

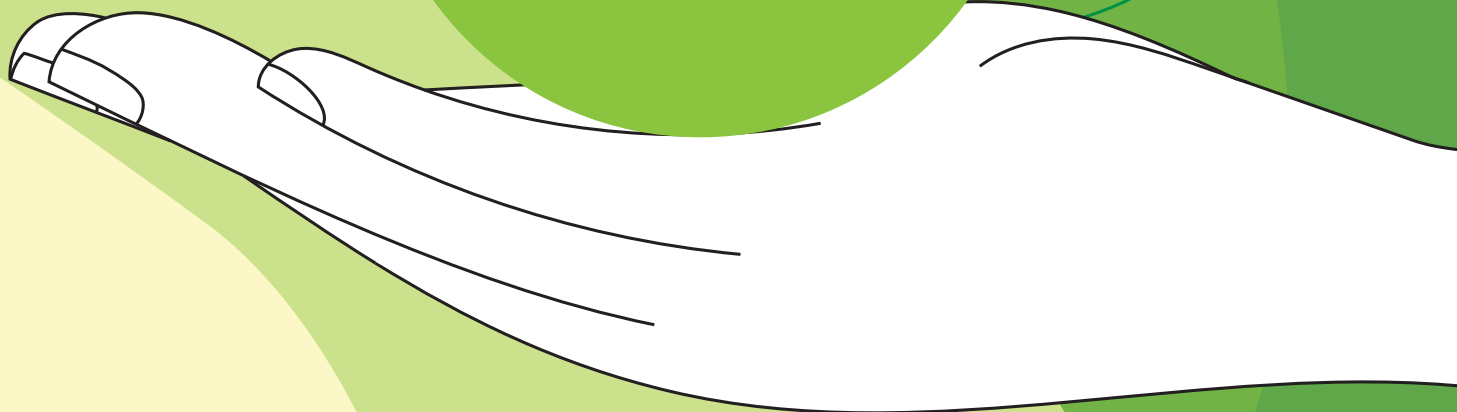
# O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ENERGIA E TRANSPORTE

THE ROLE OF GREEN HYDROGEN  
IN DECARBONIZING ENERGY AND  
TRANSPORT SYSTEMS

---

Andrea Souza Santos  
Victor Hugo Souza de Abreu

**H<sub>2</sub>**



**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

O papel do hidrogênio verde na descarbonização dos sistemas de energia e transporte [livro eletrônico] = The role of green hydrogen in decarbonizing energy and transport systems / ilustração/ illustrations Ana Borelli ; autores e editores/ authors and editors Andréa Souza Santos, Victor Hugo Souza de Abreu. -- Rio de Janeiro : Fundação Coppetec, 2024.

PDF

Edição bilíngue: português/inglês

Bibliografia

ISBN 978-65-980323-1-9

1. Clima - Mudanças 2. Desenvolvimento sustentável 3. Energia - Fontes alternativas 4. Hidrogênio 5. Sustentabilidade I. Borelli, Ana. II. Santos, Andréa Souza. III. Abreu, Victor Hugo Souza de. IV. Título : The role of green hydrogen in decarbonizing energy and transport systems

24-218994

CDD-333.793215

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Energia elétrica e desenvolvimento sustentável :

Economia 333.793215

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415



Por meio da:



# CRÉDITOS

## CREDITS

### **EDITORES | EDITORS:**

Andrea Souza Santos

Victor Hugo Souza de Abreu

### **EQUIPE | TEAM:**

Andrea Souza Santos

Fábio Toniolo

Laís Crispino Proença

Leonardo Francisco

Thiago Henrique Cordeiro

Victor Hugo Souza de Abreu

### **REVISÃO EM INGLÊS | ENGLISH REVISION:**

Prof. Pedro Cardoso Santos

Poli Traduções

### **DIREÇÃO DE ARTE, DESIGN GRÁFICO E ILUSTRAÇÕES**

ART DIRECTION, GRAPHIC DESIGN AND ILLUSTRATIONS:

Ana Borelli

IYÁ Produções Ilimitadas

### **REVISÃO DE EDITORAÇÃO | EDITORIAL REVIEW:**

Fernanda Werneck

Vinícius Vêras

# O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NA DESCARBONIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ENERGIA E TRANSPORTE

THE ROLE OF GREEN HYDROGEN  
IN DECARBONIZING ENERGY AND  
TRANSPORT SYSTEMS

**EDITORES** | EDITORS:

Andrea Souza Santos

Victor Hugo Souza de Abreu

# APRESENTAÇÃO

## PRESENTATION

---

### **Prof. Andréa Santos**

Professora do Programa de Engenharia de Transportes, da COPPE/ UFRJ

Professor at the Transport Engineering Program - COPPE/UFRJ

Iniciativas têm sido implementadas ao redor do mundo de forma a buscar soluções para o enfrentamento da crise climática nesta década crítica. É imprescindível promover de forma rápida e urgente uma transição energética para uma economia de baixo carbono, que consiste nos esforços de mitigação, ou seja, redução das emissões de gases de efeito estufa. Com isso, as energias renováveis, as novas tecnologias e combustíveis limpos desempenham um papel crucial para apoiar esta transição, que deve ser justa e compatível com o objetivo de limitar a temperatura média do planeta em 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais, conforme estabelecido no Acordo de Paris e reafirmado no Consenso de Dubai (UAE Consensus), documento final acordado na 28ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, a COP 28, em Dubai.

Neste livro, apresentamos uma introdução sobre o tema hidrogênio verde a partir da experiência do Projeto intitulado “Hidrogênio verde: Produção de Hidrogênio Renovável, compressão, armazenamento e utilização em sistemas de energia e mobilidade”. Trata-se

Initiatives have been implemented worldwide to find solutions to tackle the climate crisis in this critical decade. It is essential to quickly and urgently promote energy transition into a low-carbon economy, which consists of mitigation efforts, i.e. reducing greenhouse gas emissions. Renewable energies, new technologies and clean fuels play a crucial role in supporting this transition, which must be fair and compatible with the objective of limiting the planet’s average temperature to 1.5 °C above pre-industrial levels, as established in the Paris Agreement and reaffirmed in the Dubai Consensus, with final document being agreed at the 28th Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, COP 28, in Dubai.

In this book, we present an introduction to the green hydrogen subject based on the experience of the project entitled “Green Hydrogen: Renewable Hydrogen Production, Compression, Storage and Use in Energy and Mobility Systems”. This is a pilot plant for the production of green H<sub>2</sub> installed at Coppe - Alberto Luiz Coimbra Institute for Graduate Studies and Research in Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, which was supported by the German-Brazilian

de uma planta piloto de produção de H<sub>2</sub> verde instalada na Coppe – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, que contou com apoio da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da GIZ (sigla em alemão para *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*).

Cooperation for Sustainable Development, through GIZ (the German acronym for *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*).





# SUMÁRIO

## SUMMARY

<b>1</b>	<b>Introdução ao Hidrogênio Verde</b> Introduction to Green Hydrogen	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Projeto H2 Verde</b> Green H2 Project	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>Futuro do Hidrogênio Verde na transformação sustentável</b> The future of green hydrogen in the sustainable transformation	<b>31</b>
	<b>3.1 Principais desafios</b> Main challenges	<b>35</b>
	<b>3.2 Práticas de Incentivo</b> Incentive Practices	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>Potencial brasileiro para produção e comercialização de hidrogênio</b> Brazilian potential for production and marketing of green hydrogen	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b> Concluding remarks	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Referências</b> References	<b>47</b>



# 1

## INTRODUÇÃO AO HIDROGÊNIO VERDE INTRODUCTION TO GREEN HYDROGEN

---



A intensificação dos esforços globais para atender às metas de neutralidade de carbono em várias nações, incluindo o Brasil, juntamente com o impulso em direção a uma economia verde que se intensificou no período pós-pandemia do COVID-19, tem fortalecido um movimento em direção à adoção em massa de fontes de energia renováveis tais como energia solar fotovoltaica e eólica (SANTOS *et al.*, 2021; DE ABREU *et al.*, 2023b). Isso porque o consumo exacerbado de combustíveis fósseis não só acarreta o aquecimento global e, conseqüentemente, a mudança do clima, mas também propicia o esgotamento desse recurso natural que é finito (DE ASSIS *et al.*, 2022a; b).

No entanto, um desafio significativo para a adoção generalizada de fontes renováveis é sua natureza intermitente. A produção de energia dessas fontes não é constante nem previsível, o que representa uma barreira à sua integração em grande escala. Para ultrapassar estas limitações, a construção de um sistema de abastecimento de hidrogênio tem sido cada vez mais aceito por um consenso global como um vetor de energia secundária, ou até mesmo primária, com importância crescente no progresso da descarbonização (EPE, 2021; KUMAR & LIM, 2022).

O hidrogênio, constituído por apenas um próton e um elétron (sem nêutrons) em sua forma mais comum, é o elemento mais simples e abundantemente encontrado no Universo. Sua prevalência remonta ao período logo após o *Big Bang*, a teoria cosmológica predominante sobre o desenvolvimento inicial do universo. Durante esse estágio inicial, conhecido

The intensification of global efforts to meet carbon neutrality goals in several nations, including Brazil, together with the boost towards a transition into a low-carbon economy, has strengthened a movement towards the large-scale adoption of renewable energy sources, such as solar photovoltaics and wind power (SANTOS *et al.*, 2021; DE ABREU *et al.*, 2023b). The reason is that the exacerbated consumption of fossil fuels not only intensifies global warming and, consequently, climate change, but also leads to the depletion of this finite natural resource (DE ASSIS *et al.*, 2022a; b).

However, a significant challenge for the widespread adoption of renewable sources is their intermittent nature. The production of energy from these sources is neither constant nor predictable, which represents a barrier to their large-scale integration. To overcome these limitations, the development of renewable hydrogen production systems has become increasingly accepted by a global consensus as a secondary, or even primary energy vector, with growing importance in the decarbonization progress (EPE, 2021; KUMAR & LIM, 2022).

Hydrogen, consisting of only one proton and one electron (no neutrons) in its most common form, is the simplest and most abundant element found in the Universe. Its prevalence dates back to the period just after the *Big Bang*, the prevailing cosmological theory about the early development of the universe. During this early stage, known as primordial nucleosynthesis, the universe underwent a hot and dense period in which hydrogen was

como nucleossíntese primordial, o universo passou por um período quente e denso, no qual o hidrogênio foi o primeiro elemento a se formar, estabelecendo sua posição como o bloco de construção fundamental do cosmos.

O hidrogênio apresenta múltiplas utilidades, podendo ser empregado como matéria-prima, combustível ou meio de transporte e armazenamento de energia (BIANCO & BLANCO, 2020; BEZERRA, 2021), conforme descrito na Tabela 1.

the first element being formed, establishing its position as the fundamental building block of the cosmos.

Hydrogen has multiple uses and can be used as raw material, fuel or means of energy transportation and storage (BIANCO & BLANCO, 2020; BEZERRA, 2021), as described in Table 1.

### **Tabela 1. Papéis do hidrogênio.**

Table 1. Roles hydrogen can play.

<b>FUNÇÃO</b> FUNCTION	<b>DESCRIÇÃO</b> DESCRIPTION
<b>Matéria-prima</b> Raw materials	<p>O hidrogênio pode ser utilizado como matéria-prima na produção de uma variedade de produtos químicos, incluindo amônia, metanol e diversos hidrocarbonetos. Esses produtos são essenciais para a fabricação de fertilizantes, produtos farmacêuticos, plásticos, e muitos outros produtos industriais (BEZERRA, 2021).</p> <p>Hydrogen can be used as raw material in the production of a variety of chemical products, including ammonia, methanol and various hydrocarbons. These products are essential for the manufacture of fertilizers, pharmaceuticals, plastics, and many other industrial products (BEZERRA, 2021).</p>

FUNÇÃO / FUNCTION	DESCRIÇÃO / DESCRIPTION
<p><b>Combustível</b> Fuel</p>	<p>O hidrogênio é uma fonte de energia mais limpa - com menos emissões de carbono - que pode ser utilizada como combustível em diversas aplicações, tais como veículos rodoviários (leves e pesados), sistemas de energia estacionária e até mesmo em aeronaves. Quando combinado com oxigênio em uma célula de combustível, produz eletricidade e água como subproduto, sem gerar poluentes (ALZOUBI, 2021; DE ABREU <i>et al.</i>, 2023; 2024).</p> <p>Hydrogen is a cleaner energy source - with lower carbon emissions - which can be used as fuel in various applications, such as road vehicles (light and heavy), stationary power systems and even aircraft. When combined with oxygen in a fuel cell, it produces electricity and water as by-product, without generating pollutants (ALZOUBI, 2021; DE ABREU <i>et al.</i>, 2023; 2024).</p>
<p><b>Meio de transporte e armazenamento de energia</b> Means of energy transportation and storage</p>	<p>O hidrogênio pode ser usado como um meio eficiente para transportar (ZHOU <i>et al.</i>, 2022) e armazenar energia (WAPPLER <i>et al.</i>, 2022). Por exemplo, ele pode ser produzido durante os períodos de baixa demanda de eletricidade (por meio de eletrólise da água) e armazenado e/ou transportado para uso posterior em veículos movidos a célula de combustível ou em sistemas de energia estacionária, ajudando a estabilizar a rede elétrica. Além disso, pode ser utilizado em processos de conversão de energia, como a produção de eletricidade em células de combustível (OLIVEIRA, BESWICK &amp; YAN, 2021).</p> <p>Hydrogen can be used as an efficient means of energy transportation (ZHOU <i>et al.</i>, 2022) and storage (WAPPLER <i>et al.</i>, 2022). For example, it can be produced during periods of low electricity demand (through water electrolysis) and stored and/or transported for later use in fuel cell vehicles or stationary power systems, helping to stabilize the electrical grid. In addition, it can be used in energy conversion processes, such as electricity production in fuel cells (OLIVEIRA, BESWICK &amp; YAN, 2021).</p>

Assim, o hidrogênio se destaca como uma solução crucial devido a uma série de vantagens, tais como sua abundância na natureza, facilidade de dissipação, e capacidade de ser armazenado e transportado utilizando energia renovável, como a solar, ao longo de grandes distâncias, por meio do transporte marítimo, por exemplo (FONSECA, 2022; DE ABREU *et al.*, 2024).

Entretanto, é no setor industrial que a demanda por hidrogênio tem sido mais pronunciada, conforme apresentado na Figura 1. Principalmente nos segmentos de refino de petróleo e produção de fertilizantes, o hidrogênio desempenha um papel fundamental.

Thus, hydrogen stands out as a crucial solution due to a series of advantages, such as its abundance in nature, ease of dissipation, and ability to be stored and transported using renewable energy, such as solar energy over long distances, through maritime transportation, for example (FONSECA, 2022; DE ABREU *et al.*, 2024).

However, it is in the industrial sector that the hydrogen demand has been most pronounced, as shown in Figure 1. Mainly in the oil refining and fertilizer production segments, hydrogen plays a key role.

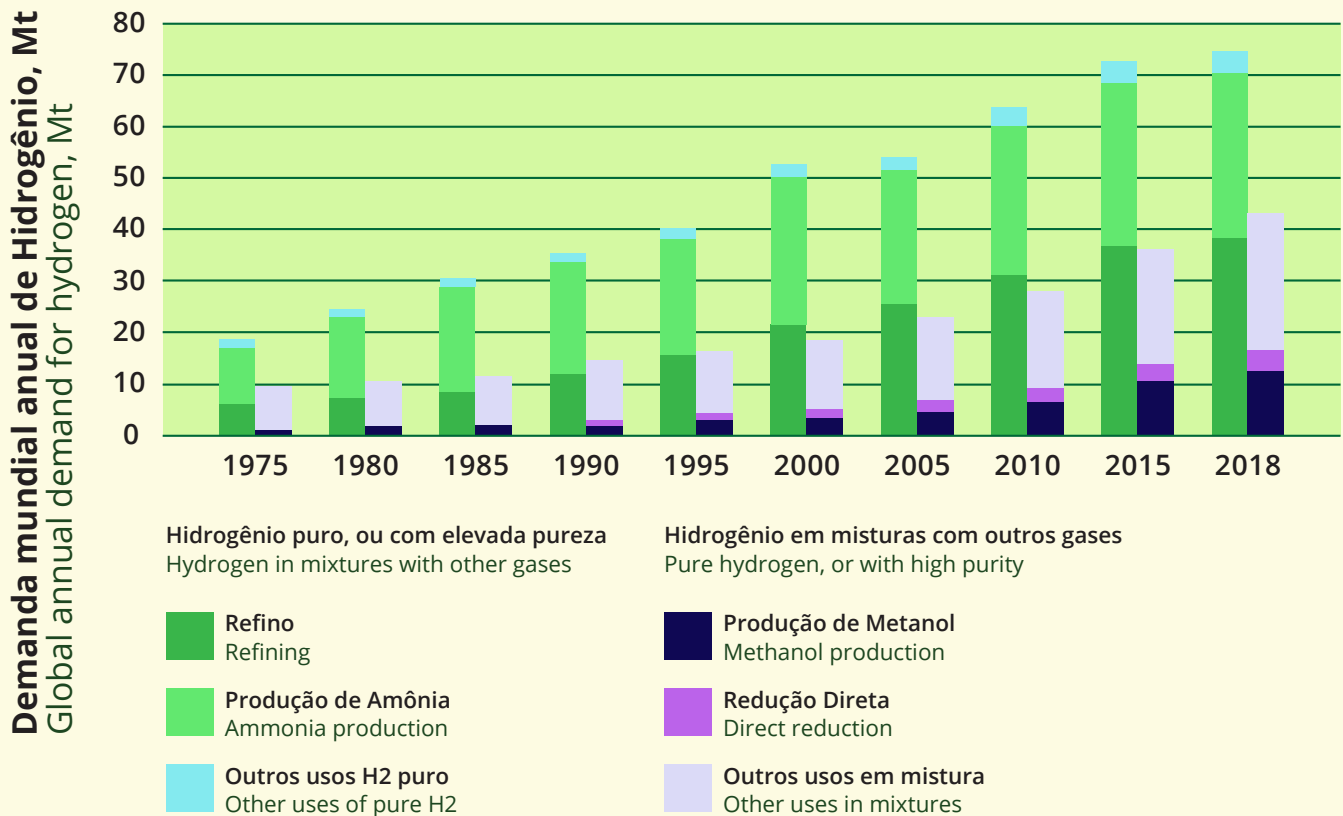


Figura 1. Demanda de hidrogênio no Mundo. Fonte: IEA (2019).  
 Figure 1. World hydrogen demand. Source: IEA (2019).

No refino, o hidrogênio é utilizado em processos de hidrotratamento para remover impurezas e melhorar a qualidade dos produtos finais, como gasolina e diesel. Já na produção de fertilizantes, o hidrogênio é um componente essencial na fabricação de amônia, um dos principais componentes dos fertilizantes nitrogenados. Essa dependência do setor industrial pelo hidrogênio é um reflexo da sua eficácia e versatilidade como agente redutor e fonte de energia em uma variedade de processos químicos (EICKE & DE BLASIO, 2022).

In the oil refining industry, hydrogen is used in the hydrotreatment processes to remove impurities and improve the quality of end products such as gasoline and diesel. In fertilizer production, hydrogen is an essential component in the manufacture of ammonia, one of the main components of nitrogen fertilizers. The dependence of the industrial sector on hydrogen is a reflection of its effectiveness and versatility as a reducing agent and energy source in a variety of chemical processes (EICKE & DE BLASIO, 2022).



# O CICLO PRODUTIVO DO H2V

## THE PRODUCTION CYCLE OF GREEN HYDROGEN

O processo predominante nos próximos anos deverá ser o da eletrólise da água.

The predominant process in the coming years is likely to be water electrolysis.

# 2

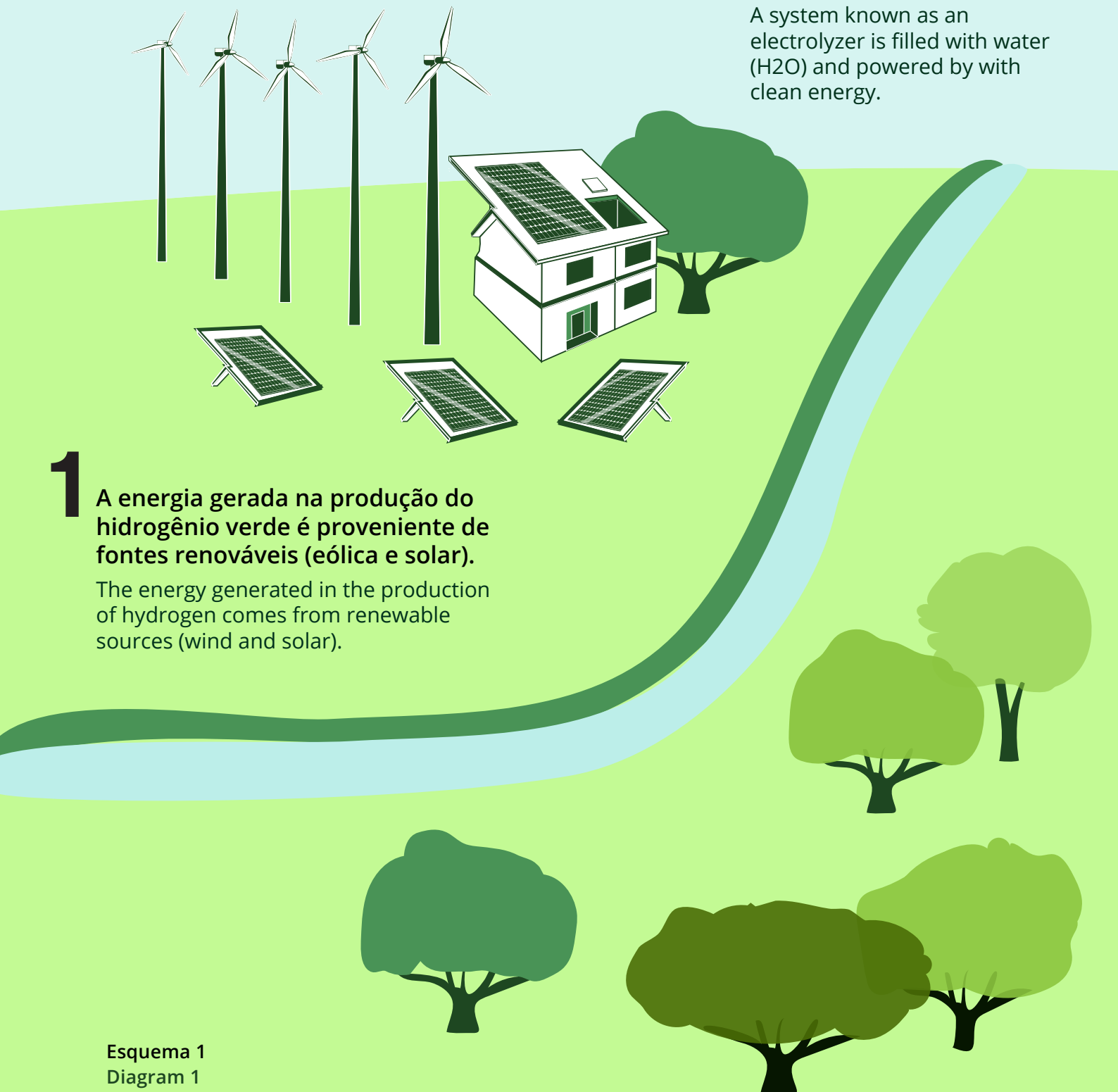
Um sistema conhecido como eletrolisador é abastecido com água (H<sub>2</sub>O) e alimentado com energia limpa.

A system known as an electrolyzer is filled with water (H<sub>2</sub>O) and powered by with clean energy.

# 1

A energia gerada na produção do hidrogênio verde é proveniente de fontes renováveis (eólica e solar).

The energy generated in the production of hydrogen comes from renewable sources (wind and solar).

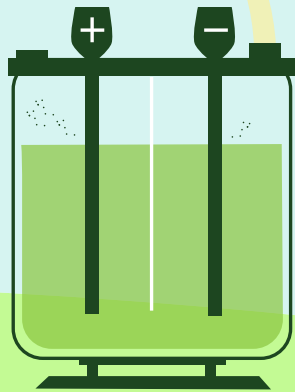


Esquema 1  
Diagram 1

# 3

O processo de eletrólise provoca a separação das moléculas de hidrogênio (H) e oxigênio (O) contidas na água.

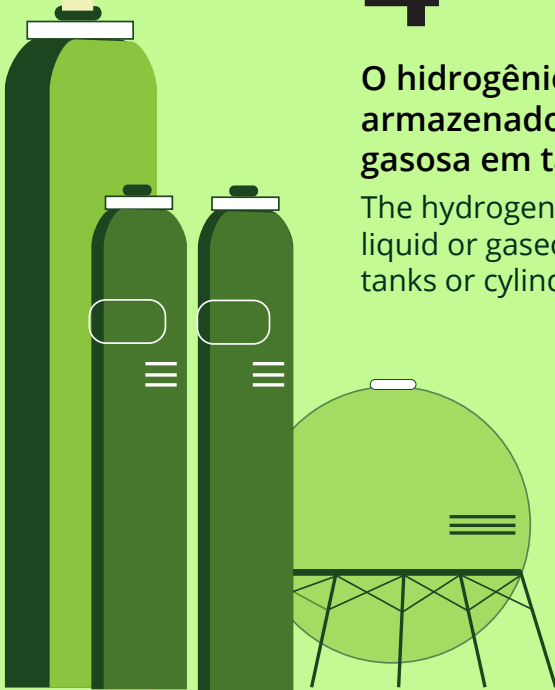
The electrolysis process causes the separation of molecules of hydrogen (H) and oxygen (O) molecules contained in water.



# 4

O hidrogênio gerado é armazenado na forma líquida ou gasosa em tanques ou cilindros.

The hydrogen generated is stored in liquid or gaseous form in tanks or cylinders.



# 5

O combustível é transportado para uso doméstico ou industrial. Quase todo o processo é isento de emissões de carbono.

The fuel is transported for domestic or industrial use. Almost the entire process is carbon emissions.



Esquema 2  
Diagram 2



O processo de produção de hidrogênio pode ser dividido principalmente em três grandes rotas: eletrolítica, térmica e fotolítica, conforme exemplos apresentados na Tabela 2.

The hydrogen production process can be divided into three main routes: electrolytic, thermal and photolytic, as shown in Table 2.

## Tabela 2. Exemplos de rotas de produção de hidrogênio.

Table 2. Examples of hydrogen production routes.

<b>ROTA</b> ROUTE	<b>PROCESSO</b> PROCESS
<b>Rota Eletrolítica</b> Electrolytic Route	<p><b>Eletrólise da Água:</b> Este processo envolve a passagem de corrente elétrica através da água, dividindo-a em hidrogênio e oxigênio. A eletrólise pode ser alimentada por eletricidade de fontes renováveis, como energia solar ou eólica, resultando em hidrogênio verde (OLIVEIRA, BESWICK &amp; YAN, 2021; KUMAR &amp; LIM, 2022).</p> <p>Water electrolysis: This process involves the passage of an electric current through water, splitting it into hydrogen and oxygen. Electrolysis can be powered by electricity from renewable sources, such as solar or wind energy, resulting in green hydrogen (OLIVEIRA, BESWICK &amp; YAN, 2021; KUMAR &amp; LIM, 2022).</p>
<b>Rota Térmica</b> Thermal Route	<p><b>Reforma a Vapor de Gás Natural:</b> Este é o método mais comum para a produção em larga escala. No processo de reforma a vapor, o metano (principal componente do gás natural) reage com vapor d'água em altas temperaturas e pressões, produzindo hidrogênio e dióxido de carbono como subprodutos. É eficiente, mas gera emissões de CO<sub>2</sub>, a menos que seja implementada a captura e armazenamento de carbono (MARTÍNEZ <i>et al.</i>, 2013; ANZELMO, WILCOX &amp; LIGUORI, 2018).</p>

ROTA / ROUTE	PROCESSO / PROCESS
	<p>Steam Reforming of Natural Gas: This is the most common method for large-scale production. In the steam reforming process, methane (the main component of natural gas) reacts with water vapor at high temperatures and pressures, producing hydrogen and carbon dioxide as by-products. This process is efficient, but generates CO<sub>2</sub> emissions, unless carbon capture and storage is implemented (MARTÍNEZ <i>et al.</i>, 2013; ANZELMO, WILCOX &amp; LIGUORI, 2018).</p>
	<p><b>Gaseificação de Biomassa:</b> Este método envolve a conversão de biomassa em gás de síntese, que é uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (CO). O hidrogênio pode ser separado e purificado do gás de síntese (CORMOS, 2023; SQUADRITO, MAGGIO &amp; NICITA, 2023).</p> <p>Biomass gasification: This method involves converting biomass into synthesis gas, which is a mixture of hydrogen and carbon monoxide. Hydrogen can be separated and purified from the synthesis gas (CORMOS, 2023; SQUADRITO, MAGGIO &amp; NICITA, 2023).</p>
	<p><b>Gaseificação de Carvão:</b> envolve a secagem e trituração do carvão, seguido pela sua alimentação em um reator de gaseificação. No reator, o carvão é aquecido a altas temperaturas na presença de um agente gaseificante (vapor, oxigênio ou ar). O carvão sofre pirólise e reações químicas, produzindo um gás de síntese rico em CO e hidrogênio, que é então separado e purificado para uso (SEYITOGLU, DINCER &amp; KILICARSLAN, 2017).</p> <p>Coal Gasification: this process involves drying and crushing coal, followed by feeding it into a gasification reactor. In the reactor, coal is heated at high temperatures in the presence of a gasifying agent (steam, oxygen or air). Coal undergoes pyrolysis and chemical reactions, producing a synthesis gas, rich in CO and hydrogen, which is then separated and purified for later use (SEYITOGLU, DINCER &amp; KILICARSLAN, 2017).</p>

ROTA / ROUTE	PROCESSO / PROCESS
<p><b>Rota Fotolítica</b> Photolytic Route</p>	<p><b>Fotólise da Água:</b> Neste processo experimental, a luz solar é usada para decompor a água em hidrogênio e oxigênio. Este processo envolve o uso de fotocatalisadores, geralmente semicondutores, que absorvem a luz solar e geram pares de elétrons e lacunas de carga. Esses elétrons e lacunas podem então conduzir reações químicas, facilitando a divisão da água em seus componentes. A fotólise direta da água ainda está em estágios iniciais de desenvolvimento (DOMENIGHINI <i>et al.</i>, 2024).</p> <p><b>Water Photolysis:</b> In this experimental process, sunlight is used to break down water into hydrogen and oxygen. This process involves the use of photocatalysts, usually semiconductors, which absorb sunlight and generate pairs of electrons and charge gaps. These electrons and gaps can conduct chemical reactions, facilitating the splitting of water into its components. Direct water photolysis is still in the early stages of development (DOMENIGHINI <i>et al.</i>, 2024).</p>

Quanto às cores, o hidrogênio pode ser classificado em diferentes tipos, de acordo com a forma como é produzido e sua pegada de carbono associada, conforme destacado na Tabela 3.

In terms of color, hydrogen can be classified into different types according to the way it is produced and the associated carbon emissions, as shown in Table 3.

### Tabela 3. Divisão do hidrogênio por cores.

Table 3. Division of hydrogen by color.

<b>COR</b> COLOR	<b>DESCRIÇÃO</b> DESCRIPTION
<p><b>Hidrogênio Preto</b> Black Hydrogen</p>	<p>Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem captura, utilização e armazenamento de carbono - CCUS.</p> <p>Produced by gasification of mineral coal (anthracite), without carbon capture, utilization, and storage (CCUS).</p>

<b>COR / COLOR</b>	<b>DESCRIÇÃO / DESCRIPTION</b>
<b>Hidrogênio Marrom</b> Brown Hydrogen	<b>Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS.</b> Produced by the gasification of mineral coal (hard coal), without CCUS.
<b>Hidrogênio Cinza</b> Gray Hydrogen	<b>Produzido do gás natural, sem CCUS.</b> Produced from natural gas, without CCUS.
<b>Hidrogênio Azul</b> Blue Hydrogen	<b>Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis), com CCUS.</b> Produced from natural gas (also from other fossil fuels), with CCUS.
<b>Hidrogênio Verde</b> Green Hydrogen	<b>Produzido a partir de fontes renováveis (solar ou eólica) via eletrólise da água.</b> Produced from renewable sources (solar or wind) via water electrolysis.
<b>Hidrogênio Branco</b> White Hydrogen	<b>Hidrogênio natural ou geológico.</b> Natural or geological hydrogen.
<b>Hidrogênio Turquesa</b> Turquoise Hydrogen	<b>Produzido por craqueamento térmico metano, sem gerar CO2.</b> Produced by thermal methane cracking, without generating CO2.
<b>Hidrogênio Musgo</b> Moss Hydrogen	<b>Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, por meio de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica.</b> Produced from biomass or biofuels, with or without CCUS, through catalytic reforming, gasification or anaerobic biodigestion.
<b>Hidrogênio Rosa</b> Pink Hydrogen	<b>Produzido com fonte de energia nuclear.</b> Produced from nuclear energy sources

O setor do hidrogênio, especialmente o hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), está passando por um impulso significativo devido aos recentes anúncios de governos que delinearam planos ambiciosos para sua incorporação na transição energética (ZHOU *et al.*, 2022). O H<sub>2</sub>V emerge como elemento crucial no panorama energético global devido à sua alta densidade energética e versatilidade, tornando-se fundamental para setores em busca da transição para um mundo com baixas emissões de carbono, alinhado com os objetivos do Acordo de Paris de alcançar a neutralidade de carbono até 2050 (BIANCO & BLANCO, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b).

O H<sub>2</sub>V possui um imenso potencial para impulsionar o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (MNEIMNEH *et al.*, 2023). Ao ser implementado em diversos setores, desde transporte até indústria, o hidrogênio verde contribui significativamente para a redução das emissões de GEE, alinhando-se com o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Além disso, ao criar oportunidades de emprego e promover o crescimento econômico em comunidades locais, o H<sub>2</sub>V aborda questões relacionadas à pobreza (ODS 1) e ao trabalho decente e crescimento econômico (ODS 8). Sua utilização também pode melhorar a qualidade do ar e da água, impactando positivamente a saúde das populações (ODS 3 e ODS 6). Ademais, ao promover a inovação e a colaboração global, o H<sub>2</sub>V contribui para o desenvolvimento de infraestruturas resilientes e sustentáveis (ODS 9) e para parcerias em prol dos objetivos globais (ODS 17).

O H<sub>2</sub>V é uma forma de hidrogênio produzido a partir de fontes de energia renovável

The hydrogen sector, especially green hydrogen (GH<sub>2</sub>), is experiencing a significant boost due to recent announcements by governments outlining ambitious plans for its incorporation into the energy transition (ZHOU *et al.*, 2022). GH<sub>2</sub> is emerging as a crucial element in the global energy panorama due to its high energy density and versatility, making it key for sectors seeking the transition to a world with low carbon emissions, in line with the Paris Agreement's goals of achieving carbon neutrality by 2050 (BIANCO & BLANCO, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b).

GH<sub>2</sub> has immense potential to boost the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) (MNEIMNEH *et al.*, 2023). When implemented in various sectors, from transportation to industry, green hydrogen significantly contributes to reducing GHG emissions, aligning with SDG 13 (Action Against Global Climate Change).

In addition, by creating job opportunities and promoting economic growth in local communities, GH<sub>2</sub> addresses issues related to poverty (SDG 1), decent work and economic growth (SDG 8). Its use can also improve air and water quality, positively impacting the health of populations (SDG 3 and SDG 6). Furthermore, by promoting innovation and global collaboration, GH<sub>2</sub> contributes to the development of resilient and sustainable infrastructures (SDG 9) and to partnerships in support of global goals (SDG 17).

(energia solar ou eólica) por meio de um processo de eletrólise da água, de acordo com o apresentado na Figura 2.

GH<sub>2</sub> is a form of hydrogen produced from renewable energy sources (solar or wind power) through a water electrolysis process, as shown in Figure 2.

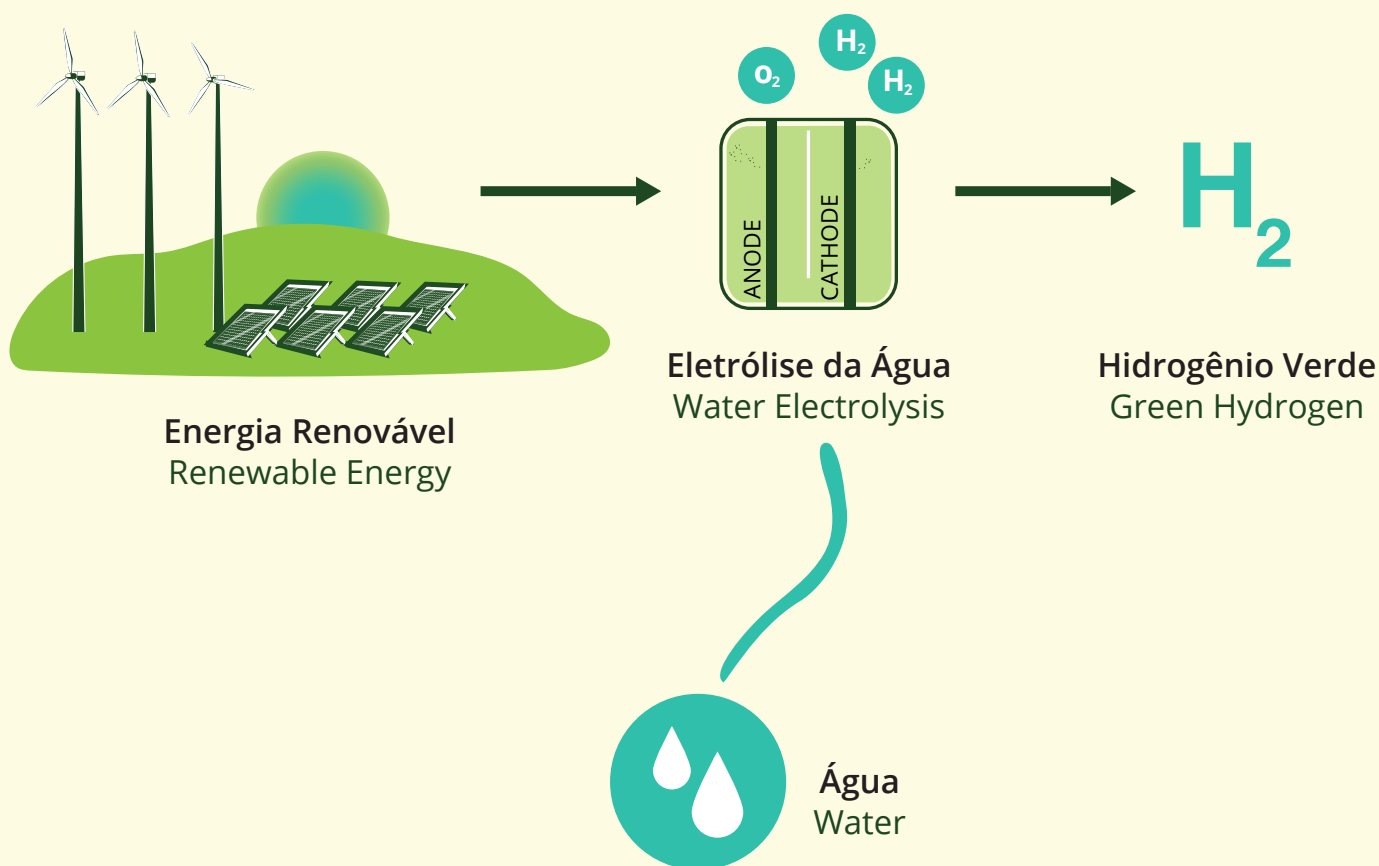


Figura 2. Processo de produção de hidrogênio verde.  
Figure 2. Green hydrogen production process.

Sua versatilidade e potencial são incomparáveis, tornando-o um recurso indispensável em uma variedade de setores, conforme apresentado na Figura 3. Diversas iniciativas foram e têm sido lançadas com o intuito de promover, especialmente, o H<sub>2</sub>V, visando alcançar dois objetivos principais: impulsionar a recuperação econômica e acelerar a transição energética em setores de

Its versatility and potential are unparalleled, making it an indispensable resource in a variety of sectors, as shown in Figure 3. Several initiatives have been proposed to promote GH<sub>2</sub> with the aim of achieving two main objectives: boosting economic recovery and accelerating the energy transition in market sectors that face significant challenges in reducing carbon emissions, such as heavy

mercado que enfrentam desafios significativos na redução das emissões de carbono, tais como transportes pesados, aviação, navegação marítima, indústria siderúrgica, produção de fertilizantes, entre outros.

transport, aviation, maritime shipping, steel industry, fertilizer production, among others.

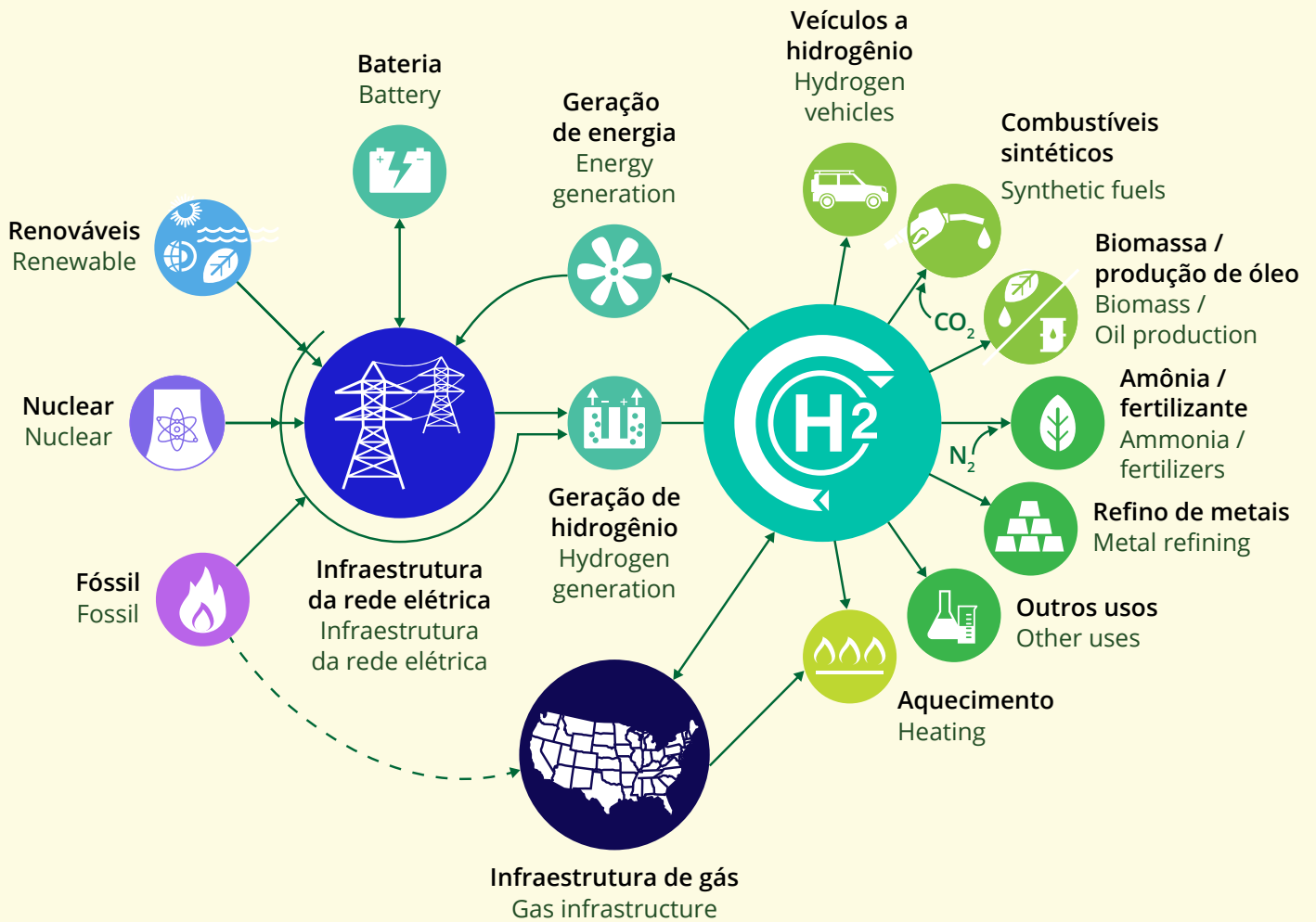


Figura 3. Aplicações do H<sub>2</sub>V. Fonte: Adaptado de Berkeley Lab (2018).  
 Figure 3. GH<sub>2</sub> applications. Source: Adapted from Berkeley Lab (2018).

Nos transportes, a aplicação do H<sub>2</sub>V na mobilidade representa um avanço significativo rumo à descarbonização deste setor. Pode ser utilizado como uma fonte de energia limpa para veículos de transporte de carga e de passageiros (leves e pesados), sendo uma alternativa aos

In transport, the application of GH<sub>2</sub> in mobility represents a significant step towards the decarbonization of this sector. It can be used as a clean energy source for freight and passenger vehicles (light and heavy), as alternative to fossil fuels, which is essential for reducing air



combustíveis fósseis, o que é essencial para reduzir a poluição do ar e combater a mudança do clima (DE ABREU *et al.*, 2024). Sua capacidade de ser utilizado diretamente como combustível em veículos, seja em células de combustível ou em motores de combustão interna, possibilita a redução das emissões de carbono, contribuindo para mitigar os impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde pública (OLIVEIRA, BESWICK & YAN, 2021). Além disso, a rápida recarga e a autonomia comparável aos combustíveis fósseis ou veículos elétricos tornam o H<sub>2</sub>V uma alternativa viável para uma transição energética mais sustentável no setor de transportes.

No que diz respeito à geração de eletricidade, o H<sub>2</sub>V pode se destacar como um vetor energético promissor, especialmente em sistemas de energia baseados em fontes intermitentes. A capacidade de armazenamento do hidrogênio, conforme já discutido anteriormente, permite a sua utilização como uma forma de armazenar energia excedente, que pode ser posteriormente convertida de volta em eletricidade por meio de células de combustível ou turbinas a gás, garantindo assim a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico e ajudando a superar os desafios da intermitência das energias renováveis, como solar e eólica.

O H<sub>2</sub>V desempenha ainda um papel fundamental na indústria química, sendo uma matéria-prima essencial para a produção de uma variedade de produtos, incluindo amônia, metanol e diversos compostos orgânicos. A substituição do hidrogênio obtido a partir de fontes fósseis pelo H<sub>2</sub>V não só reduz as emissões de carbono associadas a esses processos,

pollution and climate change (DE ABREU *et al.*, 2024). Its ability to be used directly as fuel in vehicles, whether in fuel cells or internal combustion engines, allows reducing carbon emissions, helping to mitigate negative impacts on the environment and public health (OLIVEIRA, BESWICK & YAN, 2021). In addition, the rapid recharge and autonomy comparable to fossil fuels or electric vehicles make GH<sub>2</sub> a viable alternative for a more sustainable energy transition in the transportation sector.

Regarding electricity generation, GH<sub>2</sub> stands out as a promising energy vector, especially in energy systems based on intermittent sources. The hydrogen storage capacity, as previously discussed, allows it to be used as a way to store surplus energy, which can then be converted back into electricity via fuel cells or gas turbines, thus ensuring the stability and reliability of the electricity system and helping to overcome the challenges of intermittency in renewable energies such as solar and wind.

GH<sub>2</sub> also plays a key role in the chemical industry, being essential raw material for the production of a variety of products, including ammonia, methanol and various organic compounds. Replacing hydrogen obtained from fossil sources with GH<sub>2</sub> not only reduces carbon emissions associated with these processes, but also promotes sustainability and energy security by diversifying raw material sources.

GH<sub>2</sub> also presents itself as a promising solution for sectors that are difficult to electrify, where conventional alternatives are limited. Aviation, shipping, iron and steel production, the chemical industry and high-temperature heat processes for industry are examples of



mas também promove a sustentabilidade e a segurança energética ao diversificar as fontes de matéria-prima.

O H<sub>2</sub>V também se apresenta como uma solução promissora para setores de difícil eletrificação, onde as alternativas convencionais são limitadas. A aviação, a navegação, a produção de ferro e aço, a indústria química e os processos de calor de alta temperatura para a indústria são exemplos de setores que enfrentam desafios significativos na redução de suas emissões de carbono. O uso do H<sub>2</sub>V nessas áreas oferece uma oportunidade única de descarbonização, proporcionando uma transição suave para tecnologias mais limpas e sustentáveis.

sectors that face significant challenges in reducing carbon emissions. The use of GH<sub>2</sub> in these areas offers a unique opportunity for decarbonization, providing a smooth transition into cleaner and more sustainable technologies.



# 2

**PROJETO H2 VERDE**  
GREEN H2 PROJECT

---

The logo features the chemical formula H<sub>2</sub> in a bold, black, serif font. The 'H' is composed of two thick vertical bars connected by a horizontal bar. The subscript '2' is a smaller, outlined version of the same serif font. The logo is centered within a light green circular background. The entire page is decorated with abstract green shapes and thin, overlapping teal lines that create a sense of movement and depth.

**H<sub>2</sub>**

O Projeto H2 Verde envolve a produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, usando energia fotovoltaica (painéis fotovoltaicos instalados no estacionamento do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ), e o seu uso em processos industriais, em bicicletas movidas a H<sub>2</sub>, e em pilhas a combustível de óxido sólido. A iniciativa contou com recursos da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) e com a participação de pesquisadores de quatro laboratórios da COPPE/UFRJ: Laboratório de Transporte Sustentável (LabTS), Laboratório de Eletrônica de Potência e Média Tensão (LEMT), Núcleo de Catálise (Nucat), e Laboratório de Hidrogênio (LabH2). O escopo do projeto encontra-se detalhado na Figura 4.

The Green H2 Project involves the production of hydrogen from water electrolysis, using photovoltaic energy (photovoltaic panels installed in the parking lot of the Technology Center, Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ), and its use in industrial processes, in H<sub>2</sub>-powered bicycles, and in solid oxide fuel cells. The initiative was funded by the German-Brazilian Cooperation for Sustainable Development through the *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) and with the participation of researchers from four COPPE/UFRJ laboratories: the Sustainable Transport Laboratory (LabTS), the Power Electronics and Medium Voltage Laboratory (LEMT), the Catalysis Center (Nucat), and the Hydrogen Laboratory (LabH2). The scope of the project is detailed in Figure 4.

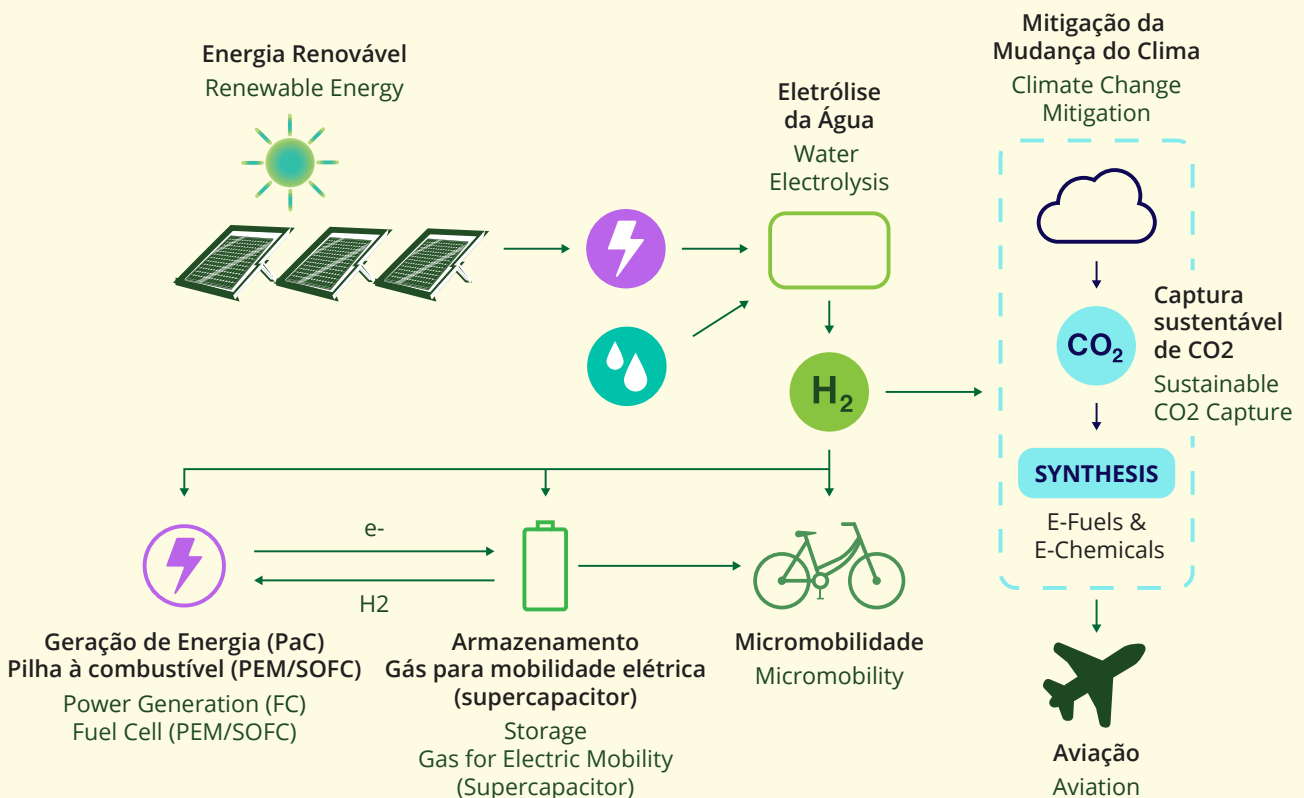


Figura 4. Escopo do Projeto H2 Verde.  
Figure 4. Scope of the Green H2 Project.

A cooperação engloba uma ampla gama de objetivos, abordando desde a geração estacionária de energia elétrica até o armazenamento de energia, tanto na forma de gás quanto de eletricidade, por meio de tecnologias como células ou pilhas a combustível de óxido sólido. Além disso, inclui a produção de e-fuel (SAF, sigla para *Sustainable Aviation Fuels*), utilizando hidrogênio verde como matéria-prima renovável e CO<sub>2</sub> capturado, visando reduzir as emissões na aviação.

Outro aspecto importante é o uso do H<sub>2</sub>V na micro mobilidade urbana, com a introdução de bicicletas elétricas movidas a H<sub>2</sub>V, proporcionando uma alternativa sustentável e limpa para deslocamentos urbanos. Essa diversidade de objetivos reflete o compromisso abrangente do projeto com a inovação sustentável em diversos setores, buscando promover uma transição energética mais eficiente e ambientalmente consciente.

Os objetivos gerais do Projeto H2 Verde incluíram:

- Estabelecer infraestrutura física e recursos humanos para a produção de H<sub>2</sub>V na UFRJ: Isso envolveu a criação de laboratórios, instalações e equipamentos necessários para realizar pesquisas e desenvolver tecnologias relacionadas à produção, armazenamento e utilização de H<sub>2</sub>V. Além disso, o projeto visava capacitar recursos humanos, incluindo pesquisadores, professores e estudantes, para se envolverem em atividades relacionadas ao H<sub>2</sub>V e promover a disseminação do conhecimento nessa área.
- Estudar o uso de H<sub>2</sub>V como vetor energético na UFRJ: O projeto teve como objetivo realizar estudos e pesquisas

The cooperation covers a wide range of objectives, from stationary power generation to energy storage, both in the form of gas and electricity, through technologies such as cells or solid oxide fuel cells. It also includes e-fuel production (SAF, the acronym for Sustainable Aviation Fuels), using green hydrogen as renewable raw material and captured CO<sub>2</sub>, with the aim of reducing aviation emissions.

Another important aspect is the use of GH<sub>2</sub> in urban micro-mobility, with the introduction of GH<sub>2</sub>-powered electric bicycles, providing sustainable and clean alternative for urban commuting. This diversity of objectives reflects the project's comprehensive commitment to sustainable innovation in various sectors, seeking to promote a more efficient and environmentally conscious energy transition.

The general objectives of the Green H2 Project include:

- Establishing physical infrastructure and human resources for GH<sub>2</sub> production at UFRJ: This involved setting up laboratories, facilities and equipment needed to carry out research and develop technologies related to GH<sub>2</sub> production, storage and use. In addition, the project aimed to train human resources, including researchers, teachers and students to be involved in GH<sub>2</sub>-related activities and to promote the dissemination of knowledge in this area.
- Studying the use of GH<sub>2</sub> as energy vector at UFRJ: The project aimed to carry out studies and research on the applications and benefits of green hydrogen as a clean and renewable energy source. This included investigating

sobre as aplicações e benefícios do hidrogênio verde como uma fonte de energia limpa e renovável. Isso incluía investigar seu potencial de uso em diferentes setores, como transporte, indústria, geração de energia e armazenamento de energia, e avaliar seu impacto na redução das emissões de carbono e na transição para uma economia de baixo carbono.

- Fortalecer a cooperação técnica e científica entre a UFSC e a UFRJ: O projeto visou promover a colaboração e troca de conhecimento entre duas importantes instituições de ensino e pesquisa no Brasil, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a UFRJ, no campo do H<sub>2</sub>V. Isso incluía o compartilhamento de recursos, experiências e expertise, bem como o desenvolvimento de projetos conjuntos de pesquisa e iniciativas de inovação tecnológica.
- Estabelecer cooperação técnica e científica entre a UFSC, a UFRJ e institutos de pesquisa na Alemanha: O projeto buscou ampliar ainda mais a colaboração internacional, estabelecendo parcerias com institutos de pesquisa na Alemanha, um país reconhecido por seu avançado desenvolvimento em tecnologias de hidrogênio e energia renovável. Isso permitiria o acesso a conhecimentos e recursos adicionais, bem como a oportunidade de participar de projetos de pesquisa internacionais e iniciativas de cooperação técnica e científica.

A central de hidrogênio, com suas instalações para produção, armazenamento e geração de energia, foi meticulosamente desenvolvida em conformidade com a visão e concepção detalhada delineada

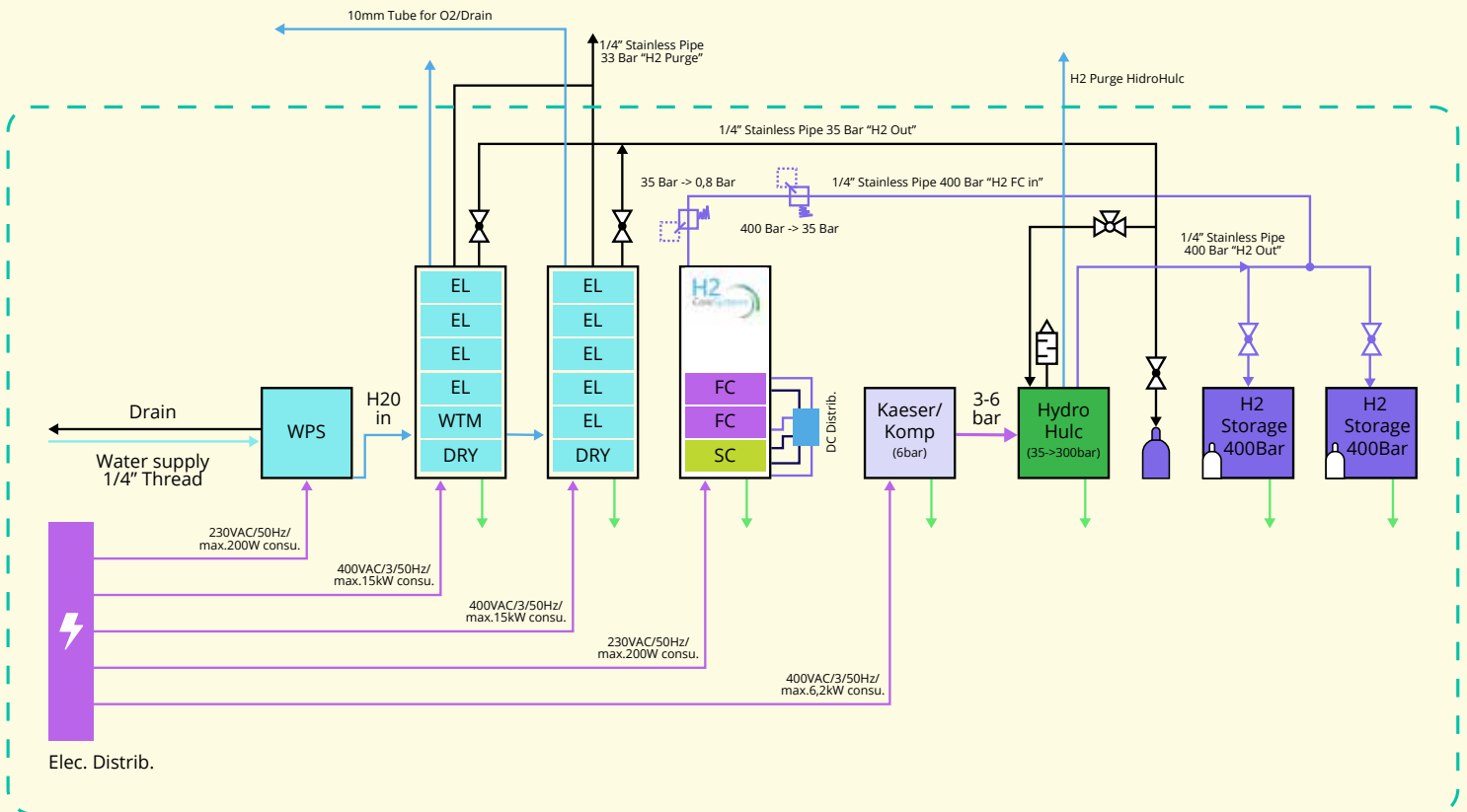
its potential for use in different sectors, such as transportation, industry, power generation and energy storage, and assessing its impact on reducing carbon emissions and the transition to low-carbon economy.

- Strengthening technical and scientific cooperation between UFSC and UFRJ: The project aimed to promote collaboration and knowledge exchange between two leading teaching and research institutions in Brazil, the Federal University of Santa Catarina (UFSC) and UFRJ, in the field of GH<sub>2</sub> production. This includes the sharing of resources, experiences and expertise, as well as the development of joint research projects and technological innovation initiatives.
- Establishing technical and scientific cooperation between UFSC, UFRJ and research institutes in Germany: The project sought to further expand international collaboration by establishing partnerships with research institutes in Germany, a country recognized for its advanced development in hydrogen and renewable energy technologies. This would allow access to additional knowledge and resources, as well as the opportunity to participate in international research projects and technical and scientific cooperation initiatives.

The hydrogen plant, with its facilities for energy production, storage and generation, has been meticulously developed in accordance with the vision and detailed design outlined by the H2CoreSystems Project, as illustrated in Figure 5. This project represents a significant milestone in the search for innovative and

peelo Projeto *H2CoreSystems*, conforme ilustrado na Figura 5. Este projeto representa um marco significativo na busca por soluções inovadoras e sustentáveis para a transição energética, uma vez que integra diversas etapas cruciais da cadeia de valor do hidrogênio em uma única infraestrutura avançada.

sustainable solutions for the energy transition, as it integrates several crucial stages of the hydrogen value chain into a single advanced infrastructure.



**Figura 5.** Disposição do sistema de produção de hidrogênio verde.  
**Figure 5.** Layout of the green hydrogen production system.

# 3

## FUTURO DO HIDROGÊNIO VERDE NA TRANSFORMAÇÃO SUSTENTÁVEL

THE FUTURE OF GREEN HYDROGEN  
IN THE SUSTAINABLE TRANSFORMATION

---





Para assegurar o abastecimento energético e enfrentar os desafios da mudança do clima, é imperativo iniciar uma nova fase de transformação energética. O hidrogênio, principalmente o H<sub>2</sub>V, surge como um ator fundamental nesse processo, tanto em países desenvolvidos, quanto em países em desenvolvimento, dada sua alta densidade energética e suas características como fonte de energia limpa e de baixo carbono (STÖCKL, SCHILL & ZERRAHN, 2021; PANCHENKO *et al.*, 2023).

O H<sub>2</sub>V representa um possível vetor energético que não só impulsiona o avanço e a ampla adoção das fontes renováveis de energia, mas também funciona como uma ferramenta crucial para interligar, complementar e otimizar de forma coordenada diversas redes energéticas (KARAYEL, JAVANI & DINCER, 2022). É um elemento chave para a transição energética, permitindo uma integração mais eficiente e flexível de diferentes fontes de energia, incluindo solar, eólica e outras renováveis. Sua versatilidade como meio de armazenamento e transporte de energia o torna um componente fundamental na construção de um sistema energético mais resiliente, sustentável e interconectado.

Constatando essa tendência, a Figura 6, desenvolvida com dados projetados pela *International Energy Agency* (IEA), evidencia um crescimento substancial na demanda global por hidrogênio puro ao longo das próximas décadas. Este aumento na procura é especialmente perceptível em diversos setores-chave, tais como a produção de amônia, a fabricação de combustíveis sintéticos, o transporte e o setor energético. A expansão dessa demanda

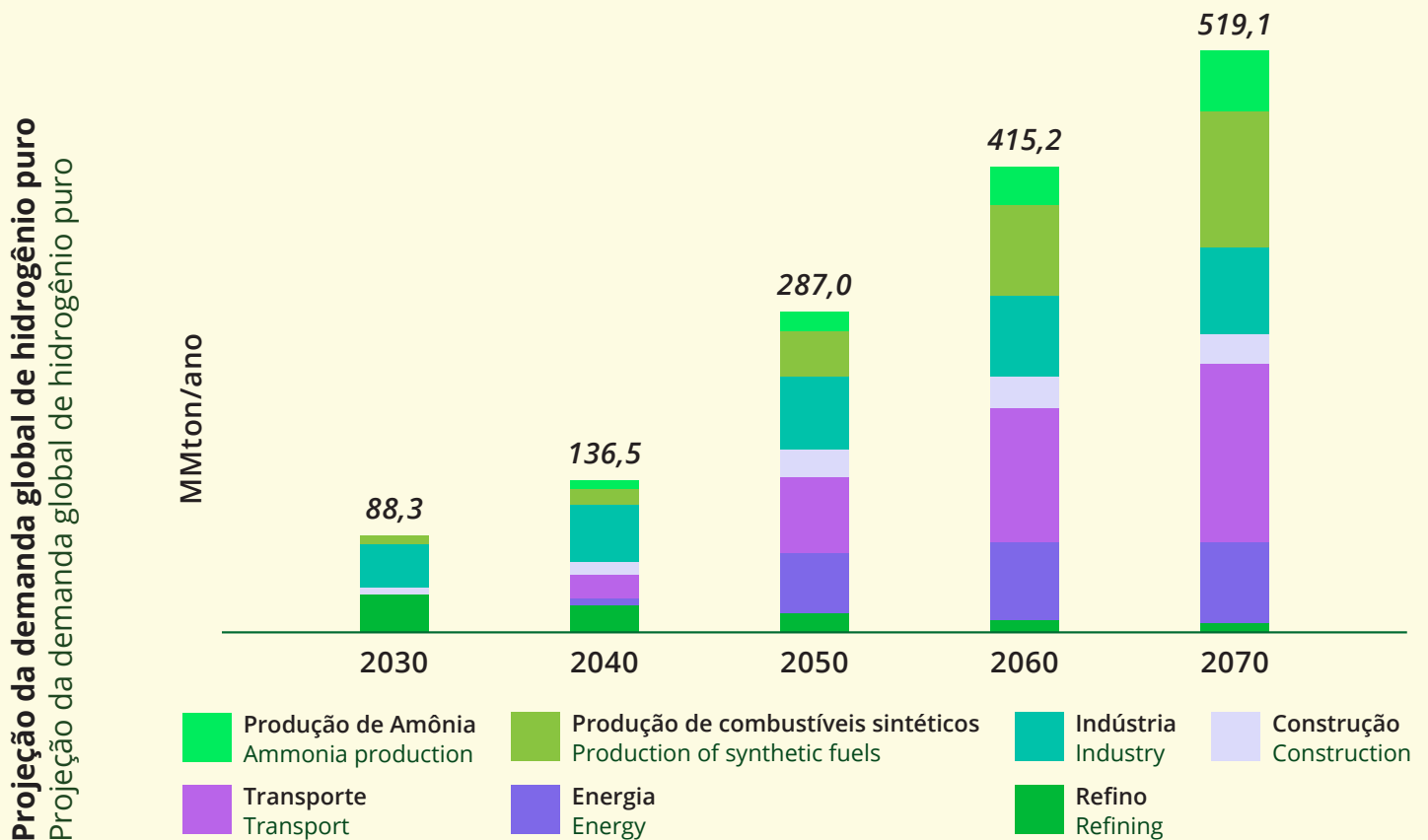
To ensure energy supply and face the challenges of climate change, it is imperative to begin on a new phase of energy transformation. Hydrogen, especially GH<sub>2</sub>, has emerged as a key player in this process, both in developed and developing countries, given its high energy density and characteristics as a clean, low-carbon energy source (STÖCKL, SCHILL & ZERRAHN, 2021; PANCHENKO *et al.*, 2023).

GH<sub>2</sub> represents a possible energy vector that not only boosts the advancement and widespread adoption of renewable energy sources, but also functions as a crucial tool for interconnecting, complementing and optimizing various energy networks in a coordinated manner (KARAYEL, JAVANI & DINCER, 2022). It is a key element in the energy transition, enabling more efficient and flexible integration of different energy sources, including solar, wind and other renewable sources. Its versatility as a means of storing and transporting energy makes it a fundamental component in building a more resilient, sustainable and interconnected energy system.

In line with this trend, Figure 6, developed with data projected by the International Energy Agency (IEA), shows a substantial growth in global demand for pure hydrogen over the next few decades. This increase is especially noticeable in several key sectors, such as ammonia production, manufacture of synthetic fuels, transportation and the energy sector. The expansion of this demand is boosted by a number of factors, including the transition into cleaner energy sources and the need to reduce greenhouse gas emissions in various sectors.



é impulsionada por uma série de fatores, incluindo a transição para fontes de energia mais limpas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em várias indústrias.



**Figura 6.** Figura 6. Projeção da demanda global de hidrogênio puro  
 Fonte: Adaptado de Gas Energy (2021) com dados de IEA (2020).

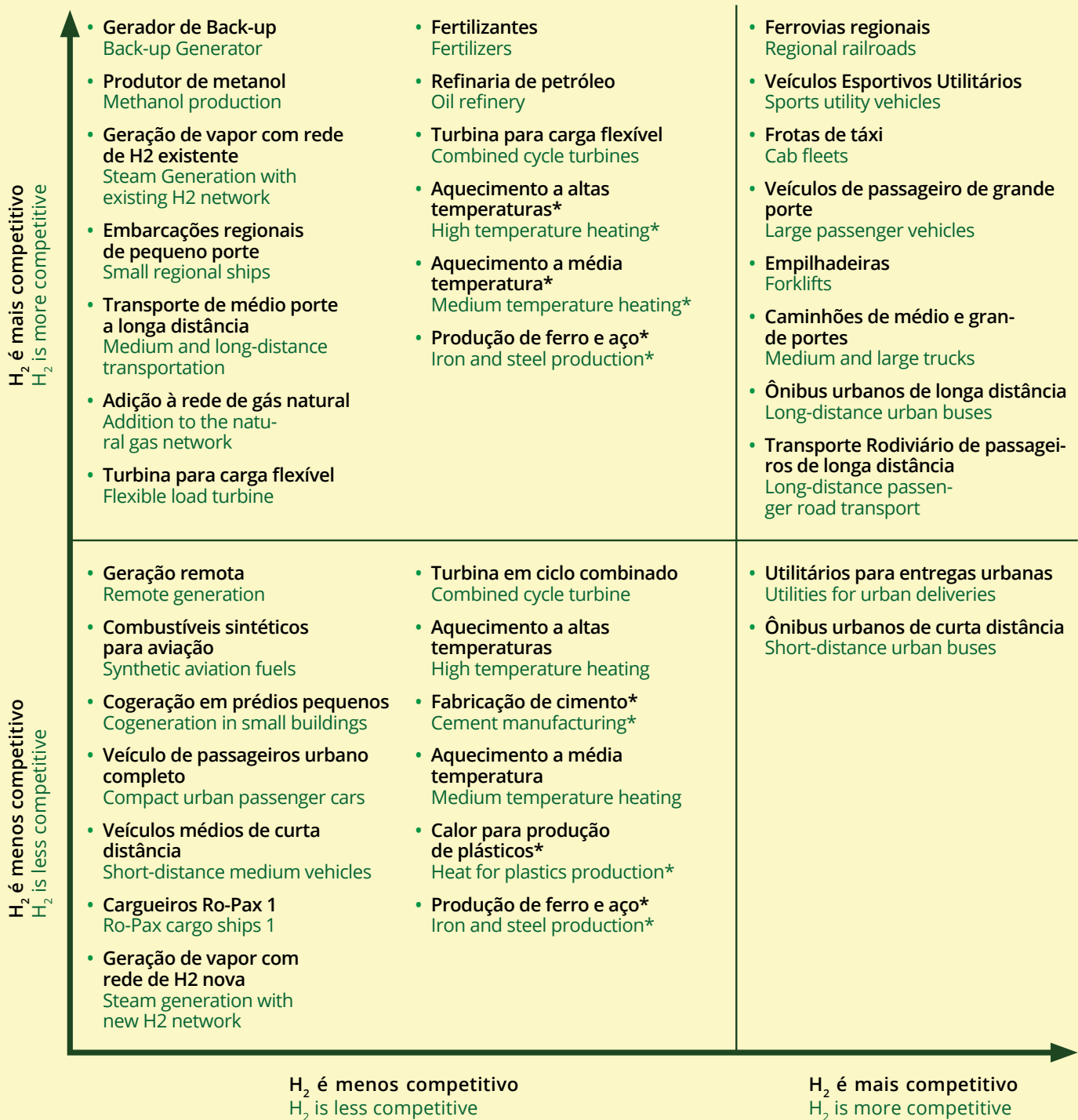
**Figure 6.** Projected global demand for pure hydrogen.  
 Source: Adapted from Gas Energy (2021) with data from IEA (2020).

Em relação à competitividade das aplicações do hidrogênio até 2030, a Figura 7 ilustra as 35 aplicações consideradas, categorizadas em termos de sua competitividade em comparação com outras fontes de baixo carbono e em relação às fontes de energia convencionais tradicionalmente empregadas em cada aplicação específica.

With regard to the competitiveness of hydrogen applications by 2030, Figure 7 illustrates the 35 applications considered, categorized in terms of their competitiveness in comparison with other low-carbon sources and in relation to conventional energy sources traditionally used in each specific application.

# Competitividade do hidrogênio em relação às fontes de baixo carbono

## Competitiveness of hydrogen in relation to low-carbon sources



### Competitividade do hidrogênio em relação às fontes energéticas convencionais de cada aplicação

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

### Competitiveness of hydrogen in relation to conventional energy sources for each application

Note: \*If CCUS is not available for these applications using fossil sources, hydrogen is the only decarbonization option.

Figura 7. Competitividade de aplicações do hidrogênio até 2030.

Fonte: Adaptado de HYDROGEN COUNCIL (2020).

Figure 7. Competitiveness of hydrogen applications by 2030.

Source: Adapted from EPE (2021) with data from Hydrogen Council (2020).

Como evidenciado na Figura 7, o hidrogênio possui um potencial considerável para ser adotado no setor de transportes, abrangendo diversas aplicações, tais como: integração em ferrovias regionais, emprego em veículos esportivos utilitários, veículos de grande porte para passageiros, caminhões médios e pesados, além de ônibus urbanos para trajetos de longa distância. Vale ressaltar que o hidrogênio também pode ser explorado em outras áreas, como transporte marítimo e aéreo, bem como em veículos de trabalho especializados, como empilhadeiras e equipamentos de construção.

Essa diversidade de usos destaca a versatilidade do  $H_2$  como uma solução energética para diversos segmentos do transporte. Além disso, sua produção a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água, torna-o uma opção promissora para reduzir as emissões de carbono e promover a descarbonização do setor de transportes. Essa transição para o hidrogênio pode não apenas contribuir para a mitigação dos impactos das mudanças do clima, mas também para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a criação de uma economia mais sustentável e resiliente.

### 3.1 Principais desafios

Nos últimos vinte anos, houve um aumento significativo nos esforços dedicados ao desenvolvimento de tecnologias de  $H_2$ V. No entanto, persistem diversas questões que são alegadas como razões para o atraso em sua implementação em larga escala e para a escassez de mercado. Além disso, novas questões estão surgindo, sugerindo potenciais razões adicionais para o adiamento na adoção

As shown in Figure 7, hydrogen has considerable potential to be adopted in the transportation sector, covering various applications such as: integration into regional railroads, use in sports utility vehicles, large passenger vehicles, medium and heavy trucks, as well as city buses for long-distance journeys. It is noteworthy that hydrogen can also be exploited in other areas, such as maritime and air transport, as well as in specialized work vehicles such as forklifts and construction equipment.

This diversity of uses highlights the versatility of  $GH_2$  as an energy solution for various transportation segments. In addition, its production from renewable sources, such as water electrolysis, makes it a promising option for reducing carbon emissions and promoting the decarbonization of the transport sector. The transition into hydrogen not only contributes to mitigating the impacts of climate change, but also to reducing dependence on fossil fuels and creating a more sustainable and resilient economy.

### 3.1 Main challenges

Over the last twenty years, there has been a significant increase in efforts dedicated to the development of  $GH_2$  technologies. However, several issues that are pointed out to be the reasons for the delay in their large-scale implementation and for the market shortage still remain. In addition, new issues are emerging, suggesting additional potential reasons for the delay

das tecnologias de H<sub>2</sub>V (SQUADRITO, MAGGIO & NICITA, 2023). Alguns desses desafios incluem:

- **Custo elevado:** Atualmente, o custo de produção de H<sub>2</sub>V é mais elevado em comparação com os métodos convencionais baseados em combustíveis fósseis. Isso se deve, em parte, aos altos custos associados à eletrólise da água e ao armazenamento do hidrogênio. Reduzir os custos de produção é essencial para tornar o H<sub>2</sub>V mais competitivo e acessível (AGATON, BATAAC & REYES, 2022; DONG *et al.*, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b; GARUD *et al.*, 2023; KOJIMA *et al.*, 2023; DE LEÓN, RÍOS & BREY, 2023).
- **Necessidade de expandir a geração de energia renovável centralizada:** A produção de hidrogênio por eletrólise requer uma quantidade significativa de eletricidade renovável. Isso significa que será necessário expandir a capacidade de geração de energia renovável centralizada, como usinas solares e eólicas, para atender à crescente demanda por H<sub>2</sub>V. Isso pode exigir investimentos substanciais em infraestrutura e tecnologia (ABOUSEADA & HATEM, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023).
- **Energointensivo e baixa eficiência:** A produção de hidrogênio por eletrólise é um processo energointensivo e muitas vezes apresenta baixa eficiência. Isso significa que uma quantidade considerável de energia é perdida durante o processo de conversão, reduzindo a eficácia global da produção de H<sub>2</sub>V. Uma abordagem mais eficiente seria priorizar o uso de H<sub>2</sub>V para substituir o hidrogênio em aplicações onde já é amplamente utilizado,

in the adoption of GH<sub>2</sub> technologies (SQUADRITO, MAGGIO & NICITA, 2023). Some of these challenges include:

- **High cost:** Currently, the cost of GH<sub>2</sub> production is higher compared to conventional fossil fuel-based methods. This is partly due to the high costs associated with water electrolysis and hydrogen storage. Reducing production costs is essential to making GH<sub>2</sub> more competitive and accessible (AGATON, BATAAC & REYES, 2022; DONG *et al.*, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b; GARUD *et al.*, 2023; KOJIMA *et al.*, 2023; DE LEÓN, RÍOS & BREY, 2023).
- **Need to expand centralized renewable energy generation:** Hydrogen production by electrolysis requires a significant amount of renewable electricity. This means that it will be necessary to expand the centralized renewable energy generation capacity, such as solar and wind power plants, to meet the growing demand for GH<sub>2</sub>. This may require substantial investments in infrastructure and technology (ABOUSEADA & HATEM, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023).
- **Energy-intensive and low-efficiency production:** Hydrogen production by electrolysis is an energy-intensive process and often has low efficiency. This means that a considerable amount of energy is lost during the conversion process, reducing the overall effectiveness of GH<sub>2</sub> production. A more efficient approach would be to prioritize the use of GH<sub>2</sub> to replace hydrogen in applications where it is already widely used, such as in the chemical and refining industry (AGATON, BATAAC & REYES, 2022).

como na indústria química e de refino (AGATON, BATAAC & REYES, 2022).

- Segurança no manuseio do gás: O hidrogênio é altamente inflamável e requer precauções especiais no manuseio, armazenamento e transporte para garantir a segurança, incluindo o desenvolvimento de padrões de segurança rigorosos, treinamento adequado para operadores e a implementação de medidas de mitigação de riscos em toda a cadeia de valor do hidrogênio.
  - Impactos ambientais da produção de equipamentos: A fabricação de equipamentos necessários para a produção, armazenamento e distribuição de  $H_2V$  pode ter impactos ambientais significativos, incluindo a extração de materiais, o consumo de energia durante a fabricação e o descarte adequado dos equipamentos no final de sua vida útil (DE ABREU *et al.*, 2023).
  - Logística de transporte e exportação: O transporte e a exportação de  $H_2V$  apresentam desafios logísticos significativos devido à sua baixa densidade energética e à necessidade de armazenamento em alta pressão ou em forma líquida. Isso requer o desenvolvimento de infraestrutura de transporte especializada, como gasodutos, navios-tanque e caminhões criogênicos, além de investimentos em logística e distribuição.
  - Implicações políticas correspondentes para a realização de uma economia do hidrogênio verde: Promover o hidrogênio verde implica desafios políticos multifacetados, desde a formulação de políticas energéticas e regulatórias até a diplomacia internacional para
- Safety when handling the gas: Hydrogen is highly flammable and requires special handling, storage and transportation precautions to ensure safety, including the development of stringent safety standards, adequate training for operators and the implementation of risk mitigation measures throughout the hydrogen value chain.
  - Environmental impacts of equipment production: The manufacture of equipment required for  $GH_2$  production, storage and distribution can have significant environmental impacts, including the extraction of materials, energy consumption during manufacture and the proper disposal of equipment at the end of its useful life (DE ABREU *et al.*, 2023).
  - Transportation and export logistics:  $GH_2$  transportation and export present significant logistical challenges due to its low energy density and the need for storage at high pressure or in the liquid form. This requires the development of specialized transport infrastructure, such as pipelines, tankers and cryogenic trucks, as well as investments in logistics and distribution.
  - Corresponding policy implications for the implementation of a green hydrogen economy: Promoting green hydrogen implies multifaceted policy challenges, from the formulation of energy and regulatory policies to international diplomacy to ensure fair trade and cooperation in production and distribution. The necessary infrastructure and investments require robust public policies and public-private partnerships (AGATON, BATAAC & REYES, 2022;



garantir o comércio justo e a cooperação na produção e distribuição. A infraestrutura e os investimentos necessários requerem políticas públicas robustas e parcerias público-privadas (AGATON, BATAÇ & REYES, 2022; SQUADRITO, MAGGIO & NICITA, 2023; WAPPLER et al, 2022).

Para enfrentar esses desafios e aproveitar ao máximo os benefícios do H<sub>2</sub>V, é crucial implementar uma série abrangente de boas práticas (RABIEE, KEANE & SOROUDI, 2021), conforme elencadas na Seção 3.2. Isso inclui não apenas aprimorar as tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio, mas também desenvolver infraestrutura adequada para distribuição e uso eficiente, conforme será discutido na próxima seção.

## 3.2 Práticas de Incentivo

Para estimular o uso do H<sub>2</sub>V e estabelecer um papel duradouro para ele como estratégia energética, é essencial adotar uma abordagem abrangente e colaborativa, envolvendo:

- Estabelecer um papel a longo prazo para o hidrogênio como estratégia energética: Os governos e as partes interessadas devem criar políticas e regulamentações que incentivem o uso do H<sub>2</sub>V em diversos setores, como transporte, indústria e energia. Isso inclui a definição de metas ambiciosas de redução de emissões e a implementação de incentivos financeiros para investimentos em tecnologias de hidrogênio (BIANCO & BLANCO, 2020; DE ABREU *et al.*, 2023b).
- Estimular a demanda comercial para o H<sub>2</sub>V: É necessário criar um mercado

(SQUADRITO, MAGGIO & NICITA, 2023; WAPPLER et al, 2022).

To face these challenges and obtain benefits from GH<sub>2</sub>, it is crucial to implement a comprehensive series of best production practices (RABIEE, KEANE & SOROUDI, 2021), as shown in Section 3.2. This includes not only improving hydrogen production and storage technologies, but also developing adequate infrastructure for distribution and efficient use, as will be discussed in the next section.

## 3.2 Incentive Practices

To encourage the use of GH<sub>2</sub> and establish a lasting role for it as an energy strategy, it is essential to adopt a comprehensive and collaborative approach, involving:

- Establishing a long-term role for hydrogen as an energy strategy: Governments and stakeholders should create policies and regulations that encourage the use of GH<sub>2</sub> in various sectors, such as transportation, industry and energy. This includes the definition of ambitious emission reduction targets and implementation of financial incentives for investments in hydrogen technologies (BIANCO & BLANCO, 2020; DE ABREU *et al.*, 2023b).
- Stimulating commercial demand for GH<sub>2</sub>: It is necessary to create a robust market for low-carbon hydrogen, encouraging its adoption by companies

robusto para o hidrogênio de baixo carbono, incentivando sua adoção por empresas e consumidores. Isso pode ser feito através de programas de incentivo, como subsídios e tarifas de alimentação, bem como parcerias público-privadas para desenvolver infraestrutura de abastecimento de hidrogênio (WAPPLER et al, 2022).

- Mitigar risco de investimento: Para atrair investimentos significativos no desenvolvimento e implantação de tecnologias de hidrogênio, é crucial reduzir os riscos financeiros associados. Isso pode ser alcançado por meio de garantias de empréstimos, seguros contra riscos e parcerias de financiamento público-privadas que compartilhem os custos e os benefícios dos projetos de hidrogênio (BIANCO & BLANCO, 2020; DINCER, JAVANI & KARAYEL, 2022).
- Apoiar Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): Investimentos contínuos em P&D são fundamentais para impulsionar a inovação e reduzir os custos das tecnologias de hidrogênio, incluindo financiamento para projetos de P&D, colaboração entre universidades, instituições de pesquisa e empresas privadas, e programas de incentivo para startups e empresas emergentes no setor de hidrogênio.
- Desenvolver padrões e normas: Para garantir a interoperabilidade e a segurança das tecnologias de hidrogênio, é necessário estabelecer padrões e normas técnicas internacionais. Isso facilitará a comercialização e a adoção em larga escala do hidrogênio, ao mesmo tempo em que garantirá a qualidade e a confiabilidade dos sistemas

and consumers. This can be achieved through incentive programs, such as subsidies and feed-in tariffs, as well as public-private partnerships to develop hydrogen fueling infrastructure (WAPPLER et al, 2022).

- Mitigating investment risk: In order to attract significant investment in the development and deployment of hydrogen technologies, it is crucial to reduce associated financial risks. This can be achieved through loan guarantees, risk insurance and public-private financing partnerships to share the costs and benefits of hydrogen projects (BIANCO & BLANCO, 2020; DINCER, JAVANI & KARAYEL, 2022).
- Supporting Research and Development (R&D): Continued investments in R&D are key to driving innovation and reducing the costs of hydrogen technologies, including funding for R&D projects, collaboration between universities, research institutions and private companies, and incentive programs for startups and emerging companies in the hydrogen sector.
- Developing standards and norms: In order to guarantee the interoperability and safety of hydrogen technologies, it is necessary to establish international technical standards and norms. This will facilitate the marketing and large-scale adoption of hydrogen, while ensuring the quality and reliability of GH<sub>2</sub>-related systems and equipment (ABAD & DODDS, 2020; CHENG & LEE, 2022).
- Implementing international association: International collaboration is essential to boost the use of hydrogen as a global energy solution.

e equipamentos relacionados ao H<sub>2</sub>V (ABAD & DODDS, 2020; CHENG & LEE, 2022).

- Implementar a Associação internacional: A colaboração internacional é essencial para impulsionar o uso do hidrogênio como uma solução energética global. Isso envolve o estabelecimento de parcerias e acordos de cooperação entre países, organizações intergovernamentais e empresas multinacionais para promover o intercâmbio de conhecimentos, tecnologias e melhores práticas relacionadas ao H<sub>2</sub>V.
- Focar em oportunidades para aumentar o momentum: Identificar e aproveitar oportunidades para aumentar o momentum em torno do H<sub>2</sub>V é fundamental para acelerar sua adoção e implantação. Isso pode incluir o lançamento de iniciativas de conscientização pública, eventos e conferências internacionais, programas de capacitação e treinamento, e campanhas de marketing que destaquem os benefícios do hidrogênio para a sustentabilidade e a economia global.

É fundamental ressaltar a necessidade de promover um maior número de estudos para avaliar tanto a viabilidade técnica quanto econômica da produção em larga escala de H<sub>2</sub>V (NAMI *et al.*, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b). Ao incentivar e apoiar pesquisas nessa área, pode-se identificar soluções inovadoras, otimizar processos e reduzir custos, tornando o H<sub>2</sub>V uma opção mais acessível e competitiva.

Além de promover o H<sub>2</sub>V, é essencial realizar análises de sensibilidade para identificar os cenários mais favoráveis para sua implementação. Tais análises, especialmente em relação a fatores tecno

This involves establishing partnerships and cooperation agreements between countries, intergovernmental organizations and multinational companies to promote the exchange of knowledge, technologies and best practices related to GH<sub>2</sub>.

- Focusing on opportunities to increase momentum: Identifying and taking advantage of opportunities to increase momentum around GH<sub>2</sub> is key to accelerating its adoption and implementation. This can include developing public awareness initiatives, international events and conferences, capacity building and training programs, and marketing campaigns that highlight the benefits of green hydrogen for sustainability and global economy.

It is essential to emphasize the need to encourage the conduction of a greater number of studies to assess both the technical and economic feasibility of large-scale GH<sub>2</sub> production (NAMI *et al.*, 2022; DE ABREU *et al.*, 2023b). By encouraging and supporting research in this area, innovative solutions can be identified, processes optimized and costs reduced, making GH<sub>2</sub> a more accessible and competitive option.

In addition to supporting GH<sub>2</sub> production, it is essential to carry out sensitivity analyses to identify the most favorable scenarios for its implementation. Such analyses, especially in relation to techno-economic factors, highlight that significant reductions in the costs of solar panels and batteries, coupled with incentives such as low-interest loans, can make GH<sub>2</sub> economically competitive. These technological advances and financial support policies are key to boosting



econômicos, destacam que reduções significativas nos custos de painéis solares e baterias, aliadas a incentivos como empréstimos de baixo juro, podem tornar o H<sub>2</sub>V economicamente competitivo. Esses avanços tecnológicos e políticas de apoio financeiro são fundamentais para impulsionar a viabilidade econômica do H<sub>2</sub>V, facilitando sua adoção em larga escala e acelerando a transição para uma economia de baixo carbono (GARUD *et al.*, 2023).

Além disso, é crucial realizar Análises do Ciclo de Vida (ACV) desse processo para avaliar seu impacto ambiental (pegada ambiental) ao longo de todas as etapas, desde a produção até o seu consumo (DE KLEIJNE *et al.*, 2022). Isso permite identificar oportunidades de melhoria e garantir que o H<sub>2</sub>V contribua efetivamente para a redução das emissões de carbono e para a sustentabilidade ambiental como um todo (DE ABREU *et al.*, 2023b).

Esses estudos e análises são fundamentais para fornecer uma compreensão mais profunda dos desafios e oportunidades envolvidos na produção em grande escala de H<sub>2</sub>V (DE ABREU *et al.*, 2023a). Cabe ainda ressaltar que uma visão estratégica consolidada é essencial para definir o papel de países como o Brasil nessa cadeia, requerendo uma política de investimentos robusta em pesquisa e desenvolvimento, aliada a mecanismos de financiamento e incentivos fiscais para promover o amadurecimento e o crescimento do mercado (FERNANDES, 2023), conforme discutido no Capítulo 4.

the economic viability of GH<sub>2</sub>, facilitating its large-scale adoption and accelerating the transition into a low-carbon economy (GARUD *et al.*, 2023).

In addition, it is crucial to carry out Life Cycle Analyses (LCA) of this process to assess its environmental impact (environmental footprint) throughout all stages, from production to consumption (DE KLEIJNE *et al.*, 2022). This allows identifying opportunities for improvement and ensure that GH<sub>2</sub> effectively contributes to reducing carbon emissions and to environmental sustainability as a whole (DE ABREU *et al.*, 2023b).

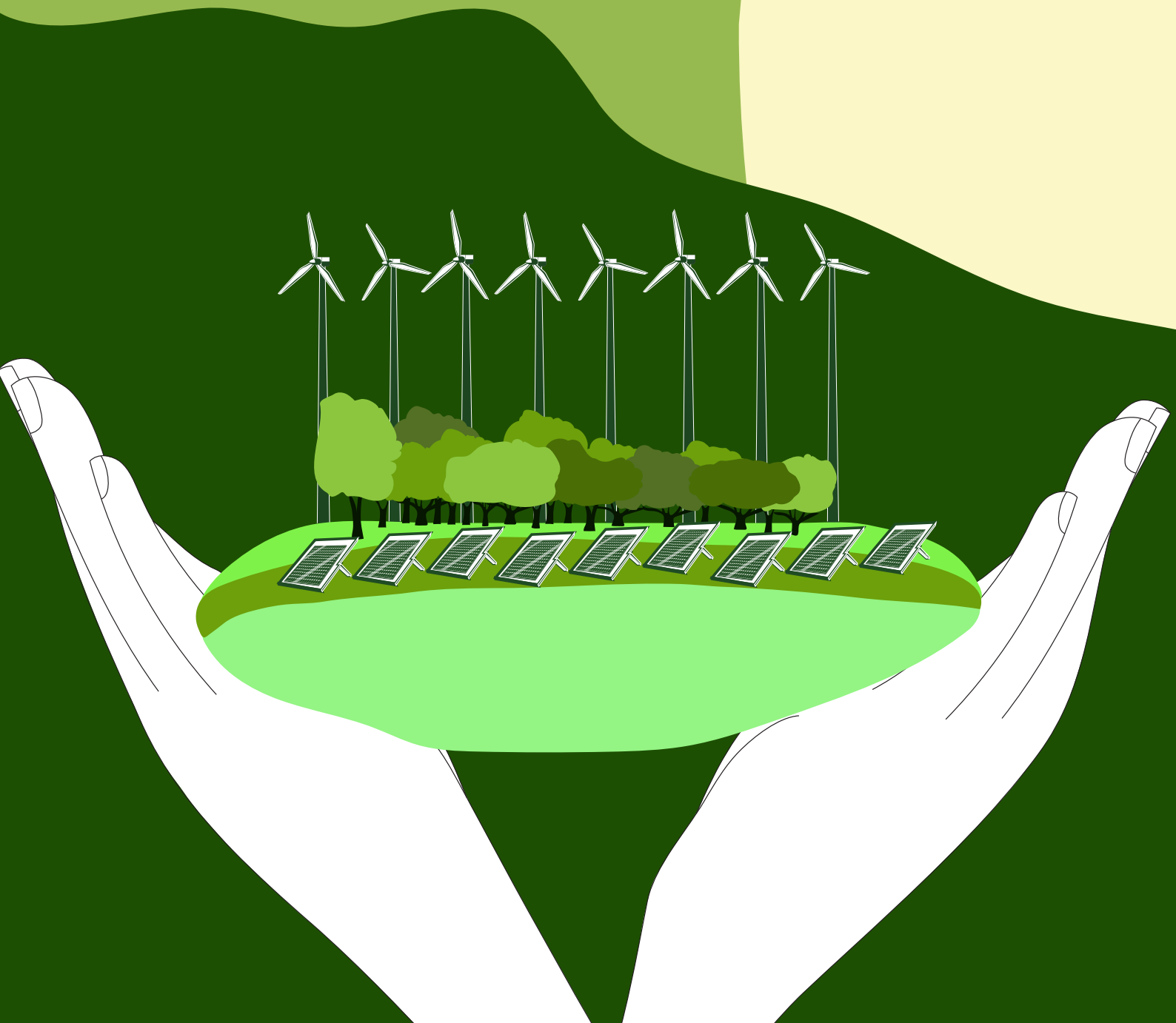
These studies and analyses are key for providing a deeper understanding of the challenges and opportunities involved in large-scale GH<sub>2</sub> production (DE ABREU *et al.*, 2023a). It is also noteworthy that a consolidated strategic vision is essential to define the role of countries like Brazil in this chain, requiring a robust investment policy in research and development, combined with financing mechanisms and tax incentives to promote market maturation and growth (FERNANDES, 2023), as discussed in Chapter 4.

# 4

## POTENCIAL BRASILEIRO PARA PRODUÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

BRAZILIAN POTENTIAL FOR PRODUCTION AND  
MARKETING OF GREEN HYDROGEN

---



O Brasil possui um enorme potencial para a produção e comercialização de  $H_2V$ , impulsionado por diversos fatores favoráveis.

1. Recursos Naturais Abundantes: O país é rico em recursos naturais necessários para a produção de  $H_2V$ . A energia solar é abundante em grande parte do território brasileiro, e o país também possui vastas áreas para a produção de biomassa, como cana-de-açúcar e outras culturas energéticas. Esses recursos podem ser utilizados na produção de energia renovável para alimentar a eletrólise, processo fundamental na obtenção de  $H_2V$  (FERNANDES, 2023).
2. Potencial de Energia Eólica e Solar: O Brasil tem um dos maiores potenciais de energia eólica e solar do mundo. Essas fontes de energia podem ser aproveitadas para gerar eletricidade limpa, que por sua vez pode ser utilizada na produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água.
3. Setor Agrícola e Agroindústria: O país possui uma forte indústria agrícola e agroindustrial, que pode ser aproveitada para produzir biomassa para a produção de  $H_2V$ . Além disso, resíduos agrícolas e agroindustriais podem ser utilizados na produção de biogás, uma fonte de energia renovável que pode ser convertida em hidrogênio.
4. Expertise em Tecnologia de Biocombustíveis: O Brasil é líder mundial na produção e comercialização de biocombustíveis, como etanol e biodiesel.

Brazil has enormous potential for the production and marketing of  $GH_2$ , which can be boosted by several favorable factors:

1. Abundant natural resources: The country is rich in the natural resources required for  $GH_2$  production. Solar energy is abundant over a large part of the Brazilian territory, and the country also has vast areas for biomass production, such as sugarcane and other energy crops. These resources can be used to produce renewable energy to power electrolysis, a fundamental process in obtaining  $GH_2$  (FERNANDES, 2023).
2. Wind and Solar Energy Potential: Brazil has one of the world's largest wind and solar energy potentials. These energy sources can be used to generate clean electricity, which in turn can be used to produce hydrogen through water electrolysis.
3. Agricultural sector and agroindustry: The country has strong agricultural and agro-industrial industry, which can be used to produce biomass for  $GH_2$  production. In addition, agricultural and agro-industrial waste can be used to produce biogas, a renewable energy source that can be converted into hydrogen.
4. Expertise in Biofuel Technology: Brazil is a global leader in the production and commercialization of biofuels, such as ethanol and biodiesel. This expertise in biofuels can be applied for  $GH_2$  production.

Essa expertise em biocombustíveis pode ser aplicada na produção de H<sub>2</sub>V.

5. Mercado Interno e Externo em Crescimento: O Brasil possui um grande mercado interno que demanda energia limpa e soluções sustentáveis. Além disso, o crescente interesse global na redução das emissões de carbono abre oportunidades para a exportação de H<sub>2</sub>V e seus derivados para outros países.
6. Alianças Internacionais: O Brasil pode estabelecer parcerias e alianças internacionais para impulsionar o desenvolvimento do mercado de H<sub>2</sub>V. Colaborações com países líderes nesse setor podem proporcionar acesso a tecnologias avançadas, investimentos e mercados externos.
7. Inovação e Investimento: O país possui um ambiente propício para a inovação e investimentos em energia renovável. Através de políticas públicas adequadas, incentivos fiscais e financiamentos, o Brasil pode fomentar o desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura necessárias para a produção e comercialização de H<sub>2</sub>V.

Com base em seu vasto potencial natural, expertise tecnológica e oportunidades de mercado, o Brasil está bem posicionado para se tornar um importante produtor e exportador de H<sub>2</sub>V, contribuindo para a transição global para uma economia de baixo carbono.

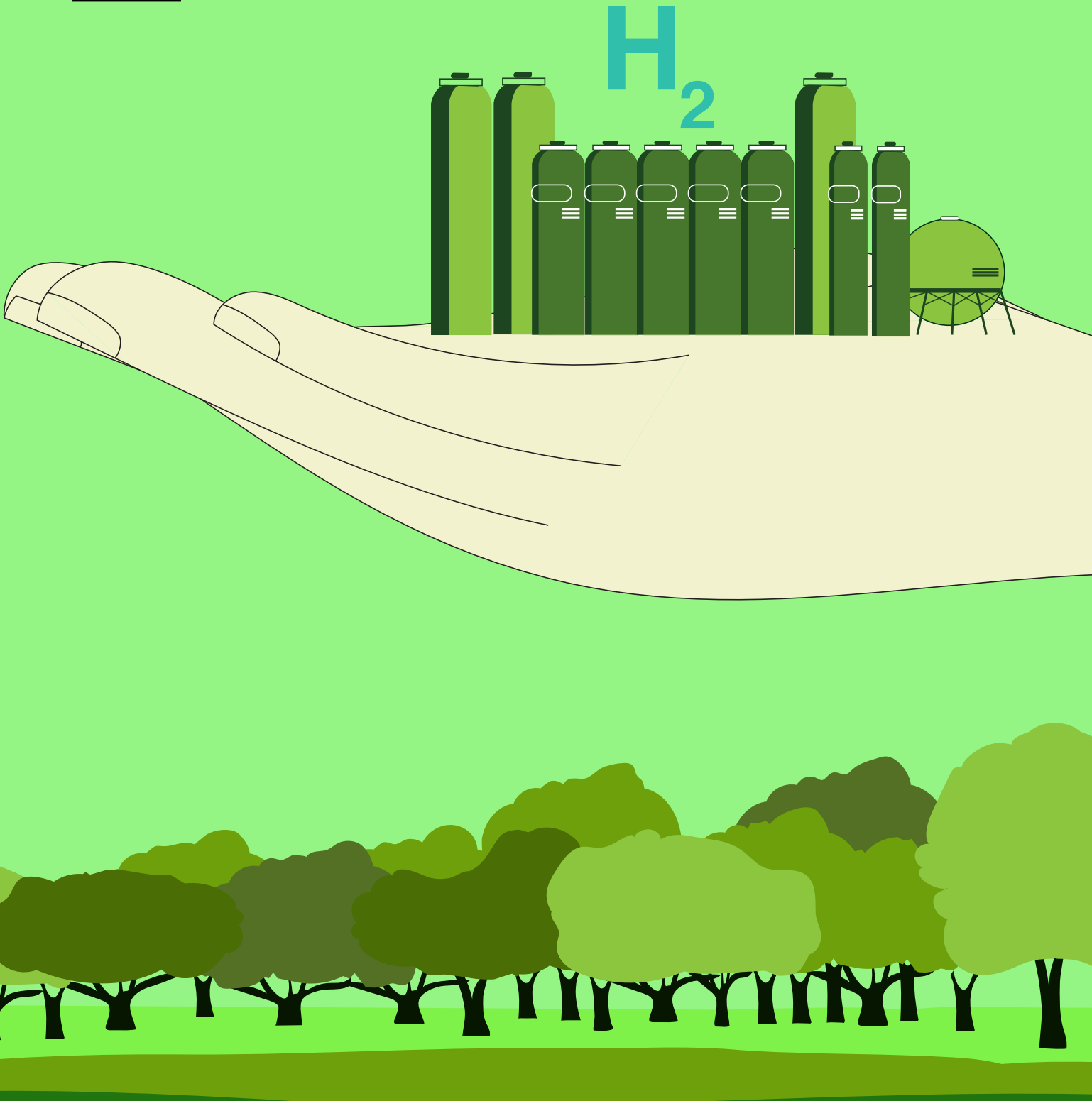
5. Growing domestic and foreign markets: Brazil has a large domestic market demanding clean energy and sustainable solutions. In addition, growing global interest in reducing carbon emissions opens up opportunities for exporting GH<sub>2</sub> and its derivatives to other countries.
6. International alliances: Brazil can establish international partnerships and alliances to boost the development of the GH<sub>2</sub> market. Collaborations with leading countries in this sector can provide access to advanced technologies, investments and foreign markets.
7. Innovation and Investment: The country has favorable environment for innovation and investment in renewable energy. Through appropriate public policies, tax incentives and financing, Brazil can foster the development of technologies and infrastructure necessary for GH<sub>2</sub> production and marketing.

Based on its vast natural potential, technological expertise and market opportunities, Brazil is well placed to become a major GH<sub>2</sub> producer and exporter, contributing to the global transition into a low-carbon economy.

# 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS CONCLUDING REMARKS

---



Prevê-se que o hidrogênio renovável e de baixo carbono se torne economicamente competitivo até 2030. No entanto, alcançar esse objetivo requer uma cooperação contínua e vigorosa entre os países para acelerar a disseminação dessa nova cadeia produtiva. Além disso, é crucial manter debates regulares para alinhar agendas climáticas, atendendo tanto à demanda global quanto às questões internas, como capacitação da mão de obra, infraestrutura de exportação, adaptação da matriz energética e gestão da água.

O Brasil tem potencial para desempenhar um papel crucial nessa transição energética, aproveitando a oportunidade tecnológica e assumindo a posição de produtor desse recurso. A produção não deve se limitar ao mercado interno, mas também mirar o mercado externo. Parcerias com países desenvolvidos, como os programas desenvolvidos em parceria com a Alemanha, podem impulsionar projetos, promovendo o desenvolvimento no Brasil e abrindo caminho para exportação de derivados para a Europa. Internamente, há oportunidades significativas para a descarbonização em diversos setores industriais importantes, como cimento, aço, alimentos, fertilizantes e petroquímica.

Green hydrogen is expected to become economically competitive by 2030. However, achieving this goal requires continuous and vigorous cooperation between countries to accelerate the spread of this new production chain. In addition, it is crucial to hold regular debates to align climate agendas, addressing both global demand and domestic issues such as workforce training, export infrastructure, adaptation of the energy matrix and water management.

Brazil has potential to play a crucial role in this energy transition, taking advantage of the technological opportunity and assuming the position of leading producer of this resource. Production should not be limited to the domestic market but should also target the foreign market. Partnerships with developed countries, such as the programs developed in partnership with Germany, can boost projects, promoting development in Brazil and bringing opportunities for the export of derivatives to Europe. Domestically, there are significant opportunities for decarbonization in several important industrial sectors, such as cement, steel, food, fertilizers and petrochemicals.

# 6

## REFERÊNCIAS

## REFERENCES

---

ABAD, Anthony Velazquez; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, v. 138, p. 111300, 2020.

ABOUSEADA, Nour; HATEM, Tarek M. Climate action: Prospects of green hydrogen in Africa. *Energy reports*, v. 8, p. 3873-3890, 2022.

AGATON, Casper Boongaling; BATAC, Kenneth Ian Talosig; REYES JR, Edgar Medrano. Prospects and challenges for green hydrogen production and utilization in the Philippines. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 41, p. 17859-17870, 2022.

ALZOUBI, Asem. Renewable Green hydrogen energy impact on sustainability performance. *International Journal of Computations, Information and Manufacturing (IJCIM)*, v. 1, n. 1, 2021.

ANZELMO, Bryce; WILCOX, Jennifer; LIGUORI, Simona. Hydrogen production via natural gas steam reforming in a Pd-Au membrane reactor. Comparison between methane and natural gas steam reforming reactions. *Journal of Membrane Science*, v. 568, p. 113-120, 2018.

BERKELEY LAB. Hydrogen: The Energy Carrier of the Future. 2028. Disponível em: <https://www.fchea.org/h2-day-2018-events-activities/2018/10/8/lawrence-berkeley-lab-celebrates-hydrogen-the-energy-carrier-of-the-future>  
Available at: <https://www.fchea.org/h2-day-2018-events-activities/2018/10/8/lawrence-berkeley-lab-celebrates-hydrogen-the-energy-carrier-of-the-future>



BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. 2021. Disponível em: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021\\_CDS\\_212.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf)

Available at: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021\\_CDS\\_212.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf)

BIANCO, Emanuele; BLANCO, Herib. Green hydrogen: a guide to policy making. 2020.

CHENG, Wenting; LEE, Sora. How green are the national hydrogen strategies?. *Sustainability*, v. 14, n. 3, p. 1930, 2022.

CORMOS, Calin-Cristian. Green hydrogen production from decarbonized biomass gasification: An integrated techno-economic and environmental analysis. *Energy*, v. 270, p. 126926, 2023.

DE ABREU, Victor Hugo Souza *et al.* A systematic study on techno-economic evaluation of hydrogen production. *Energies*, v. 16, n. 18, p. 6542, 2023a. DOI: 10.3390/en16186542

DE ABREU, Victor Hugo Souza. *et al.* A Systematic Review on Renewable Hydrogen Application in the Land Transportation Sector. In: Upadhyay, R.K., Sharma, S.K., Kumar, V. (eds) *Intelligent Transportation System and Advanced Technology*. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. (2024). DOI: 10.1007/978-981-97-0515-3\_2

DE ABREU, Victor Hugo Souza *et al.* Avaliação Do Ciclo De Vida Como Ferramenta Para Medir A Eficiência Ambiental Do Hidrogênio Renovável. *IMPACT projects*, v. 2, n. 1, p. 105-122, 2023b. DOI: 10.59279/impact.v2i1.2255

DE ASSIS, Tássia Faria *et al.* Enabling the Green Bonds Market for Sustainable Transport Projects Based on the Measure/Monitoring, Reporting and Verification Method. In: *Carbon Footprints of Manufacturing and Transportation Industries*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 1-24. DOI: 10.1007/978-981-19-7226-3\_1

DE ASSIS, Tássia Faria *et al.* Sustainable Transport Indicators and Mitigation Actions Applied to the Green Bond Principles. In: *Carbon Footprints of Manufacturing and Transportation Industries*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 139-169. DOI:10.1007/978-981-19-7226-3\_6.

DE LEÓN, C. Martínez; RÍOS, C.; BREY, J. J. Cost of green hydrogen: Limitations of production from a stand-alone photovoltaic system. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 32, p. 11885-11898, 2023.

DE KLEIJNE, Kiane *et al.* The many greenhouse gas footprints of green hydrogen. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 6, n. 19, p. 4383-4387, 2022. Sustainable EneDINCER, Ibrahim; JAVANI, Nader; KARAYEL, G. Kubilay. Sustainable city concept based on green hydrogen energy. *Sustainable Cities and Society*, v. 87, p. 104154, 2022.

DOMENIGHINI, Piergiorgio *et al.* Future perspectives in green Hydrogen production by catalyzed sono-photolysis of water. *Sustainable Energy & Fuels*, 2024.

DONG, Zhao Yang *et al.* A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 2, p. 728-734, 2022. *Sustainable Energy & Fuels*, v. 6, n. 19, p. 4383-4387, 2022.

EICKE, Laima; DE BLASIO, Nicola. Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications. *Energy research & social science*, v. 93, p. 102847, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\\_23Fev2021NT%20%282%29.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf)  
Available at: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio\\_23Fev2021NT%20%282%29.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20%282%29.pdf).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural. Nota Técnica EPE/DGP/SPG/01/2022. Ministério de Minas e Energia. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>  
Available at: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>.

FERNANDES, Gláucia *et al.* Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. 2023. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao\\_artigo\\_hidrogenio\\_verde\\_matriz.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf)  
Available at: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao\\_artigo\\_hidrogenio\\_verde\\_matriz.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf).

FONSECA, Roberto Giannetti da. A era do hidrogênio verde no século XXI. Inovação & Desenvolvimento: A Revista da FACEPE, Recife, v. 1, n. 8, p. 40-45, 2022.

GAS ENERGY. Os desafios da armazenagem e transporte de hidrogênio em larga escala. 2021. Disponível em: <https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>.

Available at: <https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>

GARUD, Sushant S. *et al.* Green hydrogen from solar power for decarbonization: what will it cost?. Energy Conversion and Management, v. 286, p. 117059, 2023.

HYDROGEN COUNCIL (2020). Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective. Disponível em: [https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf).

Available at: [https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wpcontent/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. 2019. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>.

Available at: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis – IEA. 2020. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2020\\_PDF.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf).

Available at: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2020\\_PDF.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf).

KARAYEL, G. Kubilay; JAVANI, Nader; DINCER, Ibrahim. Green hydrogen production potential for Turkey with solar energy. International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, n. 45, p. 19354-19364, 2022.

KOJIMA, Hirokazu *et al.* Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. international journal of hydrogen energy, v. 48, n. 12, p. 4572-4593, 2023.

KUMAR, S. Shiva; LIM, Hankwon. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy reports*, v. 8, p. 13793-13813, 2022.

MARTÍNEZ, I. *et al.* Hydrogen production through sorption enhanced steam reforming of natural gas: Thermodynamic plant assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 35, p. 15180-15199, 2013.

MNEIMNEH, Farah *et al.* Roadmap to achieving sustainable development via green hydrogen. *Energies*, v. 16, n. 3, p. 1368, 2023.

NAMI, Hossein *et al.* Techno-economic analysis of current and emerging electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, v. 269, p. 116162, 2022.

OLIVEIRA, Alexandra M.; BESWICK, Rebecca R.; YAN, Yushan. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 33, p. 100701, 2021.

PANCHENKO, V. A. *et al.* Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. 12, p. 4551-4571, 2023.

RABIEE, Abbas; KEANE, Andrew; SOROUDI, Alireza. Technical barriers for harnessing the green hydrogen: A power system perspective. *Renewable Energy*, v. 163, p. 1580-1587, 2021.

SANTOS, Andrea Souza *et al.* An overview on costs of shifting to sustainable road transport: A challenge for cities worldwide. *Carbon Footprint Case Studies: Municipal Solid Waste Management, Sustainable Road Transport and Carbon Sequestration*, p. 93-121, 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-9577-6\_4

SEYITOGLU, S. S.; DINCER, I.; KILICARSLAN, A.. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 4, p. 2592-2600, 2017.

SQUADRITO, Gaetano; MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino. The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*, v. 216, p. 119041, 2023.

STÖCKL, Fabian; SCHILL, Wolf-Peter; ZERRAHN, Alexander. Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen. *Scientific reports*, v. 11, n. 1, p. 14191, 2021.

WAPPLER, Mona *et al.* Building the green hydrogen market—Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 79, p. 33551-33570, 2022.

ZHOU, Ying *et al.* Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 43, p. 2-13, 2022.

**TIX**  
EDITORA

**iyá**  
PRODUÇÕES  
ILIMITADAS