a potencial abundância do Brasil em fontes de energias renováveis, o engajamento do país para a implantação da economia do hidrogênio pode possibilitar uma participação estratégica no mercado mundial não só do ponto de vista econômico mas também tecnológico e ambiental.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] IBERDROLA, “O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta.”  
<https://bit.ly/3CMj64x>
  
- [2] M. de M. e Energia, “Programa Nacional do Hidrogênio PNH<sub>2</sub> - Proposta de Diretrizes,” 2021.  
<https://bit.ly/3teRORv>
  
- [3] Reset, “O que é o hidrogênio verde - e por que ele promete ser o combustível do futuro,” 2021.

<https://bit.ly/3MP2SfR>

- [4] Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), “Hidrogênio energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025,”  
<https://bit.ly/3q9kZn3>
- [5] T. V. B. Ferreira *et al.*, “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio,” *Nota Técnica*, p. 34, 2021,  
<https://bit.ly/3CXieKL>
- [6] IEA, “The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities,” *Propos. Doc. Japanese Pres. G20*, no. June, p. 203, 2019.  
<https://bit.ly/36gaibw>
- [7] McKinsey & Company, “Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo,” 2021.  
<https://mck.co/3CS1Wmo>
- [8] McKinsey & Company, “Innovating to net zero: An executive’s guide to climate technology,” 2021.  
<https://mck.co/35RZ113>
- [9] “Korean Register - KR issues ‘Guidelines for ships using ammonia as fuel,’” 2021.  
<https://bit.ly/36gwOkz>
- [10] Chemical And Engineering News, “Is ammonia the fuel of the future?”  
<https://bit.ly/3IrXVpK>

- [11] F. D. Bezerra, “HIDROGÊNIO VERDE : NASCE UM GIGANTE NO SETOR DE ENERGIA,” pp. 1–13, 2021.  
<https://bit.ly/37B3hSP>
- [12] “Empresa de Pesquisa Energética - EPE - Publicações.”  
<https://bit.ly/3ipBLtG>
- [13] “Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural,” 2022,  
<https://bit.ly/3JsgqeV>
- [14] “Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS,” 2022  
<https://bit.ly/3689NAp>
- [15] “Associação Brasileira do Hidrogênio - ABH2.”  
<https://abh2.org/>
- [16] “Plano Nacional de Energia - 2050.”  
<https://bit.ly/36u1G0d>
- [17] “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde,”  
<https://bit.ly/3iGtulv>
- [18] “Resolução nº 2, 10/02/2021.”  
<https://bit.ly/36zjOq6>



- [19] “ABNT NBR ISO 14064:1: Gases de efeito estufa: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa.” Rio de Janeiro-RJ, 2007.
- [20] “Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC - LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009.”  
<https://bit.ly/34MzJAM>
- [21] “Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.” 2017.  
<https://bit.ly/3D6xrsT>
- [22] “RenovaBio - Lei nº 13.576/2017.”  
<https://bit.ly/3Jj7WqA>
- [23] “Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB).”  
<https://bit.ly/37xfIzb>
- [24] “Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis 2018 - 2022,” 2018.  
<https://bit.ly/3IsF5Pr>
- [25] “S&P GLOBAL PLATTS (2020). Green hydrogen costs ‘can hit \$2/kg benchmark’ by 2030. BNEF.”  
<https://bit.ly/3CHDLad>
- [26] “BNEF – Bloomberg New Energy Finance (2020). Hydrogen Economy Outlook Key messages,” 2020.  
<https://bit.ly/3tX8BaI>

[27] The International Renewable Energy Agency (IRENA), *Hydrogen: a Renewable Energy Perspective*, no. September. 2019.

<https://bit.ly/3IdmsPa>

[28] Hydrogen Council, “Path to hydrogen competitiveness: a cost perspective,” 2020.

<https://bit.ly/3tXPQ78>

[29] Hydrogen Council, “Hydrogen Insights A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness,” 2021.

<https://bit.ly/3w4FiFX>

[30] Economist Impact, “Financing green hydrogen: Start with the obvious.”

<https://bit.ly/34IopFF>

[\*] FERNANDA NAYARA RODRIGUES PEREIRA SANTANA, Pesquisadora de hidrogênio verde do Núcleo de Energias Renováveis e Eficiência Energética de Sergipe (NEREES), no SergipeTec. Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Sergipe – UFS (2009), especialista em Fluidos de Perfuração e Completação pela Halliburton University Houston-TX (2012) e especialização em Administração, Finanças Empresariais e Negócios pela Escola Superior Aberta do Brasil - ESAB (2019). Atualmente é aluna no Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe - UFS na modalidade Mestrado Acadêmico.

[\*] AMANDA DE AZEVEDO GONÇALVES, Doutora em Engenharia de Processos (UNIT, 2022), Mestra em Recursos Hídricos (UFS, 2016), Especialista em Engenharia de Saneamento Básico e Ambiental (UNICID, 2017), Especialista em Educação Ambiental (SENAC, 2012), Bacharel em Engenharia Ambiental. Atualmente é Pesquisadora de hidrogênio Verde do Núcleo de Energias Renováveis e Eficiência Energética de Sergipe (NEREES), no SergipeTEC. Possui experiência em tratamento de águas usando processos oxidativos avançados, monitoramento da qualidade das águas de bacias hidrográficas, técnicas de produção de biodiesel, licenciamento e consultoria ambiental.