

# H2BRASIL



Coleção 2: APLICAÇÃO DO H2VERDE NO MERCADO



VOLUME 4

## Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

THORSTEN SCHNEIDERS, INGO STADLER, JULIAN DAVID HUNT,  
PAULO SMITH SCHNEIDER, MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ,  
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA



Por meio da:



Apoio:



Organização:



## Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

### Projeto H2Brasil – Expansão do Hidrogênio Verde

#### Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável (Componente 03 – Capacitação)

**Implementação:** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

- Diretor: Markus Francke
- Coordenador: Martin Studte

**Coordenação Geral:** INTEGRATION / GOPA\_INTEC

- Coordenação: Klaus-Peter Albrechtsen
- Especialista: Lothar Hoppe
- Especialista: Rosana Z. Domingues
- Tradução: Francisco Polatscheck
- Revisão: Victor N. Bistrizki

**Coordenação dos Cursos:** Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética

- Coordenação Geral dos cursos: Júlia Teixeira Fernandes
- Coordenação Acadêmica: Aurélio Lamare Soares Murta
- Coordenação Operacional: Roney Ramaiano de Souza Silva
- Coordenação Pedagógica: Ariane Louzada Sasso Ferrão
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Bianca Zorzetto Carniel Furquim
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Isabelle Freire Sousa

# Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

## Ficha catalográfica

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

Hidrogênio verde e oportunidades de mercado [livro eletrônico] : volume 4 / Thorsten Schneiders ...[et al.]. -- Brasília, DF: LaSUS FAU, 2023. -- (Coleção 2: aplicação do H2 verde no mercado) PDF

Outros autores: Ingo Stadler, Julian D. Hunt, Paulo S. Schneider, Mario O. A. Gonzalez, Júlia T. Fernandes, Aurélio L. S. Murta.

ISBN 978-65-84854-33-8

1. Energia - Fontes alternativas 2. Hidrogênio Verde. 3. Sustentabilidade ambiental I. Série.

23-178242

CDD-333.794

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Energias renováveis : Desenvolvimento sustentável : Economia 333.794

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

## Dados editoriais:

**Editora:** LaSUS FAU UnB

**Equipe editorial:**

- Professor Dr. Caio Frederico e Silva (ed)
- Professora Dra. Marta Bustos Romero(ed)
- Coordenador Técnico: Valmor Cerqueira Pazos



UnB Estante digital: <https://livros.unb.br/>

## Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional\*



### Volume 1

Hidrogênio Verde  
(H2 Pt-X) e  
Mobilidade



### Volume 2

Hidrogênio Verde  
(H2 Pt-X) e  
outras aplicações



### Volume 3

Legislação e normas de  
segurança, para  
produção e usos do H2  
não convencionais



### Volume 4

Oportunidades de  
mercados:  
Nacional e Internacional

*\*Esse livro tem como referência a transcrição e adaptação das aulas do Curso 2-Módulo 5, H<sub>2</sub>Brasil, 2023.*

### Conteúdo das aulas:

THORSTEN SCHNEIDERS

INGO STADLER

JULIAN DAVID HUNT

PAULO SMITH SCHNEIDER

MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ

### Adaptação para livro:

JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES

AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

### Organização do livro:

KLAUS-PETER ALBRECHTSEN

LOTHAR HOPPE

ROSANA DOMINGUES

# Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

## Dr. Thorsten Schneiders

Cologne University of Applied Sciences | [thorsten.schneiders@th-koeln.de](mailto:thorsten.schneiders@th-koeln.de)

Possui doutorado pela Ruhr-Universidade de Bochum, Bochum, Alemanha; Pesquisador do Instituto de Energias Renováveis de Colônia e Professor na área de Armazenamento de Energia, Casa Inteligente, Energia Inteligente na indústria energética; Pesquisa nas áreas de energias renováveis nos países em desenvolvimento: fornecimento de energia sustentável com energias renováveis; Energia solar em combinação com geradores a diesel e armazenamento de bateria; Chefe do "Virtual Institute Smart Energy" (VISE), que é uma plataforma para atuação acadêmica e em empresas.

## Dr. Ingo Stadler

Cologne University of Applied Sciences | [ingo.stadler@th-koeln.de](mailto:ingo.stadler@th-koeln.de)

Possui doutorado e professor de Energias Renováveis e Economia da Energia no Karlsruher Institut für Technologie (KIT) na Alemanha, que combina o ensino e a investigação de uma forma interdisciplinar; Membro do Instituto de Engenharia de Energia Elétrica (IET); Experiência de ensino, pesquisa e projeto na área de Energia Renovável, Armazenamento de Energia, Integração de energias renováveis nas estruturas de abastecimento; Gestão de energia em sistemas de rede e Projetos relacionados ao Brasil com relação a aplicação do Hidrogênio Verde com energias renováveis.

## Dr. Julian David Hunt

King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) | [julian.hunt@kaust.edu.sa](mailto:julian.hunt@kaust.edu.sa)

Graduado em engenharia química na Universidade de Nottingham e doutorado na Universidade de Oxford (Inglaterra). Pós-doutorado no PPE/UFRJ, CNEN, em de Planejamento Energético em sistema de suporte à tomada de decisão de tecnologias de geração elétrica e aumentar a capacidade de armazenamento do sistema interligado nacional; PPGQUI/UFES e foi pesquisador no International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Áustria. Atual pesquisador em KAUST em invenções tecnológicas em hidrogênio, armazenamento energético, gestão hídrica e energias renováveis.

## Dr. Paulo Smith Schneider

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | [pss@mecanica.ufrgs.br](mailto:pss@mecanica.ufrgs.br)

Graduação e mestrado em Engenharia Mecânica pela UFRGS, e doutorado em Engenharia pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon- INSA, França, pós-doc na The University of Queensland, UQ, Austrália. Ensino e pesquisa sobre a transição energética, hidrogênio verde, armazenamento de energia, racionalização energética e integração de sistemas de energia complexos; concepção, desenvolvimento, modelagem e análise de sistemas e equipamentos térmicos e de conversão de potência; análise e otimização termodinâmica de sistemas convencionais e alternativos, sistema reativos, aproveitamento energético de resíduos, desenvolvimento de equipamentos para recuperação de correntes de baixa disponibilidade energética, sistemas de acumulação de energia.

## Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) | [mario.gonzalez@ufrn.br](mailto:mario.gonzalez@ufrn.br)

Doutor em Eng. de Produção (Inovação de Produtos e Integração de Clientes) pela UFSC, Mestre pela UFRN e Graduado em Eng. Industrial no Perú. Especialista em Gestão da Qualidade Total e em Gestão da Inovação Tecnológica, na abordagem Open Innovation. É professor dos programas de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Engenharia do Petróleo. É Coordenador e Fundador do grupo de pesquisa CREATION - Inovação de produtos e processos nas cadeias de valor de energias renováveis (eólica, solar e hidrogênio). Atua pela UFRN na Câmara Temática de Capacitação de RH do Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2.

## Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

### Dra. Júlia Teixeira Fernandes

Universidade de Brasília (UnB) | Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética | [julia@quali-a.com](mailto:julia@quali-a.com)

Arquiteta e Urbanista; Doutora pela FAU-UnB, pesquisadora no LaSUS, LACAM e SiCAC, em Sustentabilidade, Bioclimatismo, Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Lumínio, Eficiência Energética, Qualidade Ambiental e Simulaçã. Consultora de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PROCEL-EDIFICA/MME), Normas, Certificações, Neroarquitetura e Biofilia. Professora de pós do IPOG e sócia da Quali-A, do Impact Hub-Brasília.

### Dr. Aurélio Lamare Soares Murta

Universidade Federal Fluminense (UFF) | [aureliomurta@id.uff.br](mailto:aureliomurta@id.uff.br)

Graduado em Eng. Civil, Mestrado em Transportes (IME), Doutorado e Pós-doc em transporte e Planejamento Energético e Ambiental UFRJ. É Professor da UFF em Administração, Coordenador do MBA em Logística Empresarial, Pesquisador do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais/UFRJ. Membro Imortal da Academia Brasileira de Ciências, Artes, História e Literatura (ABRASCI). Áreas de atuação: Eng. de Transportes, Planejamento e Operação Logística, Gerenciamento de Projetos, Pesquisa Operacional e Simulação.

### Me. Klaus-Peter Albrechtsen

Integration – International Management Consultants GmbH / GIZ | [klausalbrechtsen@yahoo.de](mailto:klausalbrechtsen@yahoo.de)

Mestrado em Eletrotécnica de Potência e em Educação Profissional pela Universidade de Hamburgo/Alemanha. Especialista nas áreas de energias renováveis, eficiência energética, gestão de projetos, desenvolvimento organizacional, gestão e desenvolvimento de recursos humanos. Mais de 30 anos de experiência na prestação de respectivos serviços de consultoria em mais de 20 países.

### Esp. Lothar Hoppe

Integration / Gopa\_Intec / GIZ | [lotharhoppe@outlook.com](mailto:lotharhoppe@outlook.com)

Engenheiro eletricitista com pós-graduação em eficiência energética e gestão de energia pela PUCRS. Com vasta experiência em: consultoria e auditoria nas áreas de eficiência energética, gerenciamento de energia, economia de energia e sistemas de energia renovável, instrutor e professor em energia renovável em empresas e instituições de ensino com SENAI, PUCRS e outras. Atua nas áreas de Solar térmica, fotovoltaica, eólica, biomassa e hidrogênio.

### Dra. Rosana Zacarias Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Integration/GIZ | [dominguesrz@gmail.com](mailto:dominguesrz@gmail.com)

Doutorado pelo Institut National Polytechnique de Grenoble-França- INPG; Bacharel, Licenciada e Mestre em Química pela UFMG. Especialista no projeto H2Brasil BR-AL (GIZ-MME) de cursos de capacitação, coordena projetos para criação de ação de novos produtos e serviços com equipes multidisciplinares em empresas (CEMIG, EMBRAER, Magnesita etc.) nas áreas de células a combustível, biomateriais e eletroquímica. Participa dos programas de Pós-Graduação -PPGIT/UFMG.

### Dr. Victor Nikolaus Bistrizki

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) | [bistrizki@ufmg.br](mailto:bistrizki@ufmg.br)

Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica pela UFMG, experiência em energia renovável, inovação de biotecnologias, tecnologias de hidrogênio, panorama de patentes.

### Me. Francisco Polatscheck

WordWise tradução simultânea e escrita | [wordwisebh@gmail.com](mailto:wordwisebh@gmail.com)

Mestrado em Língua Inglesa pela UFMG; Certificate of Proficiency in English (Cambridge); Coordenador de Intérpretes de Conferências (Port < > Ingl; Esp > Port/Ingl).



Por meio da:



MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA



Coordenação do curso:



# Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional

THORSTEN SCHNEIDERS, INGO STADLER, JULIAN DAVID HUNT,  
PAULO SMITH SCHNEIDER, MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ,  
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

---

Brasília-DF, 2023

## Objetivo do livro e proteção aos direitos autorais

Ressaltamos que o conteúdo do livro, segue uma estrutura textual de transcrição de aulas online, com formato didático e informal. A linguagem é acessível, para todos os profissionais, que estão tendo a primeira aproximação com o tema Hidrogênio Verde por meio dos cursos.

Como foram inúmeras solicitações para novas turmas, a coordenação geral dos cursos, avaliou a relevância de todo o conteúdo gerado no projeto, encarando a confecção dos 10 livros como uma oportunidade de democratizar esse conhecimento no Brasil.

Assim, a leitura desse livro, também deve ser feita com esse propósito: uma oportunidade de “ler/ouvir” esses grandes especialistas, durante uma aula sobre H<sub>2</sub>Verde. Por isso, o objetivo do livro é ter um caráter técnico, com uma abordagem didática das informações, conteúdos e exemplos ilustrativos, de fácil compreensão, com o propósito de garantir a aprendizagem.

O livro não substitui as publicações e referências acadêmicas sobre o assunto. Para isso, sugerimos conhecer o currículo lattes, a biografia, as publicações (livros e artigos), pesquisas e trabalhos técnicos (de universidades, laboratórios e empresas), desenvolvidos pelos professores conteudistas e especialistas, que são grandes referências no tema no Brasil e mundo.

Lembramos que todo o conteúdo reunido foi fruto de uma iniciativa inédita no país. Reforçamos que todo criador de uma obra intelectual tem seu direito autoral garantido sobre a sua criação. Esse direito é exclusivo dos autores (art. 5.º, XXVII, da Constituição Federal), constitui-se de um direito moral (criação) e um direito patrimonial (pecuniário). Segundo a Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, este material está protegido pela lei de direito autoral.

Solicitamos que qualquer reprodução, parcial ou integral, seja referenciada com a devida autoria e solicitada uma autorização dos autores.

Quanto às imagens utilizadas, suas fontes estão especificadas, e alertamos que o livro não é, e não pode, ser comercializado. O conteúdo é fruto da transcrição das aulas dos professores no Projeto H<sub>2</sub>Brasil, que tem o intuito de disseminar o conhecimento no Brasil. Seu uso é exclusivamente didático, utilizando as imagens para fins de estudo ou crítica sobre o assunto em questão.

## Apresentação

O contexto mundial de transição energética para uma economia com zero emissões de carbono prioriza o uso de energias renováveis como a solar, a eólica e a hídrica em oposição as oriundas de fontes fósseis. Entretanto, um dos desafios do uso de tais fontes surge pelo fato delas serem intermitentes e não armazenáveis e, portanto, devem ser utilizados localmente ou enviadas para uma rede de distribuição.

No Brasil, a capacidade de produção de energia a partir das fontes renováveis é enorme, podendo gerar, em certos momentos, um excedente de energia. O hidrogênio,  $H_2$ , surge então como uma forma de armazenar estas energias. O  $H_2$ , que é um vetor energético, pode ser obtido através de diferentes rotas, com baixa ou nula emissão de carbono. Caso, a energia usada seja renovável, o  $H_2$  produzido via eletrólise é denominado  $H_2$  Verde.

Em uma de suas ações, o **Projeto  $H_2$  Brasil Power-to-X** previu a capacitação dos futuros profissionais brasileiros que atuarão na cadeia do  $H_2$  Verde. Como foco da “**Componente 3 do Projeto**” (**Educação Profissional e Superior para o Hidrogênio Verde**), foram desenvolvidos cursos teóricos e práticos, desde a produção de  $H_2$  até seu uso final.

O objetivo dos cursos foi abordar desde o conhecimento básico fundamental até detalhar temas mais relevantes para contexto brasileiro. O intuito é a formação de um grande grupo capacitado, que será o futuro corpo docente do tema  $H_2$  Verde no Brasil. (Rede  $H_2$  Brasil). O público-alvo era professores (mestres e doutores) e instrutores nas áreas correlatas ao  $H_2$  Verde, tais como engenharia elétrica, civil, eletrotécnica, mecânica, mecatrônica, química, economia, gestão, TI, economia ou direito com experiência e conhecimento em energias renováveis ou afins.

Foram 1.176 participantes que tiveram a oportunidade de se capacitar, divididos em 11 turmas, num total de 120h de carga horária. As etapas EAD (online) abordaram desde a introdução até a aplicabilidade do  $H_2$  Verde no mercado. Já a etapa presencial focou nos cenários regionais para implantação de tecnologias relacionadas ao  $H_2$  Verde, por meio de visitas técnicas orientadas. Também foram ministrados 8 cursos, denominados *masterclasses*, com mais de 495 inscritos, com carga horária de 20h a 30h, no formato EAD (online).

Esse livro é produto dessas capacitações, que reuniu 23 professores doutores, em temas relacionados ao  $H_2$  Verde. Foi uma ação, inovadora e colaborativa, na criação de conteúdos, do Brasil e Alemanha. Assim todo o material didático dos cursos (transcrição de aulas, slides e apostilas) foi compilado, resultando no desenvolvimento de 2 coleções, com total de 10 livros didáticos do projeto  $H_2$  Brasil Power-to-X.

Expressamos nosso reconhecimento aos autores e toda equipe envolvida, pelo trabalho árduo e inédito. Esperamos que os livros possam contribuir e ampliar ações efetivas para o crescimento do  $H_2$  Power-to-X no Brasil.

### Klaus P. Albrechtsen

$H_2$  Brasil Power to X - Programa de Parceria Alemã-Brasileira  
Componente: Formação Profissional e Superior para Hidrogênio Verde

## Sumário

<b>1. Avaliação da Viabilidade do Projetos e Países Exportadores</b>	<b>9</b>
<b>2. Países importadores e exportadores</b>	<b>18</b>
<b>3. Mercado Internacional de Hidrogênio</b>	<b>46</b>
<b>4. Regulamentação</b>	<b>58</b>
<b>5. Contrato de carbono por diferença</b>	<b>74</b>
<b>6. Perspectivas para o Mercado Nacional e Internacional</b>	<b>78</b>
<b>Considerações Finais</b>	<b>118</b>
<b>Referências</b>	<b>119</b>

## 1. Avaliação da Viabilidade do Projetos e Países Exportadores

Neste livro, discutiremos a avaliação de viabilidade de projetos, mercados internacionais de hidrogênio, perspectivas para o mercado nacional e internacional, e análise de ciclo de vida das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de hidrogênio. Como profissionais e pesquisadores, precisamos avaliar se o hidrogênio é uma solução interessante para os problemas de descarbonização e fornecimento de energia. Precisamos saber se vale a pena apostar no hidrogênio como fonte de energia, tanto para produzir no Brasil, quanto para exportar para outros países.

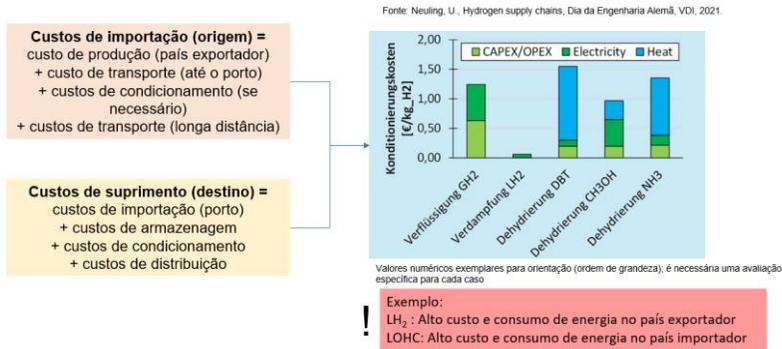
Vamos avaliar a viabilidade de projetos para entender o que determina se um projeto é viável ou não. A GIZ e o SENAI estão muito interessados no Brasil como produtor de hidrogênio e no desenvolvimento de um mercado para produtos que possam ser trocados com outros países. Nesse sentido, vamos discutir como identificar os países exportadores e se o Brasil é um bom parceiro para a busca de hidrogênio.

Também é importante avaliar o ponto de vista dos países importadores de hidrogênio, como a Europa e a Alemanha, que buscam o hidrogênio onde for possível. Será que vale a pena para o Brasil exportar hidrogênio?

É uma pergunta que precisamos responder. Você apostaria seu dinheiro em ações ou investimentos na indústria de hidrogênio hoje? São perguntas nas quais precisamos embarcar e refletir juntos. A ideia é que possamos avaliar os prós e os contras do uso do hidrogênio como fonte de energia e identificar as possibilidades e desafios para o Brasil nesse mercado.

Nessa seção, vamos falar sobre as formas de transporte do hidrogênio para outros países. É importante lembrar que o custo do abastecimento para quem importa é uma preocupação para os países europeus, por exemplo. A figura apresentada no texto mostra as opções de transporte do hidrogênio na forma gasosa ou líquida. É possível também utilizar a amônia e outros compostos que contenham hidrogênio como

transportadores. Cada uma dessas opções terá um custo embutido diferente.



LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carriers (transportadores de hidrogênio orgânico líquido)

Figura 1: Os custos ocorrem no país exportador e importador. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O transporte na forma líquida apresenta um alto custo de consumo de energia no país exportador, ou seja, o Brasil. Se o Brasil quiser exportar hidrogênio na forma líquida, será necessário contabilizar o custo da liquefação. Além disso, existe o que se chama de LOHC, ou Liquid Organic Hydrogen Carrier, que é um transportador líquido orgânico para o hidrogênio. No entanto, a quebra do composto orgânico terá um alto custo no destino. É importante lembrar que cada uma dessas opções tem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na hora de avaliar a viabilidade de um projeto de exportação de hidrogênio.

## 1.1. Custos do hidrogênio

Os custos nivelados são indicadores para avaliação da eficiência econômica e competitividade da tecnologia; eles podem medir quantitativamente a viabilidade econômica de uma determinada tecnologia, e são frequentemente usados como um indicador para avaliar a competitividade de diferentes tecnologias de geração de energia.

Semelhante ao conceito de Custo Nivelado de Energia (LCoE), que se refere ao custo de geração de eletricidade por unidade de energia, o

LCOH refere-se ao custo de produção de hidrogênio por unidade de hidrogênio.

Se o preço de mercado do hidrogênio for igual ao custo médio de produção de hidrogênio ao longo da vida de um projeto, o investidor alcançará o ponto de equilíbrio em um projeto de investimento.

$$\text{LCoH} = \frac{(\text{CAPEX} + \text{OPEX} + \text{DECEX})}{\text{(Quantidade total de H}_2\text{ )}}$$

(\$/kg)

CAPEX: Valor total dos investimentos  
 OPEX: Custo global durante o ciclo de vida do projeto  
 DECEX: Total de despesas de desativação

Figura 2: *Custo nivelado do hidrogênio (LCoH)*. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A avaliação do valor do hidrogênio é uma tarefa complexa que envolve vários fatores. O preço puro e simples não é suficiente para trazer a complexidade do sistema. Por isso, outras métricas como os custos nivelados são importantes. O custo nivelado é calculado dividindo-se o custo operacional dos equipamentos pelo custo operacional da energia. No caso do hidrogênio, a equação muda um pouco, pois é considerada a produção de hidrogênio em vez de sua utilização. É necessário contabilizar o custo de capital, o custo operacional e o custo de descomissionamento. O custo nivelado do hidrogênio é um indicador importante para avaliação de eficiência econômica e competitividade.

É importante achar um ponto de equilíbrio entre o custo alto da produção de hidrogênio e o ganho que se tem com sua utilização, que deve ser compensado pelo baixo carbono emitido. É necessário impor barreiras para o uso de combustíveis fósseis, para que o Hidrogênio Verde se torne uma opção mais viável. O Hidrogênio Verde é mais caro do que os combustíveis fósseis, mas sua utilização pode trazer benefícios ao meio ambiente e à economia, desde que haja políticas públicas e incentivos para seu uso.

**Pensemos em um projeto H<sub>2</sub> verde do começo ao fim...**

Vamos tentar identificar os aspectos técnicos e econômicos relevantes com impacto sobre a viabilidade, não se trata apenas de custos ou requisitos técnicos.

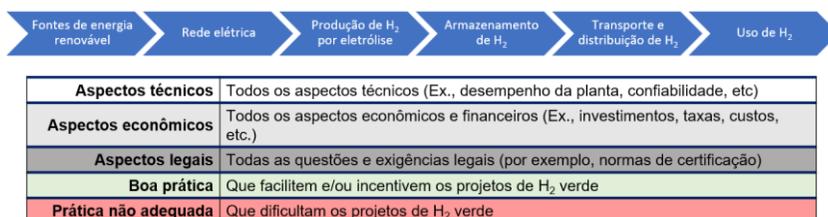


Figura 3: projeto H2 verde. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Aqui temos uma sequência de avaliações que passam pela fonte de energia renovável, pela transformação do hidrogênio e chegando até o seu uso final. Temos também aspectos técnicos, econômicos e legais que precisam ser considerados durante todo o processo. No entanto, um ponto importante que merece atenção é como definir o que é uma boa prática e o que é uma má prática, e como classificar isso.

Durante todo o processo de produção e uso do Hidrogênio Verde, é importante considerar as boas práticas para garantir a eficiência e segurança do processo, além de reduzir impactos negativos no meio ambiente. Alguns exemplos de boas práticas incluem o uso de fontes de energia renovável para produzir o hidrogênio, o armazenamento adequado do gás, o uso de tecnologias eficientes e a adoção de medidas de segurança. Já as más práticas, incluem a utilização de fontes de energia não renováveis, a falta de segurança no armazenamento e transporte do hidrogênio, entre outros fatores que podem comprometer a eficiência e segurança do processo.

Portanto, é fundamental que haja uma avaliação criteriosa dos aspectos técnicos, econômicos e legais, além da consideração das boas práticas em todas as etapas do processo de produção e uso do Hidrogênio Verde. Somente dessa forma será possível garantir a eficiência e segurança do processo, além de contribuir para a redução dos impactos negativos no meio ambiente.

## 1.2. Fontes de energia renováveis

Para produzir Hidrogênio Verde, é preciso ter fontes de energia renovável, caracterizadas por curvas de geração, intermitência, disponibilidade e capacidade, entre outras características técnicas. Além disso, a classificação dessas fontes renováveis pode variar de acordo com a visão política e econômica de cada país. Por exemplo, a Europa considera a energia eólica e solar como fontes capazes de produzir Hidrogênio Verde, enquanto fontes agrícolas, como a cana-de-açúcar, podem não ser classificadas da mesma forma.

Fontes de energia renovável	Rede elétrica	Produção de H <sub>2</sub> por eletrólise	Armazenamento de H <sub>2</sub>	Transporte e distribuição de H <sub>2</sub>	Uso de H <sub>2</sub>
<b>Aspectos técnicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quais são as características da fonte de geração de ER: curva de geração, intermitência, disponibilidade, horas de carga, capacidade disponível?</li> <li>Qual é a qualidade da geração da FER?</li> <li>Está em um local remoto, longe ou próximo da planta de eletrólise?</li> </ul>				
<b>Aspectos econômicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O que é LCOE de fonte de ER?</li> <li>Contrato: PPA, lavas de transação</li> <li>Quais são os custos de balanceamento de portfólios (fontes de ER)</li> </ul>				
<b>Aspectos legais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Que parte da produção de ER pode ser utilizada (por ex. compartilhada ou carga de base)?</li> <li>É possível usar várias fontes de ER (por ex. Eólica + solar + hidrelétrica + armazenamento)?</li> <li>Há alguma exigência relativa à certificação (por exemplo, ER recém instalado e exclusiva para a planta de eletrólise)?</li> </ul>				
<b>Boa prática</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regra básica: o eletrolisador deve operar acima de 3.000 hora de carga completa por ano</li> <li>Fornecimento de energia elétrica de diferentes fontes de energia renovável</li> </ul>				
<b>Prática não adequada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O funcionamento apenas com excesso de energia renovável não permite horas de carga total suficientes</li> </ul>				

Figura 4: Fontes de energia renováveis. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Na produção de Hidrogênio Verde é importante considerar aspectos econômicos, como o custo nivelado de produção, semelhante ao custo nivelado de produção de energia. Além disso, os aspectos legais também são importantes, mas exigem conhecimentos específicos na área de contratos.

As boas práticas para produção de Hidrogênio Verde envolvem a utilização de eletrolisadores funcionando em período contínuo, com alta disponibilidade. No entanto, isso depende da energia renovável utilizada, o que pode levar a más práticas, como a falta de disponibilidade de energia solar ou eólica, o que acaba repercutindo na produção do hidrogênio.

Em resumo, a viabilidade da produção de Hidrogênio Verde depende de diversos aspectos técnicos, econômicos, legais e políticos, além da disponibilidade de fontes de energia renovável capazes de alimentar os eletrolisadores de forma contínua e eficiente.

A rede elétrica é um ponto importante na produção de Hidrogênio Verde. No Brasil, temos uma rede interligada nacional eficiente e em constante

expansão, mas que apresenta seus gargalos, como problemas de transmissão que exigem investimentos caros e remuneração financeira baixa.

Fontes de energia renovável	Rede elétrica	Produção de H <sub>2</sub> por eletrólise	Armazenamento de H <sub>2</sub>	Transporte e distribuição de H <sub>2</sub>	Uso de H <sub>2</sub>
<b>Aspectos técnicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qual a capacidade da linha de transmissão disponível para as fontes de energia renovável?</li> <li>Existe alguma restrição às FER?</li> <li>Qual a capacidade da rede elétrica disponível no local planejado da planta de eletrólise?</li> <li>A planta de eletrólise requer uma nova linha de conexão à rede?</li> <li>É possível conectar o eletrolisador à uma rede interna (por exemplo, de uma fábrica)?</li> </ul>				
<b>Aspectos econômicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quais taxas da rede que devem ser pagas? Há alguma isenção para os eletrolisadores?</li> <li>Quais impostos? Há alguma isenção para os eletrolisadores?</li> <li>Quanto custa uma nova conexão à rede (por exemplo, taxas)?</li> <li>Existe algum custo de manutenção relacionado à rede?</li> </ul>				
<b>Aspectos legais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quais normas/requisitos/especificações técnicas da rede elétrica devem ser consideradas?</li> <li>Quais são os incentivos e deveres relativos à conexão a rede do eletrolisador?</li> <li>Quais são os requisitos para conexão à rede (aplicação, normas, taxas, etc.)?</li> <li>Quanto tempo leva para obter uma conexão à rede?</li> <li>Há alguma restrição à operação do eletrolisador devido a restrições da rede elétrica?</li> </ul>				
<b>Boa prática</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os eletrolisadores são isentos de taxas e impostos relacionadas a uso da rede elétrica</li> <li>Conexão rápida à rede elétrica</li> </ul>				
<b>Prática não adequada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eletrolisadores com altas taxas e impostos relacionadas ao uso da rede</li> <li>Longos períodos de tempo para conexão</li> </ul>				

Figura 5: Energia renovável transportada através da rede elétrica. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Uma boa prática é incentivar os eletrolisadores, que são equipamentos que produzem hidrogênio a partir da eletrólise da água. É importante também ter uma conexão adequada à rede elétrica. Já a má prática é a falta de incentivo. Ao começar a produzir energia renovável, é necessário ter incentivos para torná-la competitiva e viável economicamente.

Portanto, é fundamental investir na melhoria da rede elétrica e incentivar a produção de Hidrogênio Verde para que seja possível alcançar uma transição energética sustentável e eficiente.

### 1.3. Produção de H<sub>2</sub> a partir de energias renováveis

A produção de hidrogênio por eletrólise ainda é uma tecnologia pouco conhecida e não tão popularizada. Muitas pessoas nunca viram um eletrolisador na vida. Por isso, há uma falta de confiança na disponibilidade da tecnologia. Nós estamos falando de algo que é relativamente novo e complexo, e isso é um desafio para a sociedade em geral, não apenas para os técnicos que trabalham com isso.



<b>Aspectos técnicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disponibilidade e confiabilidade da planta</li> <li>Desempenho da planta de eletrólise</li> </ul>
<b>Aspectos econômicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qual é o valor do LCoH?</li> <li>Qual é o valor do CAPEX? O que os influencia?</li> <li>Qual é o valor do OPEX? O que os influencia?</li> <li>Qual é o valor da receita do H2?</li> <li>Qual é o valor da receita dos subprodutos (O2 e calor)?</li> </ul>
<b>Aspectos legais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Há alguma exigência legal para o funcionamento do eletrolisador (por exemplo, horas mínimas de carga total)?</li> <li>O que precisa ser considerado para a certificação do H2 verde?</li> </ul>
<b>Boa prática</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia de escala;</li> <li>Sistemas de eletrolisadores padronizados</li> <li>Alta confiabilidade e vida útil</li> </ul>
<b>Prática não adequada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalações de baixa capacidade instalada com altos custos fixos</li> <li>Baixa confiabilidade e vida útil</li> </ul>

Figura 6: Produção de H2 a partir de energias renováveis. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Para as boas práticas na produção de Hidrogênio Verde, a economia de escala é muito importante. Ela ajuda a reduzir custos, aumentar a confiabilidade e espalhar uma rede de dependências e suporte. Por outro lado, a má prática seria a instalação de baixa capacidade com altos custos fixos. Isso é preocupante, porque para ter uma instalação de alta capacidade, é necessário um alto capital, e isso pode restringir o mercado, tornando-o controlado por poucas pessoas com capital suficiente para investir. Isso é sempre um ponto de atenção para sistemas que dependem de poucas pessoas ou empresas com alto poder financeiro.

### 1.4. Armazenamento de H2 verde de curto a longo prazo

No armazenamento de hidrogênio, existem várias maneiras de fazer isso. Uma delas é a compressão, no entanto essa técnica é ineficiente e gasta muita energia. É necessário utilizar vasos de pressão muito poderosos para suportar a pressão de até 700 a 1.000 atmosferas, o que dificulta a recuperação da pressão utilizada no armazenamento. Além disso, há a possibilidade de integração energética, mas é uma fase complicada tecnicamente e que exige muitos recursos.

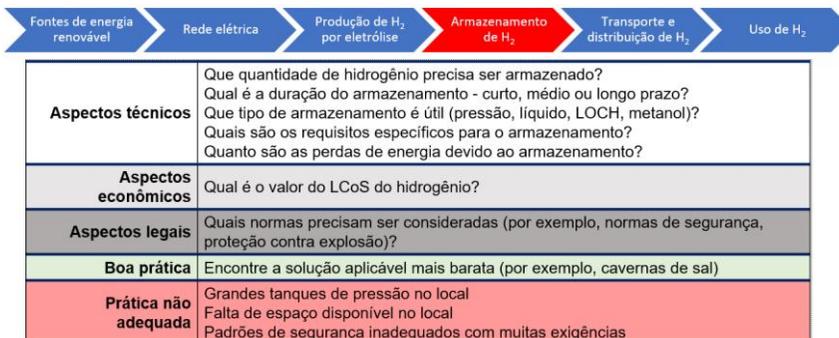


Figura 7: Armazenamento de H<sub>2</sub> verde de curto a longo prazo. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A boa prática é procurar soluções mais baratas e aplicáveis. Porém, é importante evitar grandes tanques de pressão no local, pois requerem um grande investimento, pouco reaproveitamento e ocupam muito espaço. Além disso, há muita dependência de outros sistemas e muitas conexões, o que pode ser difícil de conseguir. Muitas pessoas também têm medo de armazenar hidrogênio.

## 1.5. Transporte de H<sub>2</sub> para o usuário final

No transporte e distribuição de hidrogênio, podemos estar falando tanto do transporte do hidrogênio como molécula, como também do transporte dele associado a uma amônia ou algum outro elemento. Nesse processo, é importante levar em conta o custo energético do transporte e se não estamos utilizando modais que emitem CO<sub>2</sub>.



Figura 8: Transporte de H<sub>2</sub> para o usuário final. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Podemos fazer uma analogia com o transporte de refrigerantes em lata e em garrafa de vidro. Embora a reutilização da garrafa de vidro seja mais saudável do ponto de vista ambiental, é importante lembrar que transportar a garrafa de volta para o local de envasamento e lavá-la gera um gasto de CO<sub>2</sub> tão grande que acaba diluindo o benefício inicial de reutilização da garrafa.

Por isso, no transporte e distribuição do hidrogênio, é importante buscar soluções que emitam o mínimo ou nenhum CO<sub>2</sub>, já que o transporte é um processo caro e que pode gerar uma grande emissão de gases do efeito estufa.

## 1.6. H2 Verde: uso em diferentes setores

No uso do hidrogênio, finalmente chegamos ao final da cadeia, onde precisamos considerar quem vai usá-lo e qual será a infraestrutura necessária. Podemos utilizar o hidrogênio em sistemas que já existem, com pequenas modificações, ou precisamos considerar a possibilidade de fazer mudanças significativas para viabilizar sua utilização. É importante lembrar que mudanças podem ser assustadoras, mas é preciso ter em mente que elas podem ser necessárias para a evolução do setor energético.

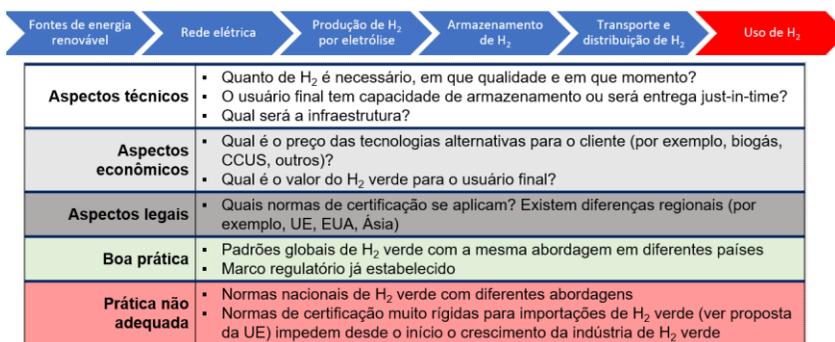


Figura 9: H2 Verde: uso em diferentes setores. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A transmissão do hidrogênio é um aspecto importante dessa cadeia, já que não podemos fazer mudanças de uma hora para outra. Será necessário um tempo para adaptação de tudo isso, e para isso,

precisamos estabelecer padrões e normas de padronização e aspectos legais que ajudarão a tornar viável toda essa cadeia proposta.

É preciso lembrar que existem aspectos encadeados e que precisam ser resolvidos em uma ordem específica para que a cadeia do hidrogênio seja viabilizada. É necessário um esforço para resolver um aspecto técnico que permita a viabilização técnica, mas é preciso ter em mente que mesmo que tenhamos uma descoberta genial, ela pode não ser viável devido a outras competições e implicações.

Um exemplo disso é a energia nuclear alemã, que após décadas de estudo e investimento técnico, está em vias de encerramento devido a uma opinião popular. Isso mostra a fragilidade da dependência de opiniões públicas que nem sempre são baseadas em aspectos técnicos e podem ser influenciadas por outros fatores, como políticos ou emocionais. É preciso considerar essa possibilidade ao desenvolver a cadeia do hidrogênio.

## 2. Países importadores e exportadores:

As FER (Fontes de Energia Renovável) são fundamentais, mas a infraestrutura e políticas públicas também são!

Como identificamos aos países importadores e exportadores?

Os países importadores não podem cobrir sua demanda de energia com FER locais.

Por exemplo, a Alemanha não possui recursos suficientes de FER e nem área para a instalação de FER para produzir mais de 80%.

Os países exportadores têm alto potencial de FER, a baixo custo de produção, superior ao que precisam para cobrir a sua própria demanda (atual e futura).

Em resumo: o que é necessário para ser um país exportador

- Potencial em FER, a baixo custo, que excede a própria demanda, e infraestrutura adequada no setor de energia;

- Abastecimento de água (caso contrário, haverá a necessidade de custo extra em dessalinização);
- Mão de obra qualificada para instalação de FER e infraestrutura de hidrogênio;
- Infraestrutura portuária adequada para terminais de exportação de gás;
- Estabilidade política (longo prazo) e confiabilidade comercial para investidores e stakeholders estrangeiros.

Aqui há uma série de questões que precisam ser consideradas quando se trata de fornecer energia ou Hidrogênio Verde para um país importador. Não se trata apenas da garantia do fornecimento suficiente, mas também da disponibilidade de fontes de energia renovável viáveis, disponíveis e de baixo custo, além de mão de obra qualificada, por exemplo.

É importante reconhecer que esses países não possuem todas essas fontes de energia, o que abre uma oportunidade para que fornecedores, como nós, possam fornecer essas soluções importantes. Portanto, a questão é como podemos fornecer Hidrogênio Verde de forma confiável e eficiente para esses países importadores.

## 2.1. Estratégia Nacional de Hidrogênio (Alemanha)

A Alemanha continuará a importar energia, segundo a sua perspectiva atual, já que as suas capacidades de geração renovável são limitadas, o que dificulta a produção da quantidade de hidrogênio necessária para a transição energética. Dessa forma, o país precisará intensificar a cooperação e estabelecer parcerias internacionais para o desenvolvimento do tema do hidrogênio.

Atualmente, há um consenso de que a Alemanha continuará a importar grandes quantidades de energia no futuro. Existem incertezas quanto ao volume e ao tipo de importação, se será hidrogênio (H<sub>2</sub>) ou produtos derivados de hidrogênio (PtX). A

Alemanha tem documentos que levantam essas questões e fazem perguntas importantes sobre a importação de hidrogênio: quanto será

importado, como será importado e de onde virá? E quais serão os produtos associados ao hidrogênio para o futuro, em que quantidades e de onde virão?



Figura 10: Estratégia Nacional de Hidrogênio. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Há uma separação entre o hidrogênio propriamente dito e os produtos derivados que contêm hidrogênio e passam por transformações para chegar a um produto final. Essas são questões importantes que precisam ser consideradas para a transição energética.

## 2.2. Critérios para avaliação de países com potencial de exportação de H2

### 2.2.1. Critério I: custo de geração de energia elétrica de FER

Vamos falar agora sobre os critérios para a geração de Hidrogênio Verde. Esses critérios são utilizados para selecionar as melhores opções de produção de hidrogênio, começando pelo aspecto técnico, que é a base para determinar o custo de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. É importante destacar que, antes mesmo de pensar em custos, é necessário vencer os desafios técnicos para viabilizar a produção de Hidrogênio Verde.



Figura 11: Critério I: custo de geração de energia elétrica de FER. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Além disso, outros critérios importantes são o potencial dos recursos disponíveis, a estabilidade política e regulatória e a estabilidade comercial. No caso do custo de geração de eletricidade, ele é um dos critérios fundamentais para a produção de Hidrogênio Verde, que deve ser gerado a partir de fontes de energia renovável de forma economicamente viável.

Na produção de Hidrogênio Verde, é importante identificar as regiões favoráveis para a geração de eletricidade de fontes de energia renovável com preços baixos. Regiões com alto potencial solar podem ser encontradas em locais como o norte da África, nordeste brasileiro, deserto de Atacama, Austrália e México, entre outros.

Já a disponibilidade de vento varia e nem sempre acompanha a localização das regiões solares. No entanto, há estudos que sugerem a integração das duas fontes de energia, já que a energia solar funciona melhor durante o dia e a eólica à noite.

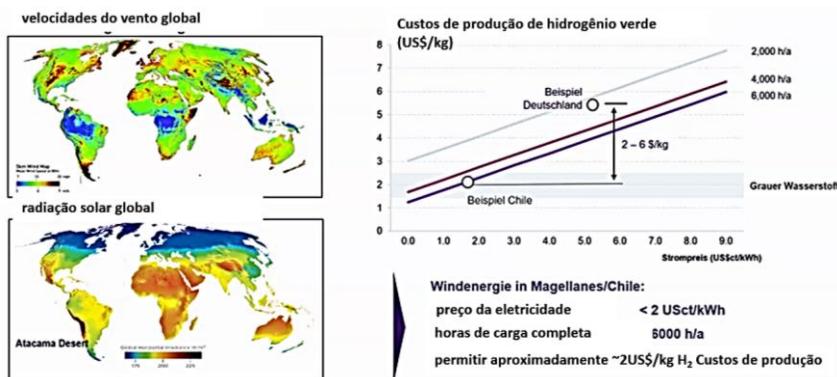


Figura 12: Melhores locais com alto potencial de geração de FER. Regiões favoráveis para a produção de H<sub>2</sub> possuem alto potencial de geração de eletricidade de FER com preços baixos. Fonte: Neuling, U., Hydrogen supply chains, Dia da Engenharia Alemã, VDI, 2021.

Esses fatores determinam o custo de produção do Hidrogênio Verde, já que depende dos custos da energia elétrica da fonte eólica e solar fotovoltaica. Por isso, é importante identificar as regiões com preços mais baixos para produzir Hidrogênio Verde com custos reduzidos.

E aqui podemos ver um mapa que mostra as regiões consideradas favoráveis para a produção de Hidrogênio Verde.

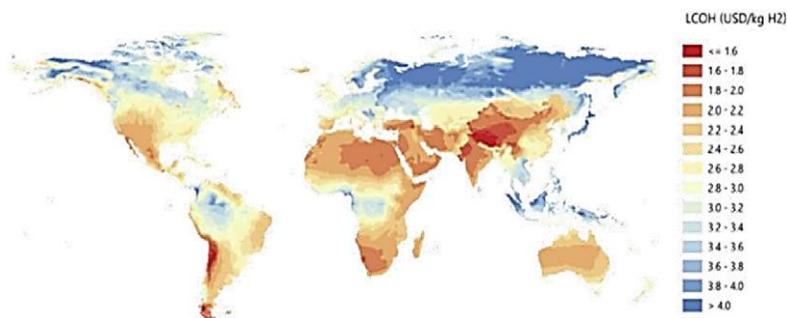


Figura 13: Produção de Hidrogênio Verde mais barato: O custo de produção atual do hidrogênio verde depende dos custos da energia elétrica da fonte eólica e solar fotovoltaica. Fonte: Sachverständigenrat für Umweltfragen, Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, junho 2021, p.48/fig.8.

Entre essas regiões, estão localidades com alto potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a região Nordeste do Brasil e países como Índia, Paquistão, Afeganistão, Irã, Iraque, Arábia

Saudita e China. Embora algumas dessas áreas sejam consideradas arriscadas para empreendimentos, elas possuem potencial para a produção de Hidrogênio Verde devido à disponibilidade de fontes renováveis de energia elétrica.

### 2.2.2. Critério II: Potencial de recursos, incluindo área, disponibilidade de água e infraestrutura.

O consórcio alemão realizou uma extensa pesquisa sobre o mercado global de P2X (publicado em 2021).

O Atlas P2X foi desenvolvido no âmbito do projeto financiado pelo Ministério Federal do Meio Ambiente. O projeto fornece uma avaliação científica dos possíveis desenvolvimentos no setor de transportes e suas interações com os outros setores.

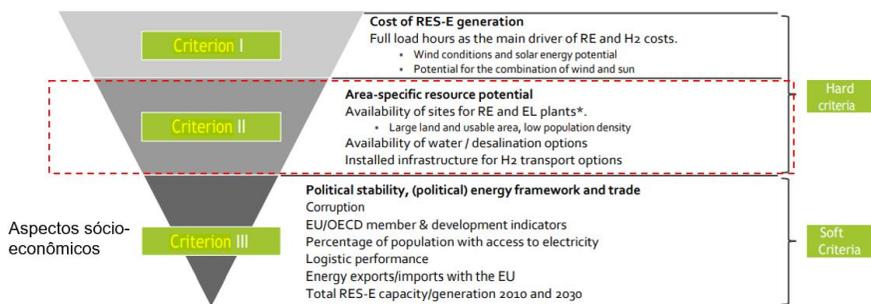


Figura 14: Critério II: Potencial de recursos, incluindo área, disponibilidade de água e infraestrutura.

Fonte: Opinião dos especialistas Schleswig-Holstein, produção e mercados de hidrogênio, 2020.

A ideia básica é: a Alemanha precisa importar produtos P2X!

A Fraunhofer é uma instituição de pesquisa alemã que realizou pesquisas sobre o mercado de Hidrogênio Verde e produziu um atlas das viabilidades de quem pode ser um potencial país exportador. Além de ter a fonte de energia renovável, é necessário ter acesso à água para produzir Hidrogênio Verde. Os locais ideais para sua produção estão localizados ao longo de mananciais de água.



Figura 15: PTX-Atlas - triagem global de potenciais países exportadores de P2X. Fonte: <https://devkopsys.de/> e via link direto para o atlas (ferramenta QGIS) em <https://maps.iee.fraunhofer.de/ptx-atlas/>.

No caso do Brasil, é importante garantir o fornecimento de energia renovável e acesso à água, que é encontrada principalmente na costa. Em outros locais, é necessário encontrar soluções para garantir acesso à água, como a possibilidade de produzir Hidrogênio Verde em locais distantes da costa e transportá-lo por linhas de transmissão. No entanto, é importante levar em conta as perdas inerentes ao processo de transmissão de energia elétrica, que podem diminuir a eficiência geral do processo.

Existem critérios para análise do potencial de áreas para gerar energia renovável e produzir Hidrogênio Verde. É necessário levar em consideração restrições locais, como a disponibilidade de água e a proximidade de mananciais, para determinar quais locais são viáveis para a produção de Hidrogênio Verde. Esses critérios estão disponíveis em um catálogo para análise do potencial de áreas para gerar P2X.

A tabela abaixo apresenta os catálogos de critérios que são utilizados para analisar o potencial das áreas que podem ser utilizadas para produzir Hidrogênio Verde. Esses critérios são levados a sério pelo lado do importador, pois são importantes para garantir a qualidade e viabilidade do produto importado.

Schritt	Ausschlusskriterium	Argument	Verwendete Daten
1.1	Landnutzung	Waldflächen, Siedlungsflächen, Agrarflächen, Wasserflächen, Permanente Schnee- und Eisflächen, gemischte Flächen	ESA Landcover
1.2	Hangneigung	> 5 ° (im 1 km Raster)	NASA SRTM3
1.3	Siedlungsgebiete	Bebaute Flächen inkl. 1 km Puffer	ESA Landcover, max mind
1.4	Bevölkerungsdichte	> 50 Einwohner/km <sup>2</sup>	GPW
1.5	Schutzgebiete	Natur- und Landschaftsschutz sowie potenziell kritische Lebensräume inkl. 1 km Puffer	WDPA, Critical Habitats
2a	Stromgestehungskosten Wind*	> 4 ct/kWh	GWA
2b	Stromgestehungskosten PV*	> 3 ct/kWh	GSA
3.1a	Distanz zu Häfen	> 500 km	WPI
3.1b	Distanz zu Pipelines	> 50 km	EIA, Harvard
3.2	Distanz zu Städten	> 200 km	simplemaps
3.3a	Distanz zur landeseigenen Küste	> 50 km	GADM
3.4a	Marine Schutzgebiete	Landesflächen entlang marinen Schutzgebieten inkl. 4 km Puffer	WDPA
3.3b	Distanz zu Binnengewässern	> 50 km	ESA
3.4b	Wasserstress	> Gering	WRI

Figura 16: Critérios para Análise do Potencial de Área para Geração de RE e P2X. Fonte: PtX-Atlas - DeV-KopSys (devkopsys.de)

Ao redor do mundo, existem áreas com potencial para a produção de Hidrogênio Verde, que devem estar próximas da costa ou de áreas de águas interiores e ter disponibilidade de água. Além disso, a geração de energia renovável é fundamental para a produção do Hidrogênio Verde, com destaque para a energia solar e eólica, que muitas vezes são combinadas para melhorar a eficiência do processo.

A análise do P2X Atlas – Distribuição de Áreas Potenciais Globais, revelou várias áreas potenciais para gerar PtX:

A Europa não foi considerada

### Resultados gerais para identificação de áreas potenciais

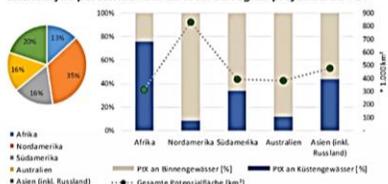
#### ■ Categorias de localização

- Fonte de água: 29% de águas costeiras | 71% de águas interiores
- Fonte de energia renovável: 38% solar | 36% híbrido | 26% eólica

→ Em suma, há cerca de 2,4 milhões de km<sup>2</sup> PtX de área potencial



#### distribuição percentual e área total da região preferida da PtX



#### Distribuição por recursos de energia renovável e fonte de abastecimento de água

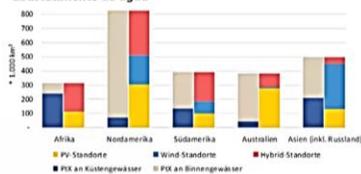


Figura 17: P2X Atlas - Distribuição de Áreas Potenciais Globais. Fonte: Fraunhofer IEE, Sessão Web das Partes Interessadas para a apresentação do Atlas P2X, 2021

O Brasil é um país com grande potencial para a produção de Hidrogênio Verde, porém não é o único. Concorrentes ao redor do mundo também estão investindo nessa tecnologia, tornando o mercado competitivo. É importante destacar que a produção de Hidrogênio Verde não será uma reserva de mercado, mas sim uma fonte de energia importante para a transição energética global.

A partir do mapeamento das áreas potenciais para produção de Hidrogênio Verde, percebe-se que as potenciais áreas P2X se concentram em poucos países, enquanto a Europa será uma importadora desse produto. Regiões como Sudoeste Asiático não são tão interessantes para a produção, enquanto Estados Unidos, Austrália, Argentina e Rússia são países potencialmente fortes nesse mercado.



Figura 18: Potencial área para P2X em km<sup>2</sup>. Fonte: Fraunhofer IEE, Sessão Web das Partes Interessadas para a apresentação do Atlas P2X, 2021

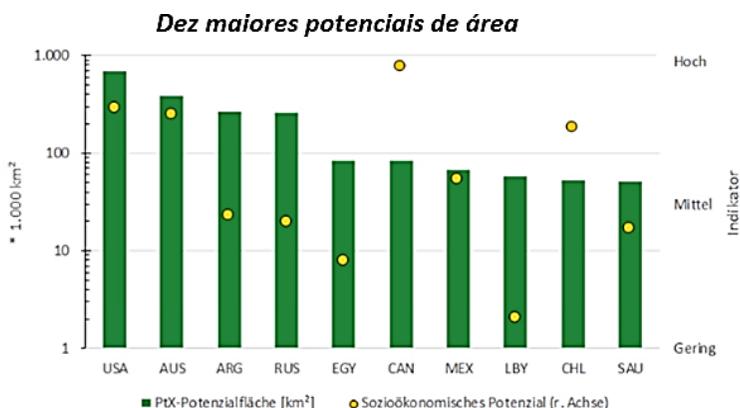


Figura 19: Dez maiores potenciais de área. Fonte: Fraunhofer IEE, Sessão Web das Partes Interessadas para a apresentação do Atlas P2X, 2021

Em resumo:

- 80% do potencial de terra identificado é distribuído entre dez países;
- Os EUA, Austrália, Argentina e Rússia mostraram os maiores potenciais;
- A Europa será importadora: os potenciais existentes na Europa são comparativamente baixos;
- Os potenciais no sudeste asiático também são comparativamente baixos.

No entanto, o Brasil não é nomeado como um dos potenciais produtores no relatório. Portanto, é importante lembrar que o país faz parte desse conjunto de países e não é a única solução para a produção de Hidrogênio Verde.

## P2X Atlas – Ordem de Mérito por Localização

Os países que possuem alto potencial de geração de energia renovável (FER) têm os custos mais baixos na produção de hidrogênio. De acordo com estudos realizados, os sítios costeiros têm um grande potencial de geração de hidrogênio por meio do processo de eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM), com projeção para o ano de 2050. A análise dos custos e volumes de produção de hidrogênio em nível global é importante para identificar as áreas mais favoráveis para a produção de H<sub>2</sub>.

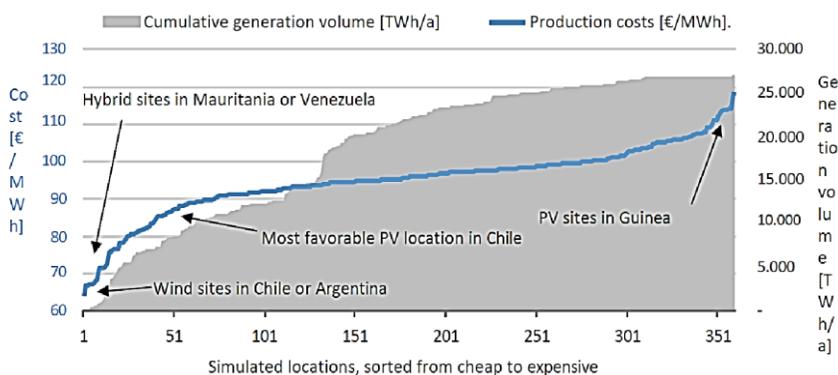


Figura 20: P2X Atlas - Ordem de Mérito por Localização. Custos de produção de hidrogênio e volumes de geração acumulados de sítios costeiros estudados globalmente (LH<sub>2</sub>, Eletrólise PEM, ano de referência: 2050). Fonte: Fraunhofer IEE, relatório P2X Atlas, 2021

Os países com maior potencial de geração de energia renovável têm preços mais baixos. Além disso, é importante considerar o custo do transporte. Na tabela apresentada, é possível verificar que o Chile e a Argentina possuem custos de produção mais baixos devido aos ventos fortes nas regiões sul desses países, próximas ao Polo Sul. Também é mencionado o potencial de sítios de produção de Hidrogênio Verde na Guiné.

### 2.2.3. Critério III: Estabilidade política e marco regulatório de energia

Além dos parâmetros técnicos, há outros fatores a serem considerados na produção de Hidrogênio Verde, como a estabilidade política e regulatória dos países. Isso é importante para garantir a segurança do

investimento, tanto em relação a guerras e instabilidade política, quanto em relação ao funcionamento interno dos países, como a corrupção e o acesso à eletricidade pela população.

Possíveis critérios para identificar os países exportadores H<sub>2</sub>.

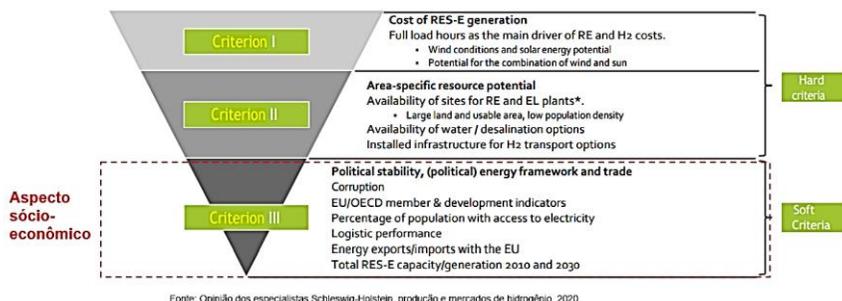


Figura 21: Critério III: Estabilidade política e marco regulatório de energia. Fonte: Opinião dos especialistas Schleswig-Holstein, produção e mercados de hidrogênio, 2020

Esse é um tema complexo que requer sensibilidade e conhecimento específico para ser ponderado de forma adequada. Todos esses fatores estão listados e devem ser levados em conta na escolha dos locais para produção de Hidrogênio Verde.

A produção de Hidrogênio Verde envolve muitos aspectos que precisam ser considerados. Além dos parâmetros técnicos, é importante levar em conta a estabilidade política e regulatória do país, a segurança, a corrupção e o acesso à eletricidade pela população.

Todos esses fatores estão listados no atlas da Fraunhofer, que considera a economia, sociedade, política, tecnologia, condições naturais e proximidade dos países exportadores com a Alemanha. É importante avaliar cada um desses aspectos para garantir que a produção de Hidrogênio Verde seja sustentável e viável.

Tópico	Indicadores considerados na avaliação
<b>Economia</b>	Produto Interno Bruto, Ambiente para Investimento, Dinâmica Econômica, Importação e Exportação de Bens e Serviços
<b>Sociedade</b>	Satisfação e paz, sistema de saúde, necessidades de energia, nível de escolaridade, sistema de saúde.
<b>Política</b>	Estado de direito, corrupção, legislação de redução de emissões de gases do efeito estufa
<b>Tecnologia</b>	Progresso tecnológico, inovação, infraestrutura de FER já existente, estrutura de fornecimento de energia, gastos com educação e pesquisa.
<b>Condições naturais</b>	Grau de poluição da água, reservas naturais, potencial de ER, tamanho do país, uso de recursos fósseis.
<b>Proximidade entre o país exportador e a Alemanha</b>	Infraestrutura logística, distância geográfica, relações econômicas, proximidade cultural

Figura 22: Aspectos socioeconômicos de localização para produção de H<sub>2</sub> e P2X.  
Fonte: Atlas Global PtX | Fraunhofer IEE (representação própria)

O potencial socioeconômico de um país é um importante indicador para a construção de uma infraestrutura de Hidrogênio Verde e P2X. A meta é avaliar o potencial exportador dos países com base em uma análise de países de alto nível. Porém, nem todos os possuem esse potencial socioeconômico, sendo que os países desenvolvidos são os maiores importadores.

Nem todos os países têm um bom potencial socioeconômico.

A região Norte da Europa possui um alto potencial, enquanto a América do Sul, em geral, possui uma avaliação socioeconômica de médio para baixo. É importante olhar para a realidade de cada país e entender seu potencial na produção e exportação de Hidrogênio Verde, sem ignorar suas limitações.

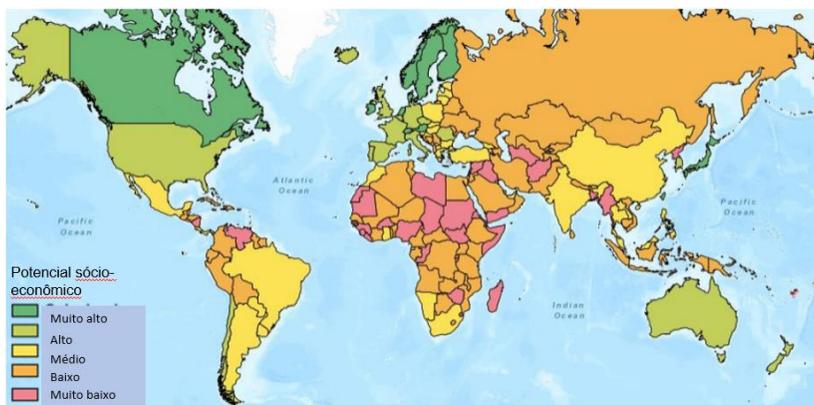


Figura 23: P2X Atlas – Avaliação Socioeconômica do País. Fonte: Fraunhofer IEE, Sessão Web das Partes Interessadas para a apresentação do Atlas P2X, 2021.

- Potencial máximo de geração global: 109.000 TWh LH<sub>2</sub>. Para comparação: consumo de gás natural Alemanha aprox. 1.000 TWh/a.
- Se os países com uma baixa classificação socioeconômica (baixa e muito baixa) forem excluídos (especialmente a África), o potencial de geração é reduzido.
- Potencial socioeconômico restante: 69.000 TWh LH<sub>2</sub> (corresponde a uma redução de 37% em volume em comparação com o potencial máximo de geração).

O potencial para a produção de hidrogênio está relacionado aos países que possuem alto potencial de energias renováveis, baixo custo de eletricidade e disponibilidade de água.

O atlas da Fraunhofer foi o primeiro projeto de pesquisa a procurar países exportadores que se adequassem à necessidade alemã. O Brasil é um país com um grande potencial devido à disponibilidade de pontes, interligação elétrica, relativa estabilidade política e possibilidade de investimento.

No entanto, é importante considerar os consumidores internos de hidrogênio para evitar depender exclusivamente do mercado externo. É preciso que haja um plano viável para o consumo interno de hidrogênio para que o país não fique à mercê das demandas dos importadores.

### 2.3. Outros estudos do mercado global de hidrogênio

A iniciativa do Bloomberg New Energy Finance (BNEF) vislumbra o uso de hidrogênio para o ano de 2050. Essa iniciativa é uma das diversas que estão surgindo para promover a adoção de fontes de energia limpa e sustentável, como o Hidrogênio Verde.

O BNEF é uma organização que fornece análises e informações sobre o mercado de energia e investimentos em tecnologias limpas. Seu objetivo é ajudar empresas e governos a tomar decisões informadas sobre investimentos em fontes de energia renovável.



Figura 24: Bloomberg New Energy Finance (relatórios da Bloomberg NEF (BNEF)).

Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A visão do BNEF para o Hidrogênio Verde em 2050 é uma previsão de longo prazo para o uso da tecnologia em todo o mundo. Isso demonstra a importância do Hidrogênio Verde como uma fonte de energia viável e a necessidade de sua adoção para alcançar uma economia mais sustentável e ambientalmente consciente. Sobre os relatórios da Bloomberg NEF (BNEF):

A Bloomberg New Energy Finance é uma empresa de consultoria que publica uma versão resumida de seus estudos gratuitamente.

Todos os resultados são baseados em uma ferramenta de modelagem de propriedade da BNEF para o mercado global de energia.

Não estão disponíveis informações detalhadas sobre os parâmetros considerados e a abordagem da modelagem. O estudo dá indicações sobre mercados e custos futuros. Entretanto, não é de se admirar que editores diferentes cheguem a resultados diferentes (até mesmo contraditórios), devido às suas diferentes suposições e métodos de cálculo.

É importante destacar que, mesmo com essas análises, ainda há muitas incertezas e especulações sobre o tema, e esses estudos servem para montar cenários e previsões para o futuro.

No contexto de produção de Hidrogênio Verde, é importante levar em consideração o custo nivelado de produção. Esse custo é calculado

levando em conta os valores de hoje, e para 2050, a projeção é que o custo esteja em torno de menos de 1,5 dólar por kg.

Esse valor é perseguido porque é referente ao custo da produção de hidrogênio por meio da reforma a vapor de metano, que é o processo mais barato atualmente. Para que os outros processos de produção de Hidrogênio Verde sejam competitivos, é necessário chegar a esse valor, ou então haver uma taxaço de carbono que aumente o valor da produção de hidrogênio a partir de metano.

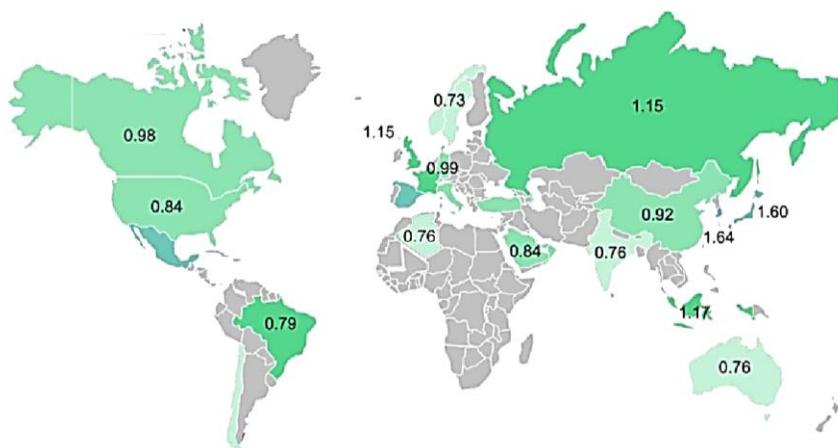


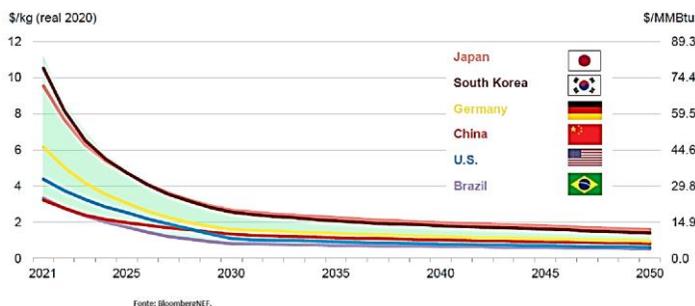
Figura 25: *Perspectiva para 2050: 0,8-1,6 \$/kg H2 possível na maioria das partes do mundo. Previsão BNEF: Custo nivelado da produção de hidrogênio verde de \$/kg H2 em 2050. Fonte: BloombergNEF, Hydrogen Economy Outlook, 2020, p.28.*

Além disso, é importante analisar as condições naturais de cada país, como a disponibilidade de energia renovável e água. Por exemplo, países com alto potencial de energia solar como a Austrália e Marrocos possuem custos mais baixos na produção de hidrogênio. Já o Canadá, que possui regiões agrestes e com muito gelo, tem custos maiores de produção devido à utilização da energia eólica. Os Estados Unidos, por sua vez, exploram bastante a energia solar fotovoltaica.

No Brasil, há um grande potencial de produção de Hidrogênio Verde devido à interligação elétrica já estabelecida e à disponibilidade de energia renovável. No entanto, é importante que haja um plano interno de consumo de hidrogênio para garantir a viabilidade do projeto de

exportação. É necessário levar em consideração também fatores socioeconômicos, como a estabilidade política e a corrupção, na análise de viabilidade de produção de Hidrogênio Verde em cada país.

A expectativa é de que, com a economia de escala, os valores de produção de hidrogênio diminuam cada vez mais, pois a tecnologia será aprimorada.



1 MMBTU = 293.07107 kWh, 1 kg H2 contém 33 kWh

Figura 26: LCoH de eletricidade renovável, período 2021-2050. Queda dos custos do hidrogênio no futuro. Fonte: BloombergNEF.

Quando falamos em produção de hidrogênio, não estamos considerando apenas a disponibilidade da fonte de energia renovável, mas também os processos envolvidos, como o eletrolisador, a forma de armazenamento e a logística de transporte. A redução do custo do hidrogênio depende não apenas da fonte de energia, mas também de todo o processo de produção e distribuição.

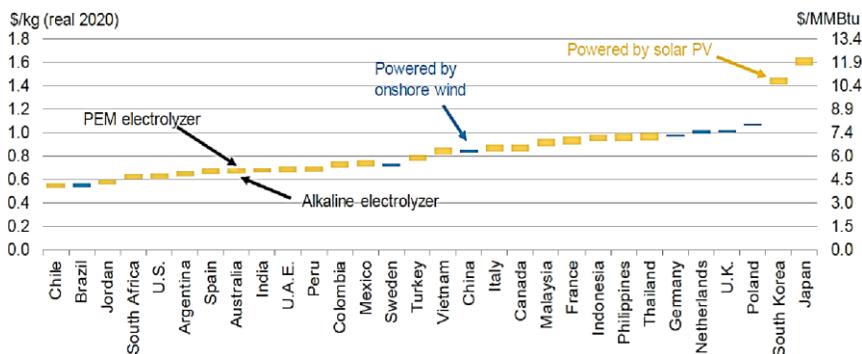


Figura 27: LCoH a partir de eletricidade renovável em 2050. A queda dos custos de hidrogênio no futuro, dependem da fonte de ER e do país. Fonte: BloombergNEF, 2022.

**Pressupostos:**

- Os custos do eletrizador convergem para os do estudo “Hydrogen: The Economics of Production from Renewables”
- Os custos de eletricidade derivados da atualização do LCoE 1H 2021 da BNEF (terminal web ), cenário médio.

No atlas da Fraunhofer, o Brasil aparece bem-posicionado em relação ao potencial de produção de Hidrogênio Verde. Segundo o estudo, o país apresenta uma combinação favorável de recursos naturais, como ventos e água, e uma infraestrutura elétrica já estabelecida.

Além disso, o custo de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, é mais baixo do que a partir de energia solar. Essa é uma observação importante que pode ser retirada não só do atlas da Fraunhofer, mas de outros estudos sobre o tema. O Brasil tem um grande potencial para se tornar um importante produtor e exportador de Hidrogênio Verde no futuro.

**Quando o H2 verde poderia competir com o H2 azul?**

Em breve, o hidrogênio azul (do gás natural com captura de carbono) será mais caro do que o Hidrogênio Verde.

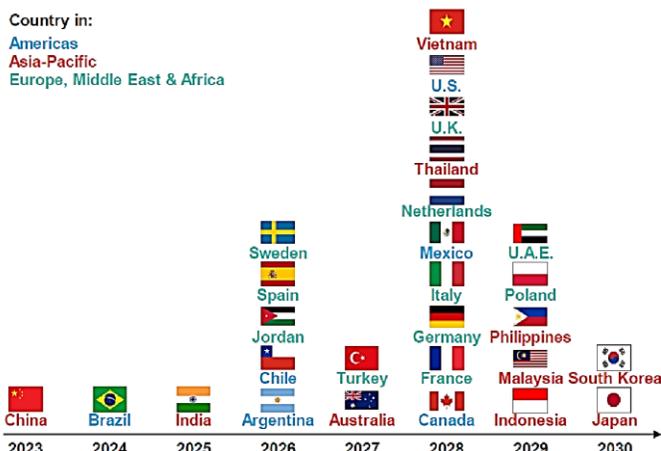


Figura 28: O hidrogênio azul (do gás natural com captura de carbono) será mais caro do que o hidrogênio verde. Fonte: BloombergNEF, 2022.

Existem muitos dados importantes a serem considerados quando se trata de Hidrogênio Verde. Um ponto importante é que a captura e sequestro de carbono ainda não é uma solução viável e ainda não existe uma viabilidade técnica clara para essa tecnologia. As opções de Hidrogênio Verde são muito mais viáveis do que as opções de hidrogênio azul que dependem da captura e sequestro de carbono.

Quando o H2 verde poderia competir com o H2 "cinza"? Os custos das FER e dos eletrolisadores diminuem enquanto o preço do gás natural e os custos de CO2 aumentam.

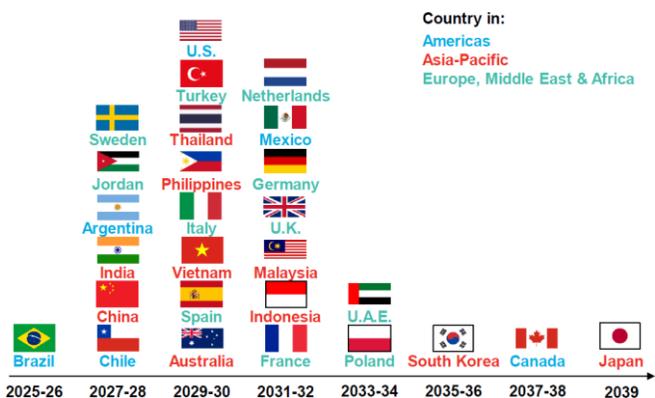


Figura 29: Quando o H2 verde poderia competir com o H2 "cinza"? Como próximo passo, mesmo o hidrogênio cinza (de gás natural) será mais caro do que o hidrogênio verde. Fonte: BloombergNEF, 2022.

Quando o H2 verde poderia competir com o gás natural? Finalmente, o hidrogênio verde se tornará mais barato do que o próprio gás natural. Os custos das FER e dos eletrolisadores diminuem enquanto o preço do gás natural e os custos de CO2 aumentam.

A BNEF é uma consultoria líder no setor e é responsável por fazer modelos supercomplexos para avaliar a viabilidade de várias fontes de energia. Eles afirmam que o Hidrogênio Verde será mais viável do que o hidrogênio azul de fonte fóssil. O Brasil tem uma posição interessante no cenário mundial, pois tem fontes de energia renováveis e um mínimo de industrialização, além de estabilidade de rede e insumos de forma geral.

Country in:

Americas

Asia-Pacific

Europe, Middle East & Africa



Figura 30: Quando o H2 verde poderia competir com o gás natural? Finalmente, o hidrogênio verde se tornará mais barato do que o próprio gás natural. Fonte: BloombergNEF, 2022.

## 2.4. Visão geral das opções de importação

Na parte do transporte do hidrogênio, existem diversas opções. Uma delas é o uso de dutos com hidrogênio comprimido. Já para o transporte marítimo, é necessário usar hidrogênio líquido, que fica a  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que pode parecer uma loucura, mas é uma opção em estudo. Também há os produtos que contêm hidrogênio, como a amônia, o metanol e os combustíveis sintéticos.

O Dutos e navios são as principais opções para importação de grandes quantidades em longas distâncias.

Dutos	Navio	Outros
Hidrogênio comprimido	LH <sub>2</sub> , LOHC, amônia, metanol, combustíveis sintético, etc.	Todas as formas possíveis
Condições:	Condições:	Condições:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predominantemente em terra (é necessária uma ligação terrestre ao país de exportação)</li> <li>• Em parte também offshore, com distâncias relativamente curtas e profundidade de água rasa (por exemplo, "NordStream")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GH<sub>2</sub> - conversão necessária para aumentar a densidade energética</li> <li>• Muito flexível;</li> <li>• Infraestrutura portuária necessária</li> <li>• Capacidade limitada pelo tamanho do navio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Somente para aplicações específicas e em pequenas quantidades</li> <li>• Importação por trem, caminhão, avião, etc.</li> </ul>

Figura 31: Dutos e navios são as principais opções para importação de grandes quantidades em longas distâncias. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

É preciso avaliar se esses produtos serão transformados novamente em hidrogênio no destino final. Por exemplo, é possível utilizar a amônia como transportadora e depois transformá-la novamente em hidrogênio. No caso do metanol e dos combustíveis sintéticos, não é necessário transformá-los novamente. Essas são as opções que vão definir o caminho que a cadeia do hidrogênio irá percorrer.

Na imagem a seguir, são apresentadas algumas opções de transporte para o hidrogênio e seus derivados. Dentre as opções mencionadas, temos o metano em estado líquido e gasoso, metanol, amônia e outras transformações já conhecidas.

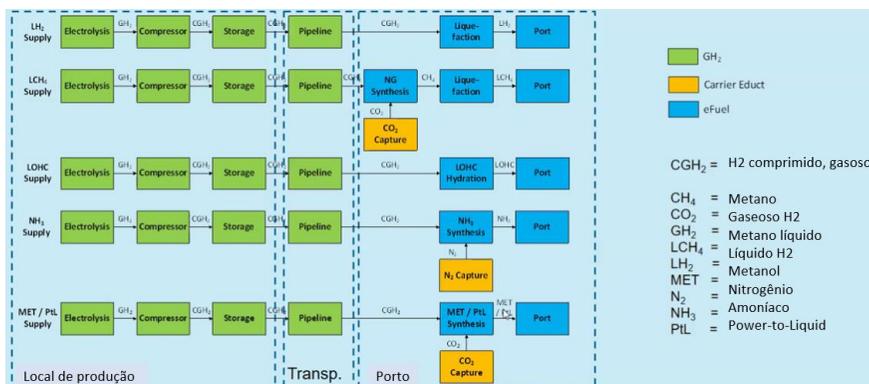


Figura 32: O caminho do hidrogênio – cadeias de suprimento de hidrogênio. Fonte: Neuling, U., Hydrogen supply chains, Dia da Engenharia Alemã, VDI, 2021.

É importante considerar qual é a melhor forma de transporte para cada uma dessas opções. O transporte por gasodutos é uma possibilidade, assim como o transporte marítimo. Cada opção possui suas particularidades e desafios que devem ser analisados para garantir a eficiência da cadeia produtiva do Hidrogênio Verde.

Ao se pensar em transporte de hidrogênio em longas distâncias, é importante considerar os dados apresentados neste mapa de custos de distribuição e transmissão.

		Costs				
		Distribution		Transmission		
		0-50 km	51-100 km	101-500 km	>1,000 km	>5,000 km
 Pipelines <sup>1</sup>	Retrofitted	City grid	Regional distribution pipelines	Onshore transmission pipelines	Onshore/Subsea transmission pipelines	N/A
	New	City grid	Regional distribution pipelines	Onshore transmission pipelines	Onshore/Subsea transmission pipelines	N/A
 Shipping	LH <sub>2</sub>	N/A	N/A	N/A	LH <sub>2</sub> ship	LH <sub>2</sub> ship
	NH <sub>3</sub> <sup>2</sup>	N/A	N/A	N/A	NH <sub>3</sub> ship	NH <sub>3</sub> ship
 Trucking	LOHC <sup>2</sup>	N/A	N/A	N/A	LOHC ship	LOHC ship
	LH <sub>2</sub> trucking	Distribution truck LH <sub>2</sub>	Distribution truck LH <sub>2</sub>	Distribution truck LH <sub>2</sub>	N/A	N/A
	Gaseous trucking	Distribution truck CH <sub>3</sub> <sup>3</sup>	Distribution truck CH <sub>3</sub> <sup>3</sup>	Distribution truck CH <sub>3</sub> <sup>3</sup>	N/A	N/A

1. Assuming high utilization
2. Including reconversion to H<sub>2</sub>; LOHC cost dependent on benefits for last mile distribution and storage
3. Compressed gaseous hydrogen

Figura 33: Hidrogênio como produto commodity. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Limites técnicos e de custo no transporte de longa distância:

- Os custos de distribuição são mais baixos ao usar gasodutos;
- Gasodutos não são viáveis por mais de 5.000 km;
- O envio é viável para transportar H<sub>2</sub> em longas distâncias > 1.000 km;
- No entanto, o envio de H<sub>2</sub> ou transportadora adiciona pelo menos mais US\$ 1 por kg de H<sub>2</sub>.

Um gasoduto pode se tornar inviável a partir de 5.000 km, devido aos altos custos de bombeamento e pressurização. Porém, é importante lembrar que a rede elétrica pode ser interligada e admitir dois sentidos, o que pode mudar a figura. Além disso, o transporte marítimo pode se tornar uma opção mais viável, mas é necessário que os custos sejam reduzidos.

## E os navios não são neutros em carbono?

Emissões relacionadas ao transporte: Exercício hipotético.

- As emissões de GEE do transporte marítimo e aéreo estão excluídas do Acordo de Paris
- 1 TEU (contêiner de 40 pés) tem cerca de 30 m<sup>3</sup>
- A 700 bar, há 42 kg de H<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>
- **Hipoteticamente** 1 TEU é 1.200 kg de H<sub>2</sub>
- O transporte de 1 TEU de Santos para Roterdã emite:

- 0,84 toneladas de CO<sub>2</sub>
- 13,5 kg de NO<sub>x</sub> = 4 toneladas de CO<sub>2</sub> eq
- E outros GEE
- Considerando apenas CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>:
- O transporte de 1,2t de H<sub>2</sub> gera cerca de 4t de CO<sub>2</sub> eq

Levantamos um exercício hipotético sobre o uso de hidrogênio em navios. O desafio é encontrar uma forma de produzir hidrogênio com baixa pegada de carbono para que a cadeia de valores seja limpa.

É importante lembrar que os maiores custos não estão apenas relacionados às emissões de carbono, mas também aos custos energéticos. É preciso decidir qual forma de hidrogênio produzir e se será líquido ou amônia, além de considerar a eficiência da ida e volta. Esses são aspectos importantes que precisam ser resolvidos para tornar viável o uso de hidrogênio em navios.

Na imagem seguinte, temos os números de projetos para o transporte marítimo do H<sub>2</sub> em andamento. Principalmente para o transporte de amônia na região da Ásia-Pacífico.

#### By segment



#### By region

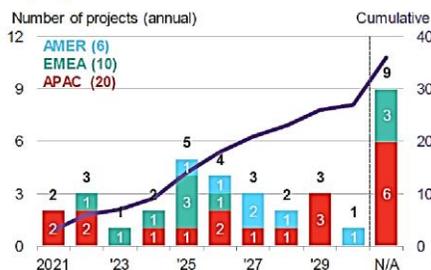


Figura 34: Projetos para o transporte marítimo do H<sub>2</sub>. Fonte: BloombergNEF

Resumindo os pontos-chave, podemos dizer que a distância é um fator determinante na escolha do método de transporte do hidrogênio: ele pode ser comprimido em gasodutos ou transportado em navios. Quando o hidrogênio é comprimido, é possível também transportá-lo localmente via terrestre.

Os gasodutos de gás natural podem ser uma opção, mas é importante ressaltar que ainda não estão totalmente adaptados para o transporte

de hidrogênio. Atualmente, é possível misturar até 20% de hidrogênio ao gás natural, mas se transportarmos 100% de hidrogênio, serão necessários cuidados diferentes, como o uso de válvulas e proteções específicas, além da prevenção de vazamentos. Também é importante considerar a pressão de operação do gasoduto. O gasoduto Bolívia-Brasil, por exemplo, trabalha a uma pressão de cerca de 90 atmosferas na origem.

O hidrogênio é comprimido porque isso permite que se tenha mais massa em um mesmo volume. Quando comparamos com o gás natural, a diferença é de 1 para 10: o mesmo volume ocupado por gás natural contém 10 vezes mais massa do que hidrogênio. Depois é feita uma adequação para ajustar o poder calorífico.

Entretanto, essa compressão é desfavorável para o hidrogênio, o que significa que será necessário trabalhar com pressões mais altas ou bombear mais. Quando se bombeia, o custo é dado pelo volume, e o objetivo é conseguir colocar mais massa no mesmo volume em função da pressão. No caso do hidrogênio, isso é bastante desfavorável.

Portanto, ainda há incertezas relacionadas aos custos ligados à montagem dessa cadeia de transporte de hidrogênio.

## 2.5. Avaliação das cadeias de suprimento de hidrogênio: H2 líquido

Ao avaliar uma cadeia de suprimento de hidrogênio líquido, é importante considerar as fontes de energia renovável disponíveis, como a energia hídrica. No entanto, no Brasil, o uso da energia hídrica para produção de hidrogênio é sensível devido aos problemas de abastecimento que já existem. Por isso, na Europa, o foco é no uso de fontes renováveis adicionais para a produção de hidrogênio, sem interferir na matriz energética atual.

Após a produção, o hidrogênio líquido precisa ser armazenado em grandes plantas e transportado em navios para ser distribuído e utilizado na economia. No entanto, o custo total desse processo é alto, estimado atualmente em cerca de 4 dólares por kg de hidrogênio.

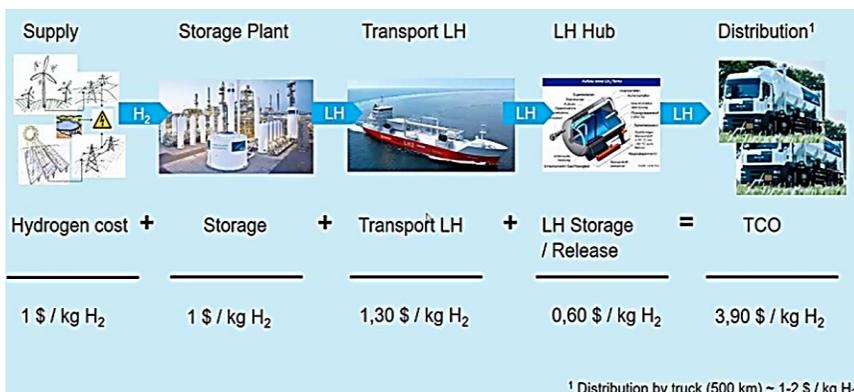


Figura 35: Avaliação das cadeias de suprimento de hidrogênio: H<sub>2</sub> líquido. Valores numéricos exemplares para orientação (ordem de grandeza); é necessária uma avaliação específica para cada caso. Fonte: Bank, R., Power-to-X como base para a logística energética global, Deutscher Ingenieurtag, VDI, 2021

O objetivo é reduzir esse valor para cerca de 1 dólar por kg, o que representa um grande desafio para a viabilização dessa cadeia de suprimento.



Figura 36: Avaliação das cadeias de suprimento de hidrogênio: LOHC. Valores numéricos exemplares para orientação (ordem de grandeza); é necessária uma avaliação específica para cada caso. Fonte: Bank, R., Power-to-X como base para a logística energética global, Deutscher Ingenieurtag, VDI, 2021

Aqui é abordado o aspecto do produto e como sua forma pode influenciar na viabilidade da cadeia de hidrogênio. Quando o produto é líquido, é mais interessante, e um exemplo disso é a amônia, que pode ser utilizada como transportadora de hidrogênio.

Essa técnica é interessante porque toda a cadeia de produção e transporte do gás natural já está estabelecida e funciona bem em várias regiões do Brasil, como Nordeste, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul.



Figura 37: Avaliação das cadeias de suprimento de hidrogênio: LOHC Valores numéricos exemplares para orientação (ordem de grandeza); é necessária uma avaliação específica para cada caso. Fonte: Bank, R., Power-to-X como base para a logística energética global, Deutscher Ingenieurtag, VDI, 2021

A metanização do hidrogênio é uma técnica que pode ser utilizada para produzir um gás natural sintético a partir do hidrogênio. Essa é uma solução interessante, porque permite aproveitar toda a infraestrutura já existente para a produção e transporte do gás natural. Regiões como o Nordeste, o Rio de Janeiro e o Rio Grande do Sul já contam com sistemas de produção de gás natural líquido que poderiam ser adaptados para essa finalidade.

Transporte por metanol. Essa é uma variação interessante que não depende apenas do hidrogênio, mas sim do hidrogênio na forma de um produto.

A distância é um fator determinante para escolher a opção mais viável. É preciso fazer transportes sem emissão de carbono e há muitas opções disponíveis, mas também muita incerteza em torno dessas opções. Ter muitas opções pode parecer vantajoso, mas é importante lembrar que cada uma delas traz incertezas.

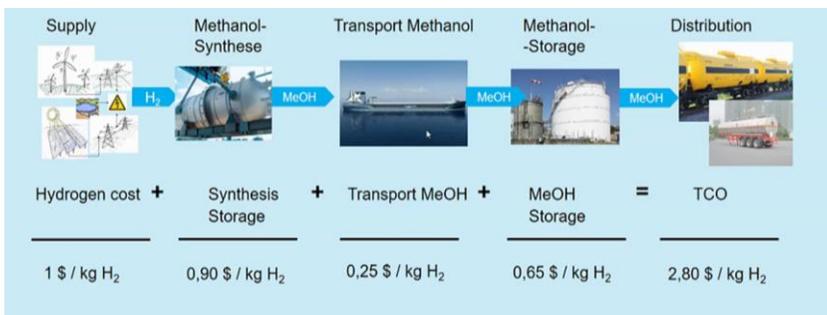


Figura 38: Avaliação das cadeias de suprimento de hidrogênio: metanol. Valores numéricos exemplares para orientação (ordem de grandeza); é necessária uma avaliação específica para cada caso. Fonte: Bank, R., Power-to-X como base para a logística energética global, Deutscher Ingenieurtag, VDI, 2021

Quando falamos em incerteza, não é para assustar ou ter uma visão negativa. Na engenharia, a incerteza é uma necessidade para imaginar variações e faixas de possibilidade. É natural trabalhar com a ideia do "mais ou menos", "pode ser" e "pode não ser".

## 2.6. Cenários de importação da UE e da Alemanha

Avaliando o mapa da Alemanha, quem são os possíveis exportadores de hidrogênio? O Brasil tem uma boa chance por alguns motivos. Na África do Norte, há instabilidade política que torna o investimento arriscado.

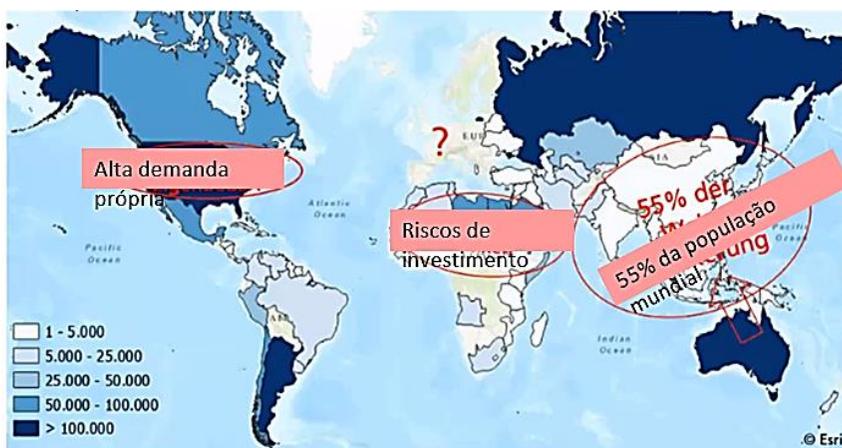


Figura 39: Avaliação Atual da Oferta de Importação. Fonte: Fraunhofer IEE, P2X Atlas, 2021.

Não é fácil escolher de onde importar!

**América do Norte:**

- Alto potencial para a produção de H<sub>2</sub> e P2X
- Alta demanda para os produtos H<sub>2</sub> e P2X
- Não se sabe as quantidades que estarão disponíveis para exportação.

**América do Sul:**

- Potencial muito alto para a produção de H<sub>2</sub> e P2X
- Longas distâncias para centros de consumo na Europa, América do Norte e Ásia.

**Europa:**

- Alta demanda para os produtos H<sub>2</sub> e P2X
- Possível importação da Rússia e do Norte da África por gasoduto.

**Sudeste Asiático:**

- Demanda muito alta para os produtos H<sub>2</sub> e P2X
- Baixo potencial para a produção de H<sub>2</sub> e P2X
- Importações esperadas em particular da Austrália, Rússia e Oriente Médio.

Na Ásia, mais da metade da população mundial tem um consumo interno forte, o que pode diminuir a chance de exportação. Os Estados Unidos, a maior economia mundial, também têm uma demanda muito alta. Portanto, o Brasil aparece como uma boa opção de exportador de Hidrogênio Verde para a Alemanha.

Vamos analisar um exemplo de Cenário de Importação de H<sub>2</sub> para uma Alemanha neutra em relação ao clima.

Não é fácil escolher de onde importar. A demanda de hidrogênio é coberta por aproximadamente 50% da produção doméstica (eletrólise) e 50% das importações. Existe a importação principalmente por gasodutos e possivelmente em pequena escala por navio de outros países europeus (alternativamente, também por gasodutos). Não há importações de longa distância por navio de outras regiões do mundo.

Dentro da Alemanha existem diversas formas de distribuição de hidrogênio. Em relação a isso, podemos tirar algumas conclusões. A Alemanha e a União Europeia estão em busca de parceiros para investir em projetos relacionados ao hidrogênio. Eles têm um mapeamento bastante interessante em diferentes níveis, e sabem que o técnico é importante, mas não é o único fator decisivo.

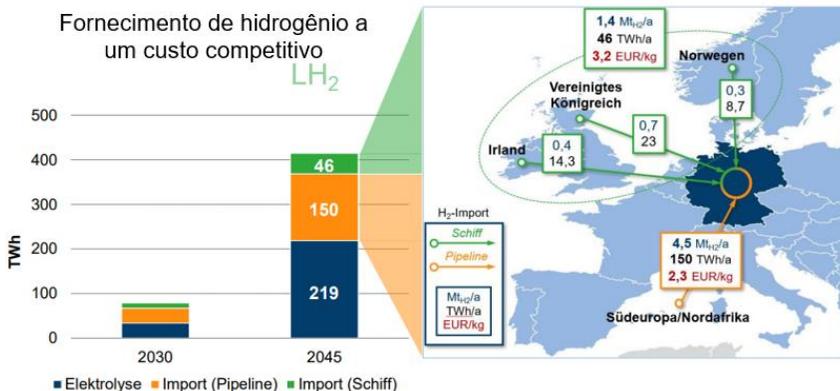


Figura 40: Exemplo: H<sub>2</sub> - Cenário de Importação para uma Alemanha neutra em relação ao clima. Fonte: Resultados detalhados Novos objetivos nos caminhos antigos? (fz-juelich.de)

Além disso, já estão pensando em projetos pilotos de importação e veem o Brasil como uma boa posição para isso. É importante ter em mente que os projetos de grande escala já estão em andamento e próximos de serem realizados.

- HyDeal Ambition (67GW) ..... Westem Europe
- Unnamed (30GW) ..... Kazakhstan
- Western Green Energy Hub (28GW) ..... Austrália
- AMAN (160GW)<sup>1</sup> ..... Mauritania
- Asian Renewable Energy Hub (140GW) ..... Austrália
- Oman Green Energy Hub (140GW)<sup>2</sup> ..... Oman
- AquaVentus (10GW) ..... Germany
- North2 (10GW) ..... Netherlands
- H2 Magallanes (8GW) ..... Chile
- Beijing Jingtang (5GW) ..... China
- Project Nour (5GW)<sup>3</sup> ..... Mauritania
- HyEnergy Zero Carbon Hydrogen (46GW)<sup>4</sup> ..... Austrália
- Pacific solar Hydrogen (3,6GW) ..... Austrália
- Green Martin (3,2GW) ..... Irlanda
- H2 Hub Gladstone (3GW) ..... Austrália
- Moolawatana Renewable Hydrogen Project (3GW)<sup>5</sup> ..... Austrália
- Murchison Renewable Hydrogen Project (3GW)<sup>6</sup> ..... Austrália
- Unnamed (3GW) ..... Namíbia
- Base One (2GW)<sup>7</sup> ..... Brasil
- Helios green Fuels Project (2GW) ..... Saudi Arabia



Figura 41: Os maiores projetos de hidrogênio verde do mundo. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

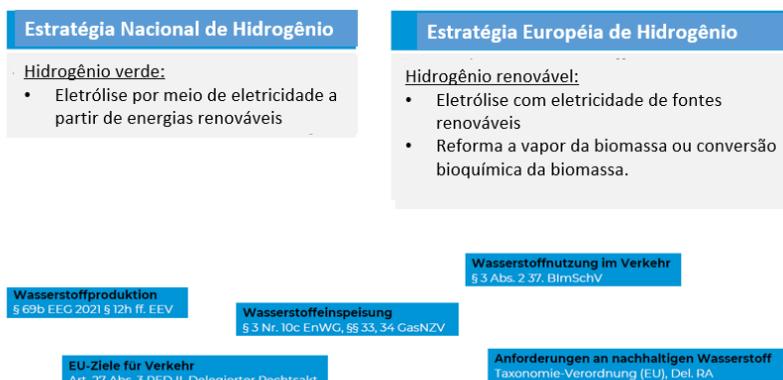
### 3. Mercado Internacional de Hidrogênio

Vamos abordar o mercado internacional de hidrogênio na perspectiva dos países europeus, com foco na Alemanha. Vamos discutir como esse mercado funciona, o arcabouço legal existente (ou a falta dele) e o que viabiliza esse comércio. Dividimos esse assunto em quatro tópicos que serão abordados com diferentes níveis de detalhes.

É importante mencionar que este tema é complexo e não se limita apenas à engenharia. Ele envolve também questões de mercado, governança, legislação, direito, futurologia e muito mais.

**Nota preliminar:** A criação de um marco legal e regulatório para uma economia do hidrogênio está atualmente em desenvolvimento. O conteúdo aqui apresentado tenta refletir o estado atual da discussão a nível nacional e da UE da melhor maneira possível. No entanto, ainda não está muito claro. Como a informação muda em intervalos curtos de tempo, a data do conteúdo deve ser verificada antes de qualquer uso posterior.

Esse mercado ainda não está consolidado e não tem uma legislação internacional definida. Na maioria dos casos, não existe uma legislação nacional também. Portanto, tudo ainda está para ser construído e tudo muda muito rapidamente. É importante ressaltar que as coisas estão mudando muito rapidamente nesse mercado, como foi visto em uma notícia atual lida hoje de manhã. Vamos falar mais sobre isso adiante.



➡ Há muito trabalho por separado e nem tudo se correlaciona.

Figura 42: Regulamentação existente no setor de hidrogênio (seleção). Ainda não há uma norma comum disponível. Stiftung Umweltenergierecht, Requisitos legais para hidrogênio verde, 2021.

Para que um mercado se estabeleça, é preciso que haja normas e regulamentações. No caso do mercado de hidrogênio, é necessário ter planos bem definidos para que a produção e o comércio sejam viáveis.

A Alemanha é um exemplo de país que já tem planos bem consolidados para o hidrogênio, embora ainda não estejam regulamentados.

O Brasil também tem um plano nacional de hidrogênio, mas ainda não estabeleceu metas concretas. Embora a matriz energética brasileira seja mais renovável do que a da Alemanha, isso não significa que o país não deva buscar o aprimoramento de suas políticas de energia renovável. Pelo contrário, é importante consolidar a posição de liderança nesse setor e fazer uso de vantagens competitivas.

A União Europeia também tem se dedicado ao desenvolvimento de tecnologias de energia renovável, com foco especial no hidrogênio. No entanto, é importante ressaltar que, para que o mercado de hidrogênio se estabeleça, é necessário que haja normas e regulamentações claras e que os planos sejam bem definidos.

### 3.1. "Diretiva de energia renovável" da UE: RED II

#### Metas da Europa:

- Em dezembro de 2018, a nova versão da Diretiva de Energia Renovável ("RED II") foi adotada em nível da UE e deve ser transposta para a legislação nacional dos seus países membros.
- Conteúdo: Promoção, objetivos e metas para o uso de energia renovável.
- Regulamentos sobre hidrogênio da RED II

Neste contexto, o artigo 25 de RED II estabelece o objetivo de alcançar uma quota de energia renovável no setor de transportes de pelo menos 14% até 2030. Além dos biocombustíveis, o hidrogênio produzido a partir de eletricidade renovável (Hidrogênio Verde) e os combustíveis sintetizados a partir dele também podem contribuir para este objetivo.

As condições para a produção e uso destes combustíveis renováveis estão especificadas no artigo 27 do RED II. Neste contexto, foram definidos critérios para a compra de eletricidade de plantas de eletrólise.

Os regulamentos até agora são apenas para o setor de transporte, mas concebíveis como um modelo para outras rotas de reciclagem (efeito de sinal).

Um aspecto importante a se destacar do texto é que a Alemanha tem documentos e planos que regulamentam a produção de Hidrogênio Verde. Um desses documentos é a Diretiva de Energia Renovável (RED 2), que estabelece critérios para a compra de eletricidade e a construção de plantas de eletrólise.

Essa diretiva já existe há bastante tempo e é atualizada periodicamente para acompanhar as mudanças no mercado de hidrogênio. É por meio desses documentos que a Alemanha e a União Europeia procuram estabelecer as bases legais para a produção e comercialização de Hidrogênio Verde.

### *3.1.1. RED II – Critérios para compra de eletricidade para uso nos eletrolisadores e para operação de plantas PtX*

Dentro das metas europeias, há critérios que visam a eficiência, como a origem e correlação geográfica e temporal. A correlação temporal tem a ver com a produção e utilização de energia renovável.

Além disso, é importante ressaltar os conceitos de adicionalidade e simultaneidade. A adicionalidade significa somar fontes renováveis às que já existem ou à energia já disponibilizada.

A simultaneidade está relacionada à correlação temporal entre produção e utilização de energia renovável. Esses conceitos serão abordados com mais detalhes posteriormente.

A elaboração e concretização destes critérios e a implementação na legislação nacional deve ocorrer na forma de um "ato delegado".

- **1. Origem renovável:**

A eletricidade utilizada para a produção de combustível deve ser gerada a partir de fontes renováveis de energia.

- **2. Correlação geográfica:**

A unidade de produção de energia com a qual o produtor tem um acordo bilateral de compra de energia (PPA) deve se correlacionar geograficamente com a produção de combustível.

- **3. Correlação temporal:**

A usina de geração de energia que emite a respectiva garantia de origem (GO) ou a usina com a qual o operador da planta de eletrólise tem um acordo de fornecimento de energia (PPA) deve se correlacionar em termos de sua produção de energia e a respectiva quantidade de energia utilizada com a produção de combustível em termos de tempo.

- **4. Elemento de adicionalidade:**

A eletricidade adquirida para a produção de combustível deve vir de fontes de energia cujo operador contribua adicionalmente para a expansão da capacidade de geração de energia de fonte renovável.

Podemos ver na imagem seguinte, os critérios da RED II na prática: simultaneidade da produção de energia elétrica e hidrogênio para alta utilização do eletrólizador.

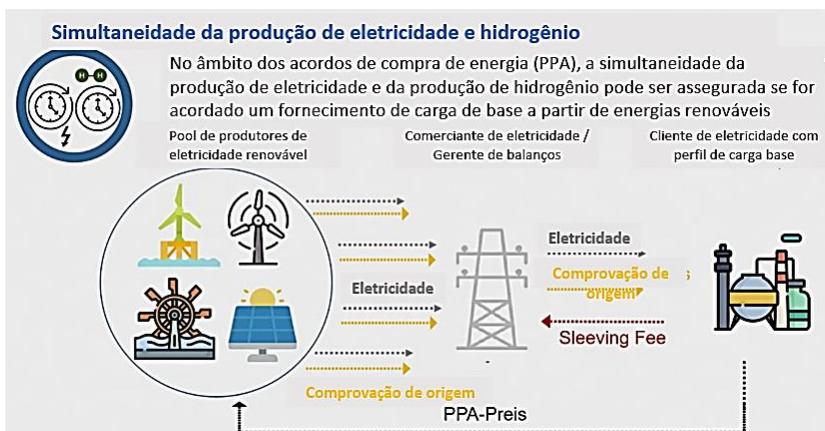


Figura 43: Os critérios da RED II na prática. Fonte: Schmidt, M., Politische und ökonomische Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära, FVEE Annual Conference 2021.

Adicionalidade é um conceito importante para a produção de Hidrogênio Verde. Basicamente, ele diz que uma fonte de energia renovável nova deve ser adicionada à matriz energética existente para garantir que o hidrogênio produzido a partir dela seja realmente verde.

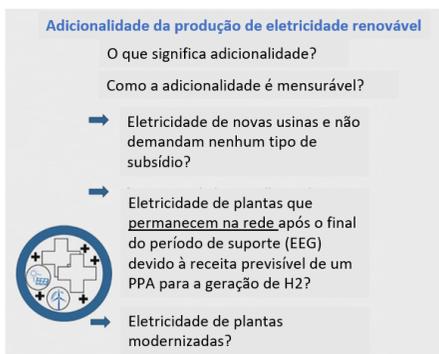


Figura 44: Os critérios da RED II na prática. Fonte: Schmidt, M., Politische und ökonomische Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära, FVEE Annual Conference 2021.

Em outras palavras, se a produção de hidrogênio é baseada em uma fonte de energia renovável já existente, isso não é considerado adicionalidade. A ideia é incentivar a entrada de novas fontes renováveis na produção de hidrogênio para garantir a sustentabilidade do processo.

Na regulamentação europeia, há dois princípios importantes a serem considerados: adicionalidade e simultaneidade. Adicionalidade significa que, ao introduzir uma nova fonte de energia renovável, ela não pode ser baseada em fontes antigas ou em um novo uso. Por exemplo, se quisermos produzir hidrogênio a partir de fontes renováveis, devemos utilizar uma nova fonte renovável para isso.



➔ Em horas de baixa carga (2.000 - 3.000 h/a), a viabilidade econômica dos eletrolisadores ainda é crítica em muitos casos

Figura 45: Os critérios da RED II na prática. Fonte: Schmidt, M., Politische und ökonomische Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära, FVEE Annual Conference 2021.

Já a simultaneidade considera a operação contínua e a necessidade de energia eólica offshore, energia fotovoltaica e eletricidade para garantir o suprimento de energia. A hidrelétrica, por sua vez, é considerada uma fonte controlada e não é levada em conta na simultaneidade, pois é utilizada para acumular energia e regular a oscilação dos outros tipos de energia.

Esses dois princípios são importantes critérios nas legislações relacionadas à produção de energia renovável na Europa.

### 3.2. Pacote da UE sobre os mercados de hidrogênio e gases descarbonizados (12/2021)

Em 15 de dezembro de 2021, a Comissão Europeia publicou propostas para o projeto do mercado de gás natural e hidrogênio. Essas são alterações à Diretiva do Gás (Diretiva Gás) e ao Regulamento de Acesso à Transmissão de Gás (ErdgasZVO). O anexo ao Regulamento de Gás Natural também contém propostas para complementar o Regulamento de Segurança de Fornecimento de Gás (Regulamento de Gás SOS da UE).

São criadas condições para uma transição do gás natural de fontes fósseis para gases renováveis e com baixo teor de emissão de CO<sub>2</sub>, em particular o biometano e o hidrogênio.

Essa iniciativa complementa às diretivas: Renewable Energy Directive (RED II) revisada, Energy Efficiency Directive (EED) revisada e a Emissions Trading System (EU ETS) revisada.

Assim, vemos a importância da legislação na transição energética para fontes renováveis. As normas são fundamentais para estabelecer critérios de produção de hidrogênio e definir a sua origem, considerando a adicionalidade e simultaneidade. A

União Europeia criou uma nomenclatura chamada "Baixo Teor de Emissão de CO<sub>2</sub>" para as fontes renováveis, que não necessariamente são isentas de CO<sub>2</sub>. O biometano, por exemplo, não é isento de emissão de CO<sub>2</sub>, pois há perda de metano ao longo do processo.

O Hidrogênio Verde também não é considerado totalmente livre de carbono. É importante que se entenda a necessidade de regulamentação para a transição energética, e que se leve em consideração as particularidades de cada fonte de energia.



**Assegurar condições estruturais apropriadas para os agentes do mercado.** Permite o desenvolvimento de um mercado europeu para gases renováveis e de baixo carbono. Proporciona um sistema de certificação e, ao mesmo tempo, garante a segurança energética, a liquidez do mercado e a competitividade.



**Fortalece e protege os consumidores.** Facilita a troca de fornecedores de energia, reforçando as disposições sobre direitos contratuais básicos, preços justos, e permitindo que os consumidores escolham gases renováveis e com baixo teor de carbono ao invés de combustíveis fósseis.



**Facilita a integração e o acesso** de gases renováveis e de baixo CO<sub>2</sub> à rede de gás existente



**Promove o planejamento integrado de redes** de eletricidade, gás e hidrogênio



**Melhora a resiliência** do sistema de fornecimento de energia e a segurança do fornecimento de energia na UE



Prevê o **estabelecimento de uma “Rede Europeia” de Operadores de Hidrogênio (ENNOH)** para promover o desenvolvimento de uma infraestrutura separada de hidrogênio, a coordenação transfronteiriça e a construção de interconexões, e para discutir regulamentos técnicos.

Figura 46: *Pacote da UE para os mercados de hidrogênio e gases sem carbono (12/2021)*. Fonte: *Nova estrutura da UE para descarbonização dos mercados de gás (europa.eu)*.

Aqui é abordado a importância de condições estratégicas de gestão para garantir a segurança do uso do Hidrogênio Verde. Mesmo que possa ser cansativo ler e entender todas as informações e regulamentações, é fundamental compreender que todos esses pontos estão relacionados à segurança.

A gestão eficiente, o planejamento cuidadoso e a colaboração em rede são essenciais para garantir a segurança de quem investe, opera e utiliza o Hidrogênio Verde. A segurança é uma preocupação de todos os envolvidos no processo e é crucial para o sucesso da transição para uma economia mais sustentável.

Na imagem abaixo, são apresentadas as definições de gases renováveis e de baixo teor de CO<sub>2</sub>. Os gases renováveis são obtidos a partir da biomassa, incluindo o biometano e o hidrogênio proveniente de fontes de energia renováveis.

## Definição de gases renováveis e com baixo teor de CO<sub>2</sub>:

**Os gases renováveis** são gases obtidos da biomassa, incluindo o biometano, e o hidrogênio de fontes de energia renováveis

**Os gases com baixo teor de carbono** (hidrogênio com baixo teor de carbono) causam pelo menos 70% menos emissões de gases de efeito estufa do que o gás natural fóssil durante todo o seu ciclo de vida <sub>2</sub>

➔ Abordagem tecnologicamente aberta, ou seja, sem restrições, por exemplo, à eletrólise de hidrogênio

Figura 47: *Pacote da UE para os mercados de hidrogênio e gases sem carbono (12/2021)*. Fonte: *Nova estrutura da UE para descarbonização dos mercados de gás (europa.eu)*.

É importante destacar que, mesmo tendo hidrogênio como combustível, é possível que ele não seja de baixo teor de CO<sub>2</sub>, já que depende da combinação de elementos. Para produzir Hidrogênio Verde, por exemplo, é necessário utilizar a eletrólise, processo que separa a água em hidrogênio e oxigênio utilizando energia elétrica de fontes renováveis.

Separação clara entre a regulação das redes de gás natural e hidrogênio. Os requisitos regulamentários para hidrogênio devem se aplicar a todos os operadores de redes de hidrogênio.

Novas características incluem privilégios para gases de baixo carbono, tais como o acesso prioritário da rede de gás natural, a garantia de capacidade fixa de plantas de produção conectadas ou taxas reduzidas para uso da rede.

Outro aspecto novo é que uma quota de mistura de 5% de hidrogênio nas redes de gás natural se aplica a nível da UE, que todos os operadores de sistemas de transmissão devem assegurar nos pontos de passagem de fronteira entre os estados membros, não devendo a mistura restringir os fluxos transfronteiriços de gás.

A partir de 31 de dezembro de 2030, os operadores de redes de hidrogênio devem utilizar o modelo de sistema de entrada/saída similar do setor de gás natural.

A separação clara entre regulação de redes de gás natural e hidrogênio é um aspecto importante da segurança na produção e distribuição do hidrogênio. Os requisitos regulatórios para o hidrogênio devem ser aplicados a todos os operadores de rede, visando garantir a segurança para quem investe, opera e utiliza o hidrogênio.

Na União Europeia, essa regulamentação já está bastante avançada, mas no Brasil ainda estamos longe disso. Atualmente, estamos focados na exportação de hidrogênio e não há discussões avançadas sobre o seu uso interno.

O nosso plano nacional de hidrogênio é um documento importante, mas ainda não foi implementado. Precisamos identificar potenciais consumidores e definir metas claras para a sua produção e seu uso interno.

As novas regras são projetadas para facilitar a entrada de gases renováveis e com baixo teor de CO<sub>2</sub> no sistema de rede de gás existente, removendo as tarifas de interconexão transfronteiriça e reduzindo as tarifas nos pontos de entrada.

Além disso, será criado um sistema de certificação para gases com baixo teor de CO<sub>2</sub> para complementar o trabalho iniciado com a certificação de gases renováveis na Diretiva de Energia Renovável.

Os contratos de longo prazo para o gás natural fóssil sem reduções de CO<sub>2</sub> não podem ser estendidos além de 2049.

Até agora apenas propostas -> discussão no parlamento -> adoção (não antes de 2023).

A transição energética é uma mudança gradual e planejada da matriz energética de um país, passando de uma base fóssil para uma base mais limpa e renovável. Um exemplo prático dessa transição é a não renovação de contratos de longo prazo para gás natural fóssil sem redução de CO<sub>2</sub> após uma determinada data. Isso indica que, embora esses contratos possam ser operados até a data especificada, eles não serão mais considerados como parte estável da matriz energética do país após 2050.

É importante ressaltar que a transição energética é um processo complexo e gradual que requer planejamento cuidadoso e sinalização clara do mercado.

Na prática, há desafios para implementar uma estrutura regulatória para o Hidrogênio Verde na Europa, especialmente por se tratar de um conjunto fragmentado em vários países independentes. Embora a Europa seja um grande acordo com leis e passaportes comuns, cada país tem sua própria câmara e parlamento.

**Desafio-chave para a Europa - moldar a estrutura regulatória para a expansão do mercado de hidrogênio verde (Delegated Act)**



Sem congestionamento da rede entre a geração de eletricidade e a produção de H<sub>2</sub>:  
 (...) deve assegurar que a unidade de produção de eletricidade com a qual o produtor tem um contrato bilateral de compra de eletricidade renovável se correlacione no tempo e na geografia com a produção de combustível. (...) Em outro exemplo, se houver um gargalo na usina, os combustíveis só devem ser contados como renováveis sem restrição se as unidades de geração de energia e produção de combustível **estiverem do mesmo lado do gargalo**.



Simultaneidade entre a geração de eletricidade e a produção de H<sub>2</sub>:  
 (...) deve assegurar que a unidade de produção de eletricidade com a qual o produtor tem um contrato bilateral de compra de eletricidade esteja correlacionada no **tempo** e na geografia com a produção de combustível. Por exemplo, combustíveis renováveis de origem não biogênica não devem ser considerados como renováveis irrestritos se forem produzidos em um momento em que a unidade de produção de eletricidade renovável contratada não esteja produzindo eletricidade de forma alguma



Adicionalidade da produção de eletricidade renovável:  
 (...) "Deve haver também um elemento de **adicionalidade**, significando que o produtor de combustível faz uma **contribuição adicional para o uso** de fontes renováveis ou **para seu financiamento**".

Figura 48: Os critérios da RED II na prática. Fonte: Schmidt, M., *Politische und ökonomische Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära*, FVEE Annual Conference 2021.

Portanto, é necessário que todos eles estejam de acordo para implementar uma estrutura regulatória para o Hidrogênio Verde. Esse é um grande desafio, semelhante aos desafios enfrentados por países federados, que também possuem estados com diferentes níveis de autonomia.

### 3.3. Recomendações para a concepção do ato delegado para formar a base do crescimento de mercado:

Para permitir que a Europa se torne líder mundial na competição pela inovação em Hidrogênio Verde e combustíveis sintéticos, as regulamentações precisam ser flexíveis e de fácil cumprimento, especialmente na fase inicial de entrada no mercado e de crescimento.

Conforme o mercado se desenvolve, as exigências podem ser aumentadas para exigir contribuições mais fortes para a estabilização

do sistema. Essa abordagem visa incentivar a entrada de novos participantes no mercado e promover a concorrência, ao mesmo tempo em que garante a estabilidade do setor a longo prazo.

Separação por fases:

- Entrada no mercado (até 6 GW de capacidade de plantas de eletrolisadores de acordo com a estratégia europeia de hidrogênio, equivalente a 1,5% da geração europeia de eletricidade – a partir de 2019 – para Hidrogênio Verde);
- Aumento do mercado (até 40 GW de capacidade das plantas de eletrolisadores em 2030, equivalente a 10% da geração europeia de eletricidade – a partir de 2019 – para Hidrogênio Verde);
- ampla difusão no mercado (após 2030).

A regulamentação é um tema importante quando se trata de Hidrogênio Verde na Europa. A recomendação é para que as regulamentações sejam simples e fáceis de cumprir, especialmente no início da entrada no mercado. Na França, por exemplo, após a crise do petróleo em 1970, foram criadas regras simples de eficiência energética e aqueles que as cumprissem ganhavam prêmios, o que levou a uma legislação mais complexa e entendida hoje por todos.

Outra proposta é a mistura de hidrogênio no gás natural para distribuição convencional, o que já vinha sendo feito na Europa, mas ainda não é uma mudança radical. No entanto, há uma tendência de destinar as reduções de emissões de carbono na indústria, que seria mais efetivo do que mudanças individuais em equipamentos.

O desafio agora é a construção de critérios claros para regulamentação, que ainda não estão estabelecidos. Isso mostra que o tema é complicado e exige cuidado tanto técnico quanto regulatório. Além disso, a Comissão Europeia apresentou uma proposta legislativa para reduzir as emissões de metano no setor energético, o que inclui regras para detectar e corrigir vazamentos de metano e limitar a ventilação e queima de gases.

## 4. Regulamentação:

A Alemanha tem uma lei antiga para a indústria da energia, chamada EnWG, que foi somada à lei da energia renovável, chamada EEG. Essa lei da energia renovável vem sofrendo muitas modificações, já que é uma área em constante evolução e novidades.

A Alemanha investiu muito na energia eólica e teve um avanço significativo na energia fotovoltaica, mesmo tendo pouca disponibilidade de sol. A fotovoltaica na Alemanha teve uma conotação diferente, sendo utilizada não apenas como fonte de energia, mas também como complemento de aposentadorias.

Foi estabelecido um incentivo para que as pessoas instalassem painéis fotovoltaicos em seus telhados e vendessem a energia produzida para a rede. Dessa forma, eles recebiam uma remuneração, o que se tornava um complemento de aposentadoria interessante.

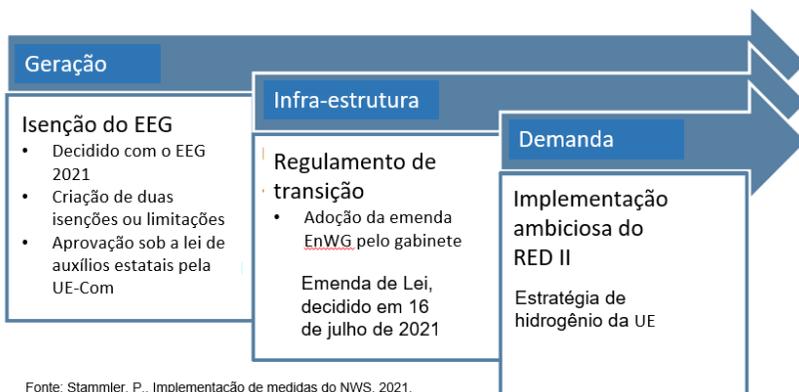
Esse exemplo pode ser uma inspiração para o Brasil, onde a geração distribuída permite apenas zerar o balanço de consumo e produção de energia. Com uma regulamentação adequada, poderíamos incentivar a instalação de painéis fotovoltaicos em telhados, permitindo que as pessoas recebessem uma remuneração pela energia produzida, tornando-se uma fonte de renda adicional.

### 4.1. Marco Regulatório para Tecnologias do Hidrogênio

Baseado na RED 2, no Brasil, também existem incentivos para fontes renováveis, mas é importante pensar em como esses incentivos afetam o bolso das pessoas.

Para que a população veja a vantagem imediata em aderir às energias renováveis, é necessário investir em treinamento, sinalização e regulamentação. A construção do marco regulatório ainda está em andamento, mas é um passo importante para a transição energética.

Essa isenção de taxas é uma importante medida de incentivo para a produção de Hidrogênio Verde, que permite uma redução nos custos de produção.



Fonte: Stammer, P., Implementação de medidas do NWS, 2021.

Figura 49: Regulamentos no EEG e EnWG.

- Regulamentos para a produção de hidrogênio podem ser encontrados no EEG e no EnWG.
- A implementação de alguns dos requisitos da UE ainda estão pendentes; muitos arranjos transitórios.
- Atualmente ainda não estão claros os fatos regulatórios -> Muita coisa está em fluxo.

Além disso, outras isenções fiscais estão disponíveis para empresas que atuam no setor de energias renováveis. Isso é fundamental para promover a competitividade desse mercado, incentivando o desenvolvimento e a adoção de tecnologias mais limpas e sustentáveis.

Dessa forma, é possível acelerar a transição para uma matriz energética mais limpa e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

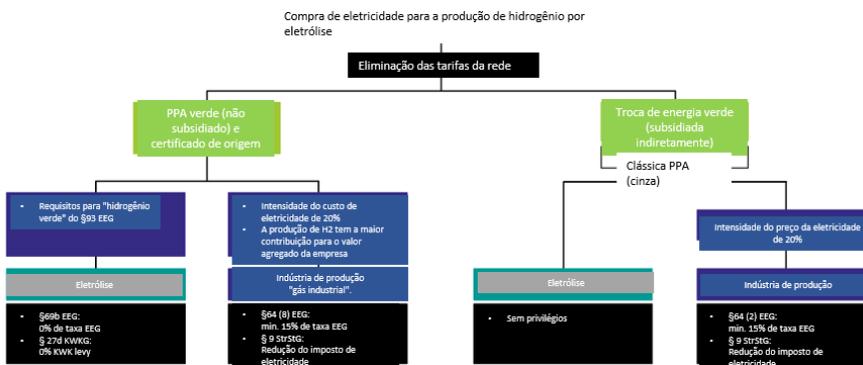


Figura 50: Hidrogênio a partir da eletrólise no EEG 2021. Isenções para menores custos de produção de hidrogênio. Fonte Notas de Aulas, 2023.

- A isenção da taxa EEG para a produção de Hidrogênio Verde reduz significativamente os custos de produção de hidrogênio (possivelmente novo no EEG 2021);

- *Os PPAs (Power Purchase Agreements) para a compra de eletricidade de eletrólise atendem aos requisitos de Hidrogênio Verde (certificados de origem);*
- *Outras isenções disponíveis, por exemplo, para o imposto de eletricidade e taxa de rede (ver anexo para detalhes).*

## 4.2. Definição de Hidrogênio Verde no EEG 2021

Atualmente, a partir de 01/01/2022, existe uma isenção válida para as primeiras 5.000 horas completas de utilização por ano na compra de eletricidade para produção de Hidrogênio Verde.

- Hidrogênio Verde = eletrólise com energia elétrica de fontes renováveis
- Portaria (19.05.2021) do Ministério Federal de Assuntos Econômicos e Energia sobre a implementação da Lei de Fontes Renováveis de Energia 2021 e sobre a alteração de outros regulamentos relacionados à energia.
- Requisitos adicionais para Hidrogênio Verde a serem regulamentados até 31 de dezembro de 2023 (implementação dos requisitos da UE).

É importante destacar que essa eletricidade deve vir de usinas de energia renovável, das quais pelo menos 85% são destinadas à zona de preços da Alemanha e um máximo de 15% estão localizadas em uma zona de preços que está eletricamente conectada à Alemanha.

Além disso, as usinas de energia renovável não podem ser subsidiadas sob o EEG ou KWKG. É possível fazer um acoplamento direto com usinas de energia renovável sem uso de linhas de transmissão ou garantir a origem de eletricidade "verde". Essas são informações importantes para entender como funciona a legislação relacionada à produção de Hidrogênio Verde na Alemanha.

O custo de produção do hidrogênio depende da aquisição de eletricidade.

É importante garantir que a eletricidade utilizada seja de fontes renováveis, e isso pode ser feito através de contratos de ofertas e DPAs (acordos de compra de energia).

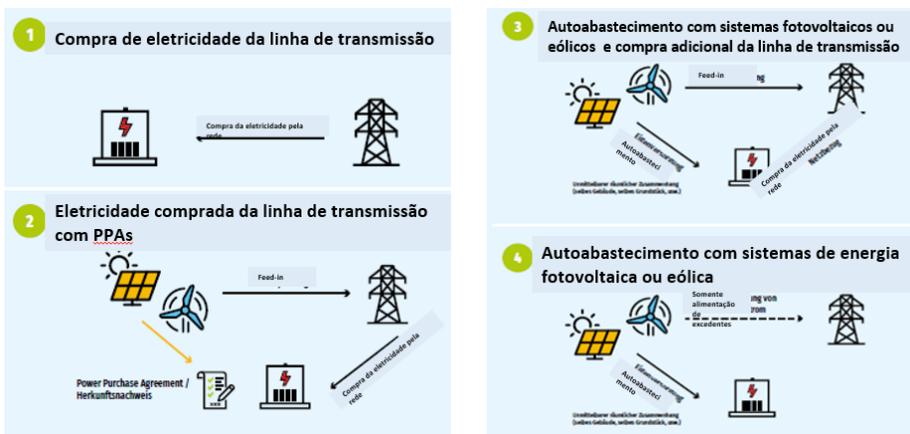


Figura 51: Definição de Hidrogênio Verde no EEG 2021. O custo de produção do hidrogênio depende da aquisição de eletricidade. Fonte Notas de Aulas, 2023.

Ao escolher a opção de aquisição de eletricidade renovável, é preciso ter em mente que isso pode afetar a carga da rede elétrica. Além disso, é necessário garantir a adicionalidade da produção de hidrogênio, ou seja, que ela de fato contribua para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

O autoabastecimento (autogeração) ainda é a opção mais barata, quando se trata dos custos de compra de energia e custos para os eletrolisadores na Alemanha.

Se você vai para o mercado de energia convencional, um deles é o mercado cinza. Na Alemanha, por exemplo, eles passam pelas energias renováveis até chegar ao autoabastecimento.

Quando eles falam de autoabastecimento, estão se referindo à autogeração renovável. E assim, principalmente com energia eólica, é possível ter custos mais baixos de eletricidade. Caso contrário, no mercado cinza, os custos são bastante elevados. Esse é um panorama europeu.

Valores para exemplos (Requer uma análise caso a caso)

	Mercado (eletricidade cinza)		PPAs de energia verde	Autoabastecimento	
	Totalmente tributável	Prod. comércio	Eólica/Onshore/ PV	Turbina Eólica onshore	Onshore ex-EEG WEA
Geração atual	3,4	3,4	5,5	5,5	3,2
Taxa EEG	6	1,02	0	0	0
Imposto de eletricidade	2,05	0	0	0	0
Taxas relacionadas à rede de transmissão	0,7	0,7	0	0	0
Horas de carga completa	8.000	8.000	Individual	2.500	1.900
Custos de eletricidade [ct/kWh]	12,15	5,12	5,5	5,5	3,2

Figura 52: O autoabastecimento ainda é a opção mais barata. Fonte: Opinião dos especialistas Schleswig-Holstein, produção e mercados de hidrogênio, 2020.

No contexto da geração de Hidrogênio Verde por meio de eletrólise, existem diversas condições de regulação e impostos que podem impactar o processo. Isso inclui taxas para empresas que consomem grandes quantidades de eletricidade, taxas para uso exclusivo da cidade e tarifas de rede e impostos de eletricidade. É importante lembrar que essas regulamentações e isenções podem mudar com o tempo e variar de acordo com a legislação de cada país.

As taxações são uma forma de arrecadar recursos para que o Estado possa cumprir sua função de distribuir a riqueza nacional.

Condições regulatórias da produção de H2 por eletrólise de água

Tipo de imposto ou componente de preço	Regulamento para redução ou isenção
Taxa de EEG para empresas com custos intensivos de eletricidade	De acordo com o inciso § 64a EEG 2021 será limitado a um máximo de 15% das taxas habituais e mínimo de 0,1ct/kWh; nenhuma auto-retenção ou qualquer eletricidade será permitida
Taxa EEG para o uso exclusivo de eletricidade de energias renováveis	Isenção total de até 5000 horas de carga completa por ano de acordo com § 69b EEG 2021 e Portaria sobre a Implementação EEG 2021
Tarifas de rede	Aplica-se o caso de operação de eletrólise de água por 20 anos, de acordo com § 118 Par. 6 S. 1 e S. 7 EnWG
Imposto de eletricidade	Omitido no caso de eletricidade 100% "verde" de acordo com § 9a (1) StromStG (só se aplica à eletrólise propriamente dita)

Figura 53: Conclusão provisória: Regulamento atual para a geração de hidrogênio por meio de eletrólise. Fonte: Ehret, O., Economically sensible hydrogen supply paths, StorEnergy Congress, 2021.

Além disso, elas podem ser usadas como uma ferramenta educativa e política para incentivar ou desencorajar determinados comportamentos. Por isso, é fundamental compreender os mecanismos de regulação e impostos que afetam a produção de Hidrogênio Verde por eletrólise.

### 4.3. Lei para usinas híbridas de produção “Heat and Power” (KWKG 2020): incentivos à mudança para combustíveis modernos.

Desde 2002, a Lei sobre “Heat and Power” (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) regulamenta o fornecimento e a remuneração da eletricidade das usinas de produção híbridas de calor e eletricidade na Alemanha.

A versão atual: KWKG 2020 (Em vigor desde 03.06.2021).

Destacamos inovações importantes do KWKG 2020:

- Bônus de substituição de carvão, que incentiva o descomissionamento antecipado de usinas elétricas a carvão e sua substituição por usinas elétricas a gás de última geração;
- **Novas plantas nos sistemas de rede térmica devem ser projetadas para estarem prontas para o hidrogênio desde o início;**
- Novas taxas de subsídio;
- Novos incentivos à flexibilidade;
- Bônus para o uso de energias renováveis no fornecimento de calor.

As usinas híbridas são uma opção interessante para aumentar a eficiência energética. No Brasil, a cogeração ainda é pouco utilizada, mas é uma alternativa promissora. Algumas distribuidoras de gás, em alguns estados, oferecem tarifas mais baixas para o gás natural utilizado em plantas de cogeração.

Na Alemanha, a legislação determina que novas plantas nos sistemas de rede térmica devem ser projetadas para estarem prontas para o hidrogênio desde o início e oferece subsídios e bônus para quem utiliza energia renovável para fornecimento de calor.

É importante lembrar que a eletricidade não substitui todos os usos de calor, que é tão importante quanto a eletricidade. A eletrificação pode

ser uma solução, mas não é tão simples assim. A cogeração, principalmente com o aproveitamento do calor das células de combustível, pode ser uma forma eficiente de produzir energia.

Sobre a regulamentação da infraestrutura de gás, temos os Regulamentos via EnWG e BNetzA.

A infraestrutura de gás está sujeita à regulamentação pela Lei da Indústria Energética (EnWG): os operadores de rede devem conceder a todos os fornecedores de gás acesso à sua rede de gasodutos, pelo qual recebem uma taxa

O Regulador (Agência Federal de Rede) executa as seguintes tarefas:

- Determinação das taxas de utilização da rede;
- Monitoramento da segurança e qualidade do fornecimento;
- Separação da produção, transporte, armazenamento, comercialização/distribuição e fornecimento;
- Monitoramento do acesso não discriminatório à rede e da competição;
- Revisão dos planos e orçamentos de investimento;
- Confirmação dos planos de desenvolvimento da rede.

Determinação das tarifas de rede de acordo com o modelo de entrada/saída: o fornecedor de gás injeta gás na rede em qualquer ponto (=entrada) e paga uma taxa de entrada por isso. O gás pode ser retirado da rede em qualquer ponto (=saída), pelo qual deve ser paga uma taxa de retirada. Neste modelo, a rota de transporte é irrelevante para o cálculo dos custos.

Aqui estamos falando novamente sobre as legislações relacionadas à estrutura do gás. Assim como no Brasil, existem órgãos reguladores responsáveis por estabelecer as tarifas conforme o modelo de sistema adotado. É importante ressaltar que essa regulação é bastante flexível, permitindo uma abordagem personalizada para cada caso. Em resumo, a ideia é classificar e incentivar bons exemplos no uso de Hidrogênio Verde.

## Emenda de Lei “EnWG” – Pontos-chave

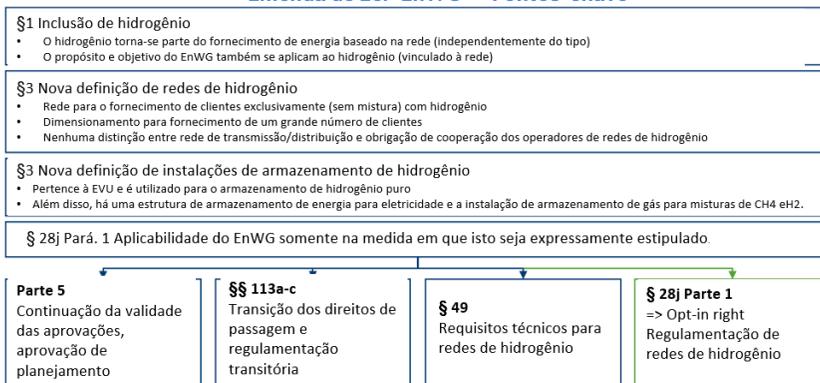


Figura 54: *Emenda de Lei “EnWG” – Pontos-chave*. Fonte: Ronnacker, U., *From real labs and clusters to a pan-European hydrogen supply*, 2021.

A legislação é fundamental para a inclusão do hidrogênio nas redes de distribuição, pois é necessário garantir que ele chegue de forma segura e seja armazenado adequadamente.

Além disso, a regulamentação também inclui incentivos específicos para aqueles que optarem pelo uso do Hidrogênio Verde. É nesse contexto que surge o conceito de Opt-in, que é basicamente um consentimento para adotar uma determinada opção.

Esse conceito surgiu originalmente no marketing por e-mail, quando empresas passaram a perguntar aos usuários se desejavam receber suas mensagens. O Opt-in é importante porque garante que as pessoas estejam cientes das opções disponíveis e possam escolher o que é melhor para elas.

### Emenda de Lei “EnWG” 2021 – Regulamentação de redes de hidrogênio

- Regulamentações iniciais para segurança jurídica.
- Separação de gás e hidrogênio de acordo com § 3 EnWG;**
- A regulamentação **transitória** até a regulamentação pela 4ª Diretiva do mercado interno de gás da UE **é para garantir a segurança jurídica, de acordo com a BMWi;**
- Participação voluntária** de operadores de redes de H2 na regulação graças a uma chamada "**opt-in**" de acordo com o **§ 28j EnWG;**
- Regulamentação da **contabilidade, desagregação, conexão e acesso, condição e tarifa de acesso à rede**, sob **demanda justa** no plano de desenvolvimento da **rede** no §§ 28k ff. EnWG.

- Regulamentação voluntária inicial para criar **incentivos ao investimento e segurança jurídica** até que a regulamentação europeia esteja em vigor.

Existem regras para separar o gás natural do hidrogênio, e essas regras são transitórias. É importante garantir segurança jurídica, o que requer um Opt-in voluntário, ou seja, um acordo em que as partes concordam em participar da rede.

Essa regulamentação inicial cria incentivos para investimentos, mas à medida que a regulamentação é aprimorada, não é mais uma escolha. O Opt-in deixa de ser necessário e passa a ser o novo padrão. É importante começar com conceitos simples e experimentais para provar que funcionam antes de passar para a próxima etapa.

### **Novas obrigações para os operadores de redes de hidrogênio:**

Regras de desagregação no caso do "opt-in":

- § 28k regulamenta a separação para fins contábeis e corresponde em grande parte (em consequência legal) à Seção 6b para a regulamentação do gás natural;
- § A seção 28m estabelece regras mais gerais de desagregação, incluindo: Obrigação das operadoras de rede de H2;
- para garantir a transparência e o desenvolvimento não discriminatório do manejo das operações de rede;
- para garantir a independência das operações de rede da geração de H2, armazenamento de H2, bem como a distribuição de H2;
- proibição dos operadores da rede H2, para "Manter a propriedade de, ou construir ou operar, instalações de produção, armazenamento ou distribuição de hidrogênio".

Conexão e acesso no caso de um opt-in

- § 28 EnWG regulamenta a obrigação dos operadores de rede de conceder acesso razoável e não discriminatório a terceiros.

### **Portaria sobre as cargas da Rede de Hidrogênio**

Cálculo das tarifas de rede:

- Adotado pelo Governo federal alemão em 22.09;
- Em 05.11.2021 aprovou o Bundesrat. Publicação no BGBl ainda pendente;
- Só se aplica com o opt-in da emenda da EnWG;
- Baseado fortemente no Gas-netzentgelt-VO;
- Faz declarações sobre a determinação dos chamados custos de rede elegíveis, tais como:
  - Construção e operação de redes somente de H2;

- Conversão de redes de gás natural para redes somente de H<sub>2</sub>.
- Períodos de cálculo para apenas um ano;
- Comparação dos custos planejados/reais até 30 de setembro;
- Os custos para o próximo período devem ser aprovados pela BNetzA.

## O hidrogênio no EnWG – rumo do processo legislativo

- A emenda serve para implementar a Estratégia Nacional de Hidrogênio, bem como a nova diretriz do mercado interno de eletricidade da eu;
- Projeto de lei de 10.02.2021;
- Intercâmbio entre o Bundestag e o Bundesrat na primavera;
- Adoção da emenda na versão do comitê em 24.06.2021;
- Em vigor desde 27.07.2021;
- Adoção de uma portaria sobre os custos e encargos de acesso às redes de hidrogênio e alteração do regulamento de incentivo em 22.09.2021 ->;
- Aprovado em 05.11.2021.

Este trecho aborda a estratégia nacional de hidrogênio da Alemanha e seu processo legislativo. A estratégia nacional de hidrogênio é um documento que apresenta a visão do governo alemão sobre o papel do hidrogênio na transição energética e estabelece metas e diretrizes para a produção, distribuição e uso do Hidrogênio Verde no país.

Esse documento passa por um processo legislativo para ser aprovado e implementado, e pode envolver a participação de diferentes órgãos governamentais e câmaras legislativas. A estratégia nacional de hidrogênio é um importante instrumento para a implementação de políticas públicas voltadas à transição energética e à redução das emissões de gases de efeito estufa.

## Emenda de lei “EnWG” 2021 – Regulamentação de redes de hidrogênio

A regra do “opt-in”:

- § 28j EnWG: A regulamentação exige uma declaração irrevogável do operador de rede à BNetzA, cuja eficácia depende de uma avaliação positiva da demanda pela BNetzA, de acordo com o § 28 EnWG.

Regulamentação voluntária no início para criar incentivos ao investimento e segurança jurídica até que na Europa entre em vigor.

### **Opt-in**

Segurança jurídica unicamente até nova regulamentação europeia devido à **Diretiva sobre o mercado interno do gás**

### **Sem Opt-in**

**Sem segurança jurídica**  
Risco do surgimento de **estruturas de monopólio verticalmente integradas** que **terão de ser desagregadas** novamente após a introdução de um marco regulatório europeu

*Figura 55: Emenda de Lei "EnWG" - Pontos-chave. Fonte: Rothfuchs, H., Gelingt die Einbindung von Wasserstoff in die Energieversorgung? StorEnergy Congress, 2021*

Opt-in significa que você concorda em participar e passa a ter segurança jurídica até uma nova regulamentação ser definida, enquanto no Opt-out você não participa e assume o risco por conta própria.

A estratégia é trabalhar com quem esteja interessado em construir o projeto e não impor a participação de todos. Isso é importante para implementar uma nova política de forma eficiente.

## **Emenda de lei "EnWG" 2021 – Regulamentação de redes de hidrogênio**

Regulamento de cobrança no caso de uma opção de inclusão "opt-in":

- § 208 I EnWG refere-se à Seção 21 EnWG e, portanto, ao:
  - O apropriado, não discriminatório e estruturação transparente das tarifas de rede;
  - O cálculo dos encargos orientado para os custos.
- § Seção 280 II EnWG cria uma autorização para que o BReg projete:
  - Condições e métodos para determinar custos e encargos;
  - Coleta e armazenamento de dados pelos operadores de rede para o cálculo das tarifas de rede.

\* Nenhuma referência ao § 21a e § 23a: nem regulamentação de incentivos nem prestação de serviços de balanceamento para operadores de rede H2 regulamentados; A regulamentação de incentivos poderia, no entanto, ser introduzida posteriormente, de acordo com a exposição de motivos da lei.

Conexão e acesso em caso de "opt-in":

- O inciso § 28 EnWG regulamenta as obrigações dos operadores de rede de conceder acesso não discriminatório para:
- Recusa do acesso permitido se não for possível, ou por razões operacionais ou outras razões econômicas ou técnicas, § 28n II EnWG;
- Autorização para o BReg emitir portarias sob o § 28n IV EnWG para definir as condições técnicas e econômicas para conexão e acesso;
- O inciso § 28n EnWG também se aplica a operadores de instalações de armazenamento H2 de acordo com § 28j II EnWG.

Diferente de outros países, como a Alemanha, por exemplo, nós ainda não possuímos uma infraestrutura de distribuição tão avançada, com gasodutos que alcancem todo o território nacional.

Porém, é importante lembrar que, com o crescente interesse pelo Hidrogênio Verde como fonte de energia limpa e renovável, é possível que no futuro surjam demandas para a criação de uma rede de distribuição mais ampla e acessível. Por isso, é importante estarmos atentos às regulamentações e legislações sobre o assunto, e trabalhar para garantir a segurança jurídica e incentivos para investimentos nessa área.

#### 4.4. Portaria sobre Taxas da Rede de Hidrogênio – Avaliação

- Vantagens:

- Os operadores de rede detêm **a liberdade para a estruturação de tarifas;**
- Sem **exigências rígidas de remuneração;**
- **Ficção** de aprovação dos custos após três meses de inatividade da BNetA (normalmente até 01.01);
- Taxas de juros fixos de 9,00% para novas usinas e 7,73% para usinas antigas, limitadas até 2027, significativamente maiores do que no setor de eletricidade e gás, onde é comercializado a 5,07% para o 4º período regulatório.
- O Hidrogênio Verde ainda está em fase de expansão do mercado e o governo federal está buscando criar incentivos ao investimento. Isso porque, atualmente, há um alto risco econômico em investir no H2 e ainda existe incerteza quanto à disponibilidade suficiente de hidrogênio.

No entanto, existem vantagens, como a liberdade para estruturação de tarifas e a não exigência de remuneração. É importante destacar que o Hidrogênio Verde ainda é especulativo, sendo necessário aderir a ele com cuidado e buscar segurança para minimizar os riscos envolvidos.

- Desvantagens:

- Devido ao forte paralelismo com a Portaria de Carga da Rede de Gás, a Portaria tem brechas similares que devem ser fechadas pelos tribunais.

- Ao contrário das objeções das associações, também foi mantida a limitação da taxa de equidade para 40% conhecida da Portaria sobre Taxas de Gás, § 8 II p. 2, § 10 para. 1 sentença 6 NEV Hidrogênio.
- Na ausência de valores empíricos da infraestrutura para o H2, serão colocadas maiores exigências ao fornecimento de capital da dívida pelos bancos e credores.
- A restrição do nível de patrimônio próprio poderia dificultar os investimentos.

As desvantagens do Hidrogênio Verde são muitas, começando pela insegurança de se ter acesso suficiente ao gás. Além disso, não há histórico técnico nem organizacional para a produção e distribuição do hidrogênio, tampouco há muitos profissionais experientes na área. Tudo isso pode tornar o investimento em H2 bastante arriscado e incerto.

## Operação dos eletrolisadores – Imposto de eletricidade

### Status quo do imposto de eletricidade:

- Taxa de imposto: 20,50 euros por MWh (§3 StromStG);
- Emergência (breve apresentação);
- Eletricidade retirada da rede de suprimento pelos consumidores finais (fornecimento);
- Retirada de eletricidade para autoconsumo (autogeração);
- No caso de eletricidade gerada em uma ou mais turbinas eólicas e adquirida por uma planta de eletrólise por meio de uma conexão direta, o imposto de eletricidade pode ser cobrado de acordo com o § 5 (1) sentença 2 StromStG se o operador da turbina eólica e o operador do eletrolisador forem a mesma pessoa (autoabastecimento).

### Opções de isenção e auxílio:

- As isenções e reduções legais individuais já são basicamente propícias à produção de hidrogênio;
- Isenção de impostos para eletricidade de fontes renováveis de energia para autoconsumo no local de geração (usinas maiores que 2MW: § 9 para. 1 no. 1 StromStG);
- Isenção de impostos para eletricidade de pequenas usinas para autoconsumo no contexto espacial (usinas maiores que 2MW: § 9 para. 1 no. 3a StromStG);
- Isenção de impostos para eletricidade de pequenas instalações consumidas por consumidores finais em um contexto espacial (fornecimento) (§ 9 para. 1 no. 3b StromStG);
- Isenção de impostos para o uso de eletricidade para a eletrólise por empresas fabricantes (§ 9 para. 1 no. 3b StromStG);

- Entretanto, as isenções/reduções devem ser sempre determinadas caso a caso, dependendo do operador e do local.

Essa é uma questão interna do país europeu, que está focado em reduzir suas emissões de carbono. No entanto, é importante mencionar que essas informações podem ser úteis para compreender as políticas energéticas e ambientais de outros países, e como elas podem influenciar o desenvolvimento do Hidrogênio Verde em nível global.

## Operação dos eletrolisadores – Taxas da rede (eletricidade)

### Taxas de rede e outras taxas:

- As tarifas de rede também têm influência na rentabilidade dos modelos de negócios que requerem que o eletrolisador seja conectado à rede e que a eletricidade seja comprada da rede;
- O EnWG já prevê exceções ao pagamento de tarifas de rede, mas sua aplicabilidade deve ser mais especificada e ampliada;
- Exceções existem para a obrigatoriedade do pagamento:
- Isenção de taxa de rede para plantas construídas após 31 de dezembro de 2008 (entre outros), com eletrolisadores comissionados dentro de 15 anos, a partir de 4 de agosto de 2011 (§ 118 para. 6 p. 7, 8 EnWG);
- Redução das tarifas de rede para instalações de baixa tensão controlável (§ 14a EnWG), se aplicável aos eletrólitos(?).

### Proposta para a redução das tarifas de rede:

- Extensão do regulamento existente sobre isenção de taxas de rede, no sentido de que a isenção também seja estendida a outras taxas e encargos (taxa de rede offshore, taxa de rede CHP, taxa de acordo com o § 19 § 2 StromNEV, taxa para cargas desconectáveis, taxas de concessão);
- Extensão ou esclarecimento do escopo de aplicação de tarifas de rede reduzidas às plantas de PtG como "dispositivos de consumo controlável", inclusive para níveis de rede mais altos.

Os eletrolisadores são equipamentos importantes para a produção de Hidrogênio Verde. No Brasil, em breve, será colocado em funcionamento o primeiro em escala maior. Já existem experiências com eletrolisadores em outros lugares do mundo e, por isso, já se sabe mais sobre como eles podem ser integrados à rede e como devem ser remunerados. A legislação está sendo construída para permitir o uso dos eletrolisadores tanto em cogeração quanto em operação autônoma, em rede interna ou externa.

## Opções de compra de energia para plantas de eletrólise na Alemanha

Acoplamento direto do eletrolisador com a turbina eólica (operação autônoma, sem alimentação na rede elétrica ou sem compensação EEG):

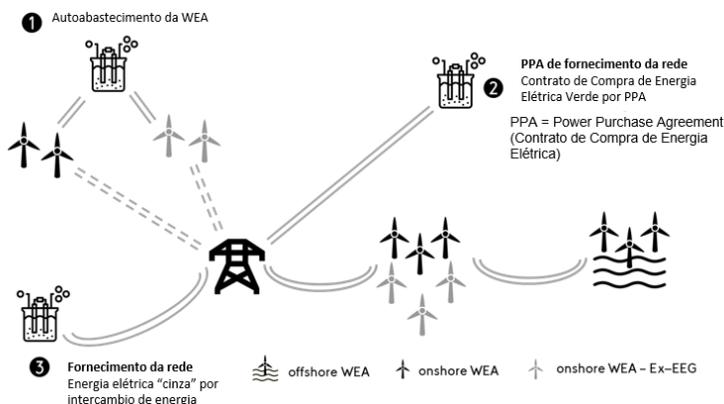


Figura 56: *Opções de compra de energia para plantas de eletrólise na Alemanha.* Fonte: *Opinião dos especialistas Schleswig-Holstein, produção e mercados de hidrogênio, 2020.*

Nesta imagem é abordado o mapa de compensação da entrada de eletrolisadores. Para que a entrada dos eletrolisadores seja compensada, é necessário que haja uma fonte de energia renovável por trás, seja ela na rede ou fora dela.

É importante saber a origem dessa energia, se é onshore ou offshore, principalmente de fontes eólicas, que são as mais utilizadas. Além disso, são discutidos os contratos envolvidos nessa compensação.

O desenvolvimento do mercado de Hidrogênio Verde está intimamente ligado a questões regulatórias e logísticas. Um dos principais desafios é garantir que a entrada dos eletrolisadores na rede seja sempre com energia renovável atrás, seja na rede interna ou externa.

É necessário também pensar em como será a remuneração e se aceitarão apenas o Hidrogênio Verde ou qualquer tipo de hidrogênio. Para isso, é importante a certificação e a verificação da origem do hidrogênio.

Além disso, há a necessidade de adaptação das redes existentes para fazer o transporte de hidrogênio e sua compressão. Essa compressão não se refere apenas à técnica, mas também à acumulação de hidrogênio, já que ele foi originalmente visto como uma solução para os problemas de intermitência das fontes renováveis.

No Brasil, há questões regulatórias que podem afetar o desenvolvimento de energias renováveis, como a cobrança do FILB na produção de eletricidade fotovoltaica domiciliar, que será aplicada a partir do próximo ano.

Além disso, há discussões sobre a taxaço de intercâmbio de transmissão entre os supermercados de energia, o que pode prejudicar regiões produtoras de energia renovável, como o Nordeste.

Diante desses desafios, é necessário discutir como fazer incentivos para a economia de baixo carbono sem que ela seja imediatamente taxada. Essa é uma discussão que envolve visões liberais e políticas de Estado. É importante que o Estado tenha um papel na política de longo prazo, garantindo que a sociedade não seja prejudicada em favor dos lucros das empresas.

Na Alemanha, as diretrizes renováveis devem ser adotadas como lei pelos membros da União Europeia. No Brasil, é importante pensar em como incentivar a energia renovável de forma segura e regulamentada, garantindo que a sociedade não seja prejudicada pelas taxas e regulamentações.

### **Pontos em aberto para o desenvolvimento e operação de redes de hidrogênio:**

#### Questões regulamentares:

- Como a rede de H<sub>2</sub> deve ser regulamentada?
- Acesso regulamentado?
- Taxas regulamentadas?
- "Cor" do hidrogênio?

#### Questões de mercado:

- De onde vem o hidrogênio?
- Qual será a capacidade de transporte necessária para o gás natural?

### Questões técnicas:

- Adequação da rede de gás natural para o transporte de hidrogênio;
- Conceito para a compressão do hidrogênio.

## 5. Contrato de carbono por diferença

Na Europa, um termo bastante falado é o "contrato de carbono por diferença". Essa é uma modalidade de contrato que ainda não é muito comum no Brasil, mas que acaba sendo semelhante aos créditos de carbono.

O objetivo é incentivar as empresas a investirem em tecnologias mais limpas e sustentáveis, oferecendo uma compensação financeira caso o preço do carbono ultrapasse um determinado valor. Assim, as empresas são incentivadas a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e a buscar alternativas mais sustentáveis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Os contratos de carbono por diferença são uma ferramenta financeira utilizada na Europa para compensar os custos adicionais gerados por processos de transição energética. É uma maneira de garantir segurança jurídica e política para os investimentos em projetos de baixo carbono.

Esses contratos funcionam como um tipo de seguro, onde os investidores recebem uma compensação financeira caso o preço do carbono exceda o valor estabelecido no contrato. É uma forma de mitigar os riscos financeiros e estimular investimentos em tecnologias limpas. No Brasil, ainda não existe essa modalidade de contrato, mas é uma ideia que pode ser aplicada para viabilizar projetos de Hidrogênio Verde e outras fontes de energia renovável.

### 5.1. Abordagem de solução: Contratos de Carbono por Diferença (CCfDs)

- Contrato de Carbono por Diferença (CCfD) para investimentos:
  - Contratos por diferença que compensam os custos adicionais de mudança para processos neutros para o clima;

- Eles podem ser utilizados para custos adicionais de investimentos, mas também para compensar custos operacionais mais altos;
- Os CCfDs são realizados entre o Estado e a empresa. O sistema europeu de comércio de emissões serve como o mercado de referência;
- O contrato garante o pagamento da diferença entre um preço acordado e o preço atual de CO<sub>2</sub>.
- CCfDs para importação e aceitação de hidrogênio:
  - Leilões para Hidrogênio Verde ou seus derivados produzidos no exterior por eletrólise;
  - Os consórcios licitantes recebem prêmios por contratos “offtake”, e os clientes na Alemanha recebem contratos de fornecimento. Os leilões são realizados em ambas as direções, com as licitações mais favoráveis sendo aceitas do lado da licitação e as licitações mais altas do lado da compra;
  - A diferença entre o preço de compra e venda esperado, para a fase inicial do mercado mundial, é compensada pelo Estado.

### Modo de operação de um contrato de carbono por diferença

Essa é uma questão muito importante na viabilização de projetos de energia renovável, como a energia fotovoltaica. Quando um indivíduo instala um sistema de energia solar em seu telhado, ele pode gerar um excedente de energia que é injetado na rede elétrica. No entanto, esse cidadão precisa ser compensado pelo excesso de energia gerado, já que ele também investiu em equipamentos para produzi-la.

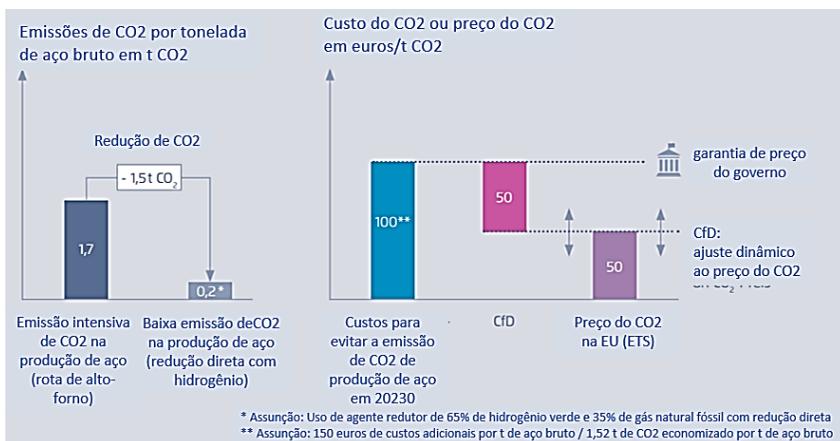


Figura 57: Modo de operação de um contrato de carbono por diferença. Pagamento da diferença garantida. Fonte: Agora Energiewende, 2019

Porém, essa compensação não deve ser feita apenas para o indivíduo, mas também para todo o sistema elétrico que teve que se adaptar para receber essa energia. Essa compensação deve ser justa e sair de algum lugar, ou seja, o custo deve ser distribuído entre todos os usuários do sistema elétrico.

Esse tipo de problema é enfrentado em muitos países que estão adotando fontes de energia renovável em larga escala, como a Alemanha e a Espanha. Uma das soluções propostas são os chamados "contratos de diferença de carbono", que buscam garantir uma compensação justa para todos os envolvidos e viabilizar projetos de energia renovável de forma sustentável.

## 5.2. H2GLOBAL – Fundação

A Europa tem uma grande preocupação em relação ao Hidrogênio Verde, pois reconhece que não será capaz de gerar toda a quantidade de hidrogênio de que precisa. Por isso, busca estabelecer laços comerciais, diplomáticos e jurídicos com países exportadores de Hidrogênio Verde.

Isso envolve negociar com outras nações, o que pode ser ainda mais complicado do que a situação interna de cada país. É uma questão que gera insegurança e incerteza sobre o futuro.



Figura 58: Conceito global de H2 para a fase inicial segura. H2GLOBAL - Fundação. Fonte: Agora Energiewende, 2019

### Estabelecimento de uma plataforma comercial para a importação de Hidrogênio Verde:

- Empresas de diferentes países oferecem Hidrogênio Verde (lado da oferta);
- Empresas da Alemanha apresentam pedidos com expectativas de preços (lado da demanda);
- A diferença entre o preço da oferta e da demanda pode ser compensada através de uma abordagem de contratos por diferença;
- Primeiras entregas de Hidrogênio Verde a partir de 2024.

### 5.3. Promoção de investimentos – exemplo de promoção federal (NOW GmbH)

Na Europa, um dos principais desafios para a implementação do Hidrogênio Verde é a garantia de fornecimento, já que eles não possuem produção suficiente para atender à demanda. Para isso, é necessário estabelecer acordos comerciais, diplomáticos e jurídicos com países fornecedores. Essa questão já é bastante desafiadora internamente, e se torna ainda mais complicada quando se trata de relações externas.

Programa nacional de inovação  
Tecnologia do hidrogênio e da célula a  
combustível (NIP)

Atual

catálogo de medidas

Promoção de postos públicos de abastecimento de hidrogênio no transporte rodoviário (NOW GmbH)

- Foco nos veículos comerciais
- 80% para o posto de abastecimento de hidrogênio
- 45% para o eletrolisador

Figura 59: Promoção dos postos de abastecimento de H2 e de eletrolisadores. Fonte: Krause, C., Hydrogen by PEM Electrolysis, Colônia H2, 2021.

Outro aspecto importante na viabilização do Hidrogênio Verde são os subsídios e promoções, que são geralmente oferecidos pelo governo em parceria com as empresas que fazem a modificação necessária.

Nesse caso, é estabelecido um contrato de carbono por diferença, no qual o governo garante o pagamento da diferença de preço. É importante destacar que, apesar de ser uma medida do governo, o

dinheiro não é criado, mas sim gerenciado a partir do que é arrecadado. Dessa forma, a compensação não sai diretamente do bolso das pessoas, mas sim de forma indireta, através de verbas que entram no caixa único.

## 5.4. Etiquetas de produtos verdes

O uso de selos é uma forma interessante de se comunicar com a população em geral de forma clara e acessível. Essa classificação é uma linguagem que todos podem entender, o que é bastante relevante.

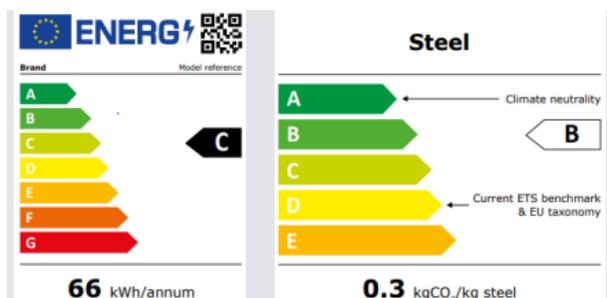


Figura 60: Etiquetas de produtos verdes. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Nesse contexto, é importante mencionar a garantia de origem, que já foi citada anteriormente, e que representa um campo de atuação para formadores e profissionais da área que acreditam no movimento do Hidrogênio Verde. Além disso, esse tipo de identificação será abordado com mais detalhes mais adiante no texto.

## 6. Perspectivas para o Mercado Nacional e Internacional de Hidrogênio

Vamos discutir sobre as perspectivas para o mercado nacional e internacional de hidrogênio, que é um assunto muito amplo e importante. Vamos apresentar diversos dados e informações, mas destacamos o papel do Brasil nessa novidade que é o hidrogênio, que está se tornando cada vez mais relevante no mundo.

Porém, é importante destacar que ainda há falta de informações sobre esse tema. Então, vamos explorar mais sobre esse assunto e entender onde o Brasil se encaixa nesse contexto.

## 6.1. Estimativas da demanda global de H2 em 2050.

Falaremos sobre três pontos importantes para o mercado de hidrogênio: demanda, produção e transporte. Esse é um tema que desperta muito interesse na Europa, especialmente na Alemanha, que é um dos principais financiadores dessa área. E o Brasil também é uma peça-chave nessa estratégia da Alemanha, sendo visto como um importante parceiro para a produção e transporte de hidrogênio.

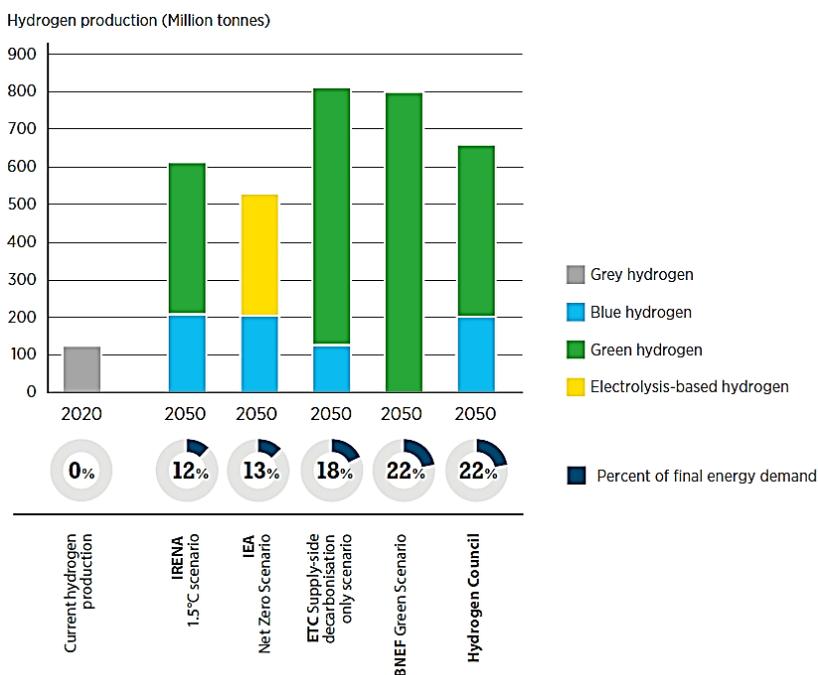


Figura 61: Estimativas da demanda global de H2 em 2050. Fonte: IRENA (2022a).  
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

O hidrogênio teve várias ondas de interesse no passado sem impacto significativo. Na atualidade dois fatores o tornam diferente:

- **Primeiro**, os governantes dos países possuem metas de zerar suas emissões de CO<sub>2</sub> até meados deste século (Black et al., 2021). Para isso, todos os setores da economia precisam reduzir suas emissões, incluindo a indústria e o transporte de longas distâncias, onde existem soluções limitadas. O hidrogênio surgiu como uma opção fundamental para reduzir as emissões nesses setores.
- **Segundo**, a redução de custos das energias renováveis e eletrolisadores estão melhorando a atratividade econômica do hidrogênio "verde". O Hidrogênio Verde pode, assim, complementar e estender a revolução, em andamento, da eletricidade renovável.

Como resultado desses fatores, o hidrogênio e os combustíveis à base de hidrogênio são projetados para atender uma grande parte da demanda de energia nos próximos anos.

Diversas agências importantes no setor fazem previsões para o futuro, como a IRENA, que projeta dados até 2050, com destaque para o Hidrogênio Verde e o hidrogênio azul (que é produzido a partir de gás natural com captura e sequestro). Porém, o hidrogênio cinza, que é produzido a partir de combustíveis fósseis, não é mais considerado uma opção viável para o futuro.

Embora os dados sobre produção em milhões de toneladas possam impressionar, é importante lembrar que, proporcionalmente, as energias renováveis não estão mudando a matriz energética de forma significativa, já que a demanda global por energia continua crescendo. Se as coisas continuarem como estão, não conseguiremos atingir a descarbonização desejada e ainda teremos um crescimento considerável de combustíveis fósseis.

Portanto, é fundamental gerar mais energia a partir de fontes renováveis e o Brasil tem um papel importante nesse processo. A questão que fica é: como esses números se traduzem em uma projeção maior? Ou seja, como podemos transformar essas previsões em ações efetivas para

atingir uma matriz energética mais limpa e sustentável? É algo a se refletir e discutir.

A mudança de combustíveis fósseis para as energias renováveis irá **alterar** a natureza e a geografia do comércio de energia.

Impulsionado pelos custos de transporte, é provável que surja um mercado duplo para o hidrogênio: um **mercado regional**, comercializado por meio de dutos, e um **mercado global** por meio de amônia, metanol e outros combustíveis líquidos. Em outras palavras, o hidrogênio pode acabar sendo negociado em um mercado mais diversificado e regionalizado do que os mercados de petróleo e gás.

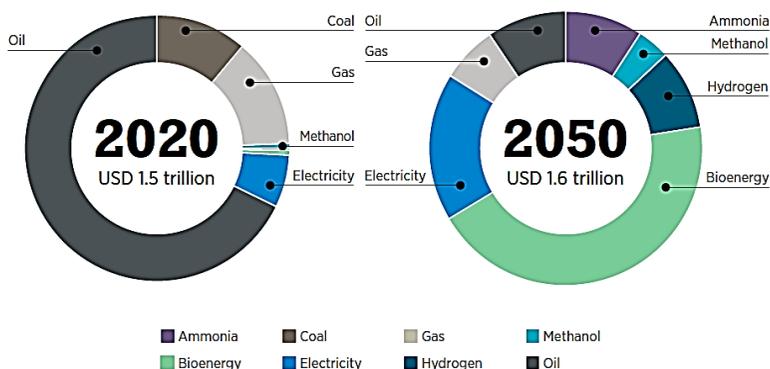


Figura 62: Uma nova geografia do comércio. Fonte: IRENA (2022a).

<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

Ao longo dos anos, houve um aumento significativo no valor do comércio de commodities energéticas, chegando a 1,5 trilhões de dólares há 30 anos, e aumentando em 6,6% para 1,6 trilhões. Embora possa parecer pouco, se considerarmos a perspectiva anual, ainda é um aumento significativo. Além disso, é importante notar que esse comércio é principalmente baseado em fontes não renováveis como petróleo, carvão e gás.

No entanto, o perfil está mudando e as energias renováveis, como a bioenergia e o hidrogênio, estão se tornando cada vez mais importantes. A eletricidade também está crescendo muito e pode ser intercambiada entre países como uma commodity. É possível incentivar o consumo

local e reduzir a dependência do comércio internacional de fontes não renováveis.

O valor da bioenergia é particularmente impressionante e pode levar a pressões sobre o espaço de plantio para fontes energéticas em vez de alimentos. Além disso, a produção de energia a partir de rejeitos da produção animal, como o biogás, é uma alternativa promissora, embora ainda esteja ligada à indústria da proteína animal.

À medida que a demanda por fontes de energia renováveis aumenta, é importante considerar os impactos ambientais e sociais dessas opções e garantir um equilíbrio adequado entre as necessidades de energia e a disponibilidade de recursos.

No mundo atual, há uma grande demanda por Hidrogênio Verde, que é produzido a partir de fontes renováveis de energia, como solar, eólica e hidrelétrica. Neste trecho, podemos ver a demanda de hidrogênio por região, e como essa demanda evoluirá ao longo do tempo.

Começando pela América do Norte, que inclui os Estados Unidos, México e Canadá, podemos ver que essa região terá um papel importante na demanda de hidrogênio. No entanto, é importante notar que os Estados Unidos são a principal potência econômica e populacional nessa região.

Na Ásia, países como China, Índia, Japão e Coreia do Sul estão se tornando cada vez mais importantes em termos de demanda de hidrogênio. A China, em particular, já ultrapassou os Estados Unidos em termos de demanda e deverá se tornar a principal potência em hidrogênio até 2050.

Por fim, na Europa, a demanda de hidrogênio deve se manter em níveis semelhantes aos dos Estados Unidos. No entanto, é importante lembrar que a Europa é uma colcha de retalhos de países e, portanto, é uma grande articulação.

Em resumo, podemos ver que a demanda de hidrogênio está mudando ao longo do tempo e que, no futuro, a Ásia deve se tornar cada vez mais importante nesse mercado.

As cadeias de suprimento de hidrogênio e suas demandas são fundamentais para entender como esse gás pode ser produzido, transportado e utilizado. É importante considerar o papel dos gasodutos quando se pensa em consumir hidrogênio localmente.

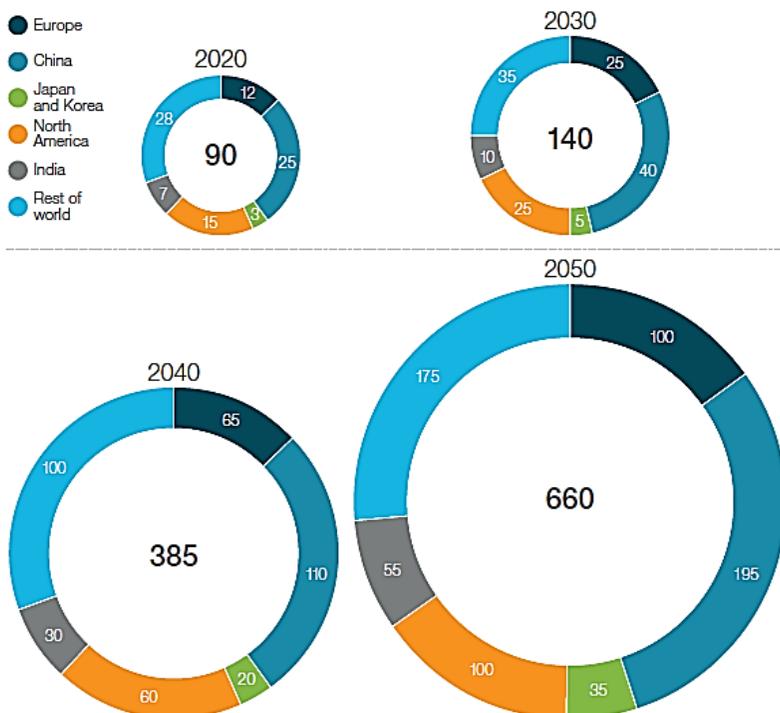
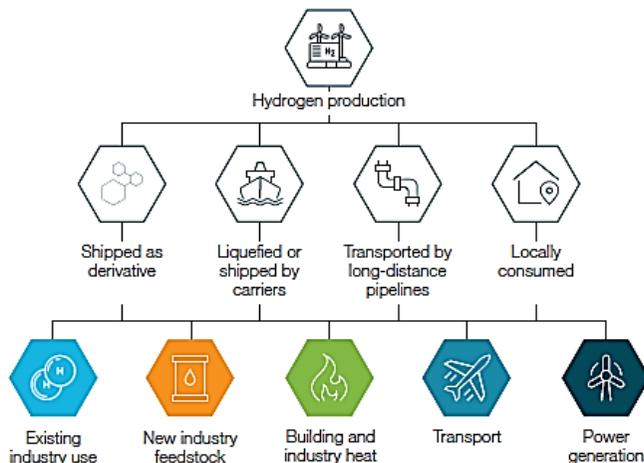


Figura 63: Demanda de hidrogênio por região (MT/a). Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a). <https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/>  
 China, Índia, Japão, Coreia do Sul, Europa e América do Norte serão responsáveis por 75% da demanda global de hidrogênio, com China emergindo como o maior consumidor nos próximos anos.

Os gasodutos podem ser de longa distância, locais ou transportados por navios. Além disso, o hidrogênio pode ser convertido em outros derivados, como amônia e metanol, que podem ser utilizados como combustíveis líquidos sintetizados.

O hidrogênio será utilizado tanto na indústria existente quanto em novas indústrias, gerando novos empregos. A geração elétrica também é uma opção, mas é muito mais eficiente ter sua própria energia renovável

colocada na rede. A acumulação de energia elétrica instantânea pode ser necessária em alguns casos, mas a tendência é que o uso de hidrogênio aumente consideravelmente no futuro.



Hydrogen demand, million tons

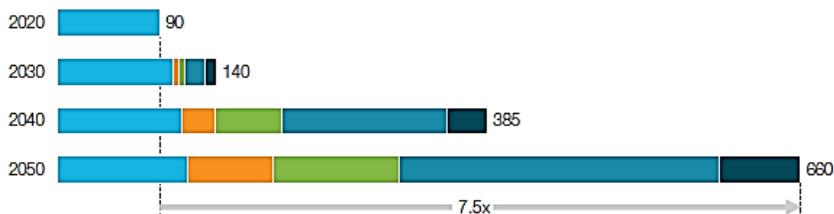


Figura 64: Cadeias de suprimento do hidrogênio e demandas. Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a) < <https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/>>

- O hidrogênio tem um papel central em ajudar o mundo a atingir a zerar as emissões líquidas até 2050.
- O hidrogênio pode armazenar energia, fornecer resiliência ao sistema e transportar grandes volumes de energia por longas distâncias por meio de dutos e navios. Como resultado, desempenha um papel fundamental na viabilização de um sistema de energia "green".
- A demanda de hidrogênio aumentará pelo seu uso em novas aplicações.

O transporte é um dos maiores desafios para a utilização do hidrogênio. A energia renovável e os eletrolisadores já estão disponíveis a preços acessíveis, mas o transporte ainda é caro. No entanto, o transporte pode ser resolvido de duas maneiras:

desenvolvendo redes regionais de transporte ou trazendo as indústrias para perto das fontes de produção. Nesse sentido, o Brasil tem uma grande oportunidade de se tornar um produtor de hidrogênio de baixo valor e atrair indústrias para a região.

É importante lembrar que a China e o México serão os maiores consumidores de hidrogênio nos próximos anos. O hidrogênio é uma fonte de energia promissora e pode ajudar a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, mas ainda há muitos desafios a serem superados para torná-lo uma opção viável em grande escala.

## 6.2. Perspectiva de produção de H<sub>2</sub>

Os custos de produção e o potencial comercial de cada região variam muito e são impulsionados por três principais fatores:

- 1º. O custo nivelado da produção de hidrogênio, que é impulsionada por energias renováveis locais pelo grau de utilização dos eletrolisadores.
- 2º. A disponibilidade e os custos para acessar outras matérias-primas críticas (por exemplo, CO<sub>2</sub> biogênico para combustíveis sintéticos ou minério de ferro de alta qualidade usado em aço verde).
- 3º. Fatores específicos do país, incluindo a atratividade de investimento da região (eficiência de mercado, disponibilidade de mão de obra ou fator de risco do país) e a aceitação local da construção de nova infraestrutura.

O Hidrogênio Verde é uma alternativa promissora para a produção de energia limpa e renovável, mas como em qualquer indústria, há desafios logísticos a serem considerados. Em particular, há um descompasso entre os locais que são mais adaptados para a produção de Hidrogênio Verde e os locais que mais demandam essa produção.

Os países que mais demandam Hidrogênio Verde incluem Estados Unidos, Europa, Oriente e Índia. No entanto, nem todos esses países são os melhores adaptados para a produção. Por outro lado, existem países muito adaptados para a produção, como o Brasil, mas que enfrentam

concorrência de outros países da América do Sul, como Chile e Argentina.

Além disso, o transporte é um gargalo importante para o comércio de Hidrogênio Verde. Enquanto o Brasil pode ser um forte exportador para a Europa, outros países, como Chile e Austrália, têm rotas comerciais mais diretas para mercados asiáticos, como a China.

Também é importante considerar a geopolítica envolvida na produção e comércio de Hidrogênio Verde. A Rússia, por exemplo, tem um potencial interessante de produção de Hidrogênio Verde na Ásia, o que poderia ser uma alternativa para a China. No entanto, os custos de produção ainda são elevados e a logística pode ser um desafio.

Em resumo, a produção e comércio de Hidrogênio Verde requerem uma análise cuidadosa dos desafios logísticos e geopolíticos envolvidos. A competição é forte e é importante identificar oportunidades para maximizar a eficiência e rentabilidade da produção de Hidrogênio Verde.

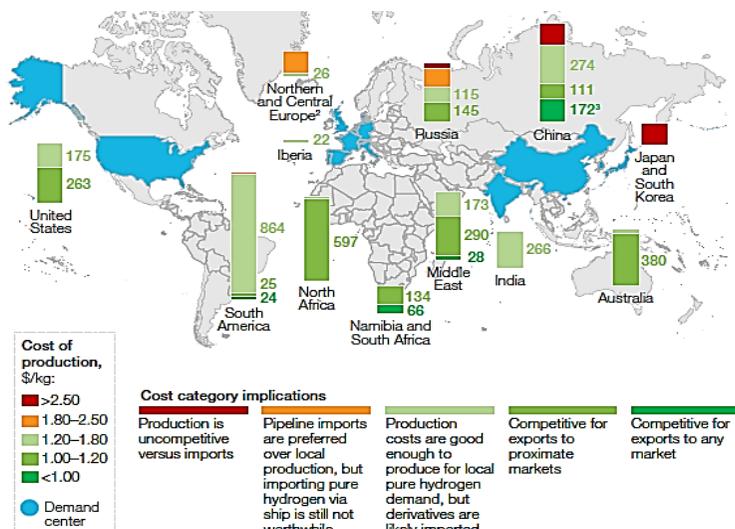


Figura 65: Potencial de produção de hidrogênio. Fonte: Hydrogen Council e McKinsey & Company (2022a) <https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/>

- Há um descompasso entre as melhores localizações para a produção de hidrogênio e os centros de demanda (uso).

- *O hidrogênio pode ser produzido em quase todas as regiões globais, mas a competitividade entre as regiões varia.*
- *Japão e Coreia do Sul possuem recursos de produção competitivos muito limitados e precisarão importar, enquanto a Europa Central e Ocidental não poderão produzir localmente os volumes de que precisam devido às limitações de capacidade.*

O Hidrogênio Verde é uma fonte de energia renovável que vem ganhando cada vez mais destaque no mundo. Ele é produzido a partir da eletrólise da água, utilizando energia elétrica de fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica, para separar as moléculas de água em oxigênio e hidrogênio.

O Brasil tem um grande potencial para se tornar um produtor de Hidrogênio Verde, pois possui uma grande quantidade de sol, área disponível e mão de obra qualificada. Além disso, a estabilidade política é um fator importante para atrair investimentos nessa área.

Atualmente, a demanda por Hidrogênio Verde vem aumentando em todo o mundo, e as empresas têm um papel fundamental nesse cenário. As empresas são responsáveis por impulsionar a economia e atender às necessidades da sociedade, e muitas estão investindo nessa fonte de energia renovável.

A Europa, que atualmente é uma das principais potências econômicas do mundo, tende a perder importância econômica nos próximos anos. Por outro lado, a Ásia vem se destacando cada vez mais nesse cenário, e a tendência é que se torne uma grande produtora e consumidora de Hidrogênio Verde.

No Brasil, apesar de ainda não sermos bons produtores de hidrogênio, temos custos competitivos para exportação para qualquer mercado. Isso faz com que o país seja uma opção interessante para os comerciantes que desejam adquirir esse produto.

Diante desse cenário, o Hidrogênio Verde apresenta-se como uma alternativa sustentável e promissora para suprir as necessidades energéticas do mundo, e o Brasil tem um papel importante a desempenhar nesse contexto.

A maioria dos países dependerá da produção e consumo de seu próprio hidrogênio do que da produção de seus próprios derivados, como amônia, aço verde, metanol e querosene sintético.

O hidrogênio produzido localmente não requer conversão (além da compressão da tubulação) ou reconversão, o que pode aumentar significativamente o custo total. Conseqüentemente, apenas os países que são limitados na produção doméstica competitiva normalmente importam hidrogênio puro.

A interação de diferentes pontos de partida, bem como a evolução dos custos de produção, conversão, transporte e taxas de reconversão, significam que as arbitragens comerciais surgirão e mudarão ao longo do tempo. Conseqüentemente, os requisitos e rotas comerciais serão dinâmicos.

No contexto da produção e cadeias de suprimentos de hidrogênio, existe um gráfico que mostra a demanda por hidrogênio em diferentes países, indicada pelo tamanho das bolhas. É interessante observar que China, Estados Unidos e Alemanha aparecem com alta demanda. Mas também é importante considerar se é mais vantajoso produzir hidrogênio localmente ou importá-lo.

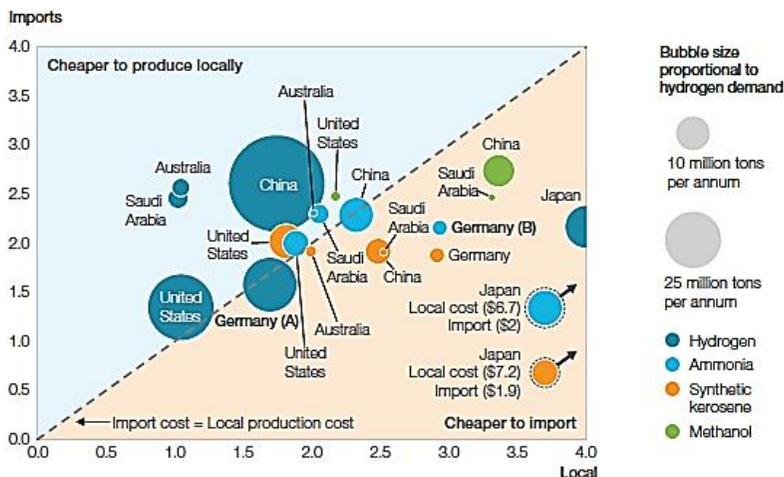


Figura 66: Cadeias de suprimentos de hidrogênio e produção. Fonte: Hydrogen Council e McKinsey & Company (2022a) <https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/>

O gráfico mostra que grandes demandadores, como a China e os Estados Unidos, podem encontrar vantagens em produzir localmente. Nesse caso, eles podem se tornar produtores e compradores. Por outro lado, países como Austrália e Arábia Saudita podem exportar excedentes de hidrogênio para serem consumidos em outros lugares.

O que chama a atenção é que o Brasil não aparece no gráfico. Isso pode indicar que o país ainda não é um grande produtor ou consumidor de hidrogênio, mas isso não significa que não possa se tornar no futuro. É importante lembrar que o Hidrogênio Verde pode ser uma fonte de energia limpa e renovável, capaz de ajudar na transição para uma matriz energética mais sustentável.

O hidrogênio azul é por vezes retratado como uma aposta segura, porque permite que os países produtores monetizem os recursos de gás natural e os gasodutos que, de outra forma, poderiam ficar sem uso. Mas a redução de custos esperada em Hidrogênio Verde, aliada a políticas mais rigorosas de mitigação do clima significa que os investimentos em cadeias de suprimentos baseadas em combustíveis fósseis (azul ou cinza) – especialmente os ativos que devem estar em operação por muitos anos – podem acabar sem uso.

A IRENA, em um estudo, identificou que o Hidrogênio Verde alcançará o menor custo do que o hidrogênio azul até 2030 (IRENA, 2020a). Pode fazê-lo ainda mais cedo em alguns países, como a China, devido aos seus eletrolisadores baratos, e o Brasil e Índia, devido às suas energias renováveis baratas e preços relativamente altos do gás natural.

No mundo da energia limpa, o Hidrogênio Verde é uma das soluções mais promissoras para substituir os combustíveis fósseis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Mas existem outras formas de produzir hidrogênio, como o hidrogênio azul. Neste trecho, vamos discutir um pouco mais sobre essas duas formas de produção e seus prós e contras.

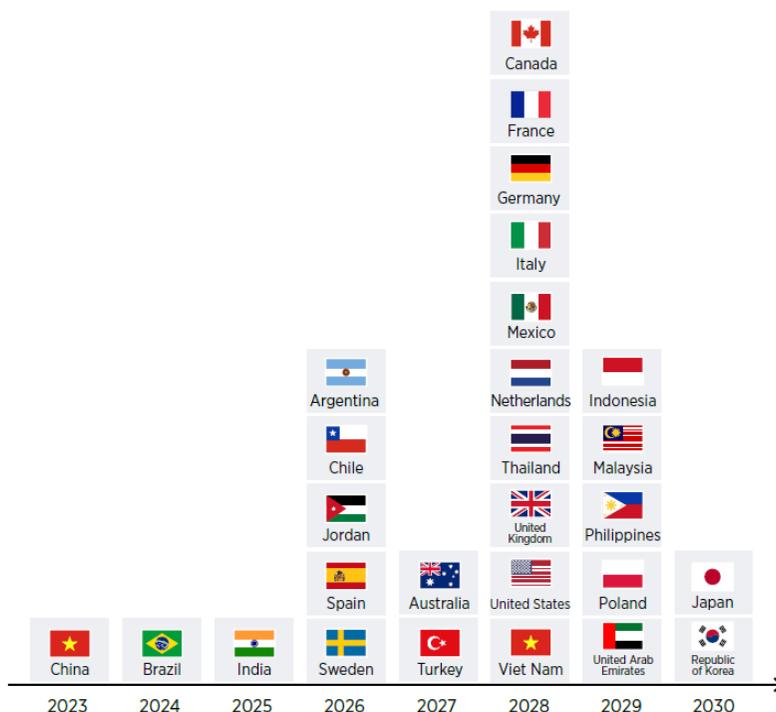


Figura 67: Países onde o hidrogênio verde pode se tornar mais barato do que o hidrogênio azul. Fonte: IRENA (2022a) < <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen> >

O hidrogênio azul é produzido a partir de gás natural, que é abundante e já tem uma cadeia de produção estabelecida. É tentador utilizá-lo como fonte de hidrogênio, mas para isso é necessário capturar e sequestrar o dióxido de carbono produzido durante o processo de produção. No entanto, a captura e sequestro do CO<sub>2</sub> é um processo incerto e pode não ser totalmente seguro. Uma opção seria transformar o CO<sub>2</sub> em algum produto, mas essa também não é uma solução totalmente clara.

Por outro lado, o Hidrogênio Verde é produzido a partir de eletrólise da água, utilizando fontes de energia renovável, como a solar ou eólica. Essa forma de produção de hidrogênio é limpa e sustentável, mas pode ser mais cara do que o hidrogênio azul em alguns países.

Neste trecho, também vimos que a China e o Brasil têm condições de produzir Hidrogênio Verde a um custo menor do que o hidrogênio azul. Outros países estão investindo em tecnologias para melhorar a produção e captura de hidrogênio, como a Índia.

Em resumo, a produção de Hidrogênio Verde é uma das soluções mais promissoras para um futuro mais limpo e sustentável. No entanto, o hidrogênio azul ainda é uma opção tentadora para muitos países, especialmente aqueles que já possuem uma cadeia de produção estabelecida. É importante continuar a investir em tecnologias para tornar a produção de hidrogênio mais limpa e sustentável, independentemente da forma escolhida.

Os Estados Unidos, por exemplo, ainda estão atrasados nesse desenvolvimento e precisam de mais seis anos para alcançar um patamar mais avançado. Enquanto isso, a China vem se destacando por produzir eletrolisadores com preço mais acessível e de qualidade superior.

No Brasil e na Índia, ainda se depende muito da venda de commodities, o que é preocupante. Quando não houver mais eletrolisadores baratos disponíveis, a produção de Hidrogênio Verde se tornará um gargalo. O Brasil já saiu dessa situação, mas ainda trabalha com tecnologias maduras, ou seja, que já são conhecidas e utilizadas há algum tempo. Por isso, é importante pensar em novidades e inovações para continuar avançando nessa área.

O Hidrogênio Verde é mais econômico em locais que possuem abundância de recursos, como terra disponível e acesso à água. No entanto, isso não é aplicável à Austrália, que é um país seco e árido. Além disso, é importante ter capacidade de transportar e exportar o hidrogênio para grandes centros de demanda, o que pode ser um dos principais desafios futuros.

Cada país possui suas peculiaridades, e a disponibilidade de matérias-primas, mão de obra e políticas de pesquisa e desenvolvimento são alguns dos fatores que os diferenciam. O Brasil, por exemplo, possui uma rede de pesquisa e desenvolvimento louvável, construída após

anos de luta e que precisa ser mantida e revitalizada. A expectativa é que o Hidrogênio Verde tenha um custo de produção menor do que o hidrogênio azul, que ainda depende do gás natural. O Brasil e a China já estão próximos de alcançar esse objetivo, mas ainda há desafios a serem superados, como a dependência de eletrolisadores importados.

Além disso, a disponibilidade e o custo de acesso a outras matérias-primas, bem como a mão de obra qualificada, são fatores importantes para a produção do hidrogênio. O Brasil possui uma rede de pesquisa e desenvolvimento que, apesar de construída após anos de luta, é considerada louvável para um país de terceiro mundo. É fundamental manter e revitalizar essa rede para continuar avançando na produção de Hidrogênio Verde.

O Hidrogênio Verde é esperado para ter um custo de produção menor do que o hidrogênio azul, que é produzido a partir do gás natural. O Brasil e a China já estão próximos de alcançar essa redução de custo, mas ainda enfrentam o desafio de produzir eletrolisadores nacionais. Atualmente, todo o equipamento utilizado no país é importado. Porém, há iniciativas em andamento para desenvolver essa tecnologia nacionalmente, como a chegada de um eletrolisador pronto para operação no PECEN. O aprendizado e a capacidade de produzir equipamentos nacionalmente são fatores fundamentais para o sucesso do Hidrogênio Verde no Brasil.

### **6.3. Custos das opções de transporte ao considerar o volume e distância**

Como o custo nivelado das energias renováveis difere significativamente entre os países, o preço do hidrogênio também será diferente.

O Hidrogênio Verde será produzido de forma mais econômica em locais que tenham uma combinação ótima de abundância de recursos renováveis, terra disponível, acesso à água e capacidade de transportar e exportar para grandes centros de demanda.

Existem dois modos principais de transporte de hidrogênio que cruzam fronteiras: dutos e navios. A distância e o volume determinam qual modo é mais barato. Por exemplo, com pequenos volumes (por exemplo, 0,3 milhões de toneladas de hidrogênio por ano), os dutos podem ser mais baratos do que os navios para distâncias inferiores a 1500 km. Para grandes volumes (por exemplo, 1,5 milhão de toneladas de hidrogênio por ano) e distâncias acima de 4000 km os navios seriam a opção mais econômica.

Ao pensar na produção de Hidrogênio Verde, é importante considerar diversos fatores que influenciam no seu custo e na sua competitividade. Infelizmente, em muitos casos, o custo é o que mais determina as escolhas, ainda que isso não reflita necessariamente na eficiência da produção.

Porém, a ideia da sustentabilidade trouxe novos valores e compromissos que não se limitam à economia e às finanças. Existem agendas específicas que consideram a importância de práticas sustentáveis na produção e utilização do Hidrogênio Verde.

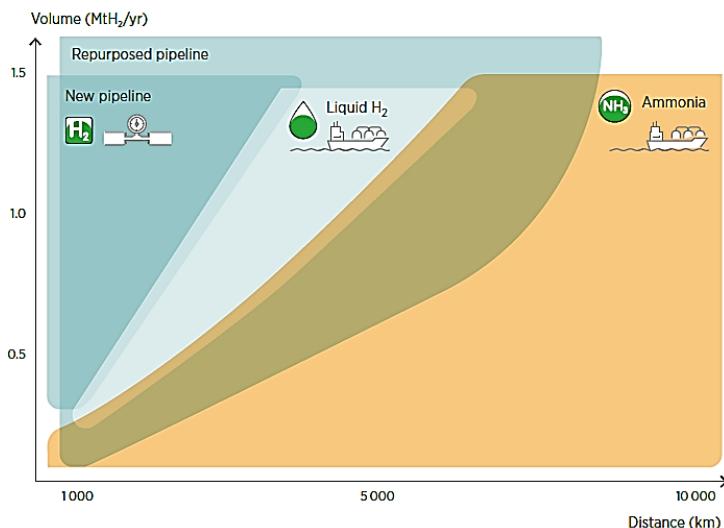


Figura 68: Custos das opções de transporte ao considerar o volume e distância. Fonte: IRENA (2022a). <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

No gráfico apresentado, podemos ver diferentes formas de utilização do hidrogênio, desde a produção e uso local, até sua distribuição urbana, entre cidades, regiões e até mesmo em nível intercontinental. Essas formas de uso são mapeadas em função dos volumes, sendo que os volumes menores são destinados para uso local, enquanto volumes maiores são destinados para transporte e exportação.

No entanto, é importante considerar que o transporte e exportação ainda apresentam altos custos, o que torna difícil competir no mercado global. Por isso, é necessário pensar em diferentes modais de transporte, como trem, para reduzir esses custos e tornar a produção mais competitiva.

Além disso, é importante considerar as diferentes formas de transporte disponíveis, incluindo o uso de caminhões comprimidos e gasodutos. Ao considerar todos esses fatores, é possível tornar a produção de Hidrogênio Verde mais sustentável, eficiente e competitiva no mercado global.

Com os desenvolvimentos na área de tecnologia, especialmente relacionados ao Hidrogênio Verde, é possível observar no diagrama que a partir do TRE 9 é que temos tecnologias maduras para produção de hidrogênio. Uma vez que o hidrogênio é produzido em um eletrolisador, é necessário seguir uma cadeia de conversão, transporte e reconversão, mesmo em caso de hidrogênio comprimido. Nem todos esses processos ocorrem em sequência, mas são necessários para distribuir e utilizar o hidrogênio.

No caso do hidrogênio líquido, já temos tecnologia madura com TRL alto de 9 para frente, mas ainda há questões a serem solucionadas no próprio processo de transporte, que precisa ser feito a  $-250^{\circ}\text{C}$ , e na regaseificação. A gaseificação já está pronta, mas o desafio está em fazer o reaproveitamento da energia. O gráfico apresentado contém muitas informações interessantes sobre o assunto.

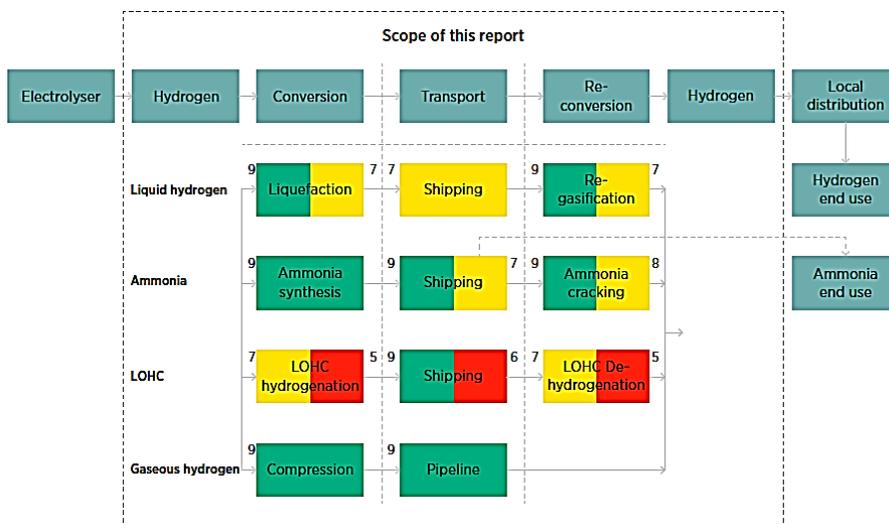


Figura 69: Etapas da cadeia de valor do hidrogênio por opção de transporte do hidrogênio. Fonte: IRENA (2022b) <<https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Global-hydrogen-trade-Part-II>>

- As cores indicam a maturidade da tecnologia com base no nível de prontidão da tecnologia (TRL), que é uma escala de 1 a 9 com o significado máximo da escala comercial. Verde = TRL 9; amarelo = TRL 7-8; vermelho = TRL 6 ou menos.
- Por exemplo, a (des)hidrogenação do LOHC é realizada apenas na escala de 1,5-5 t/d de hidrogênio.

Quanto à produção de amônia sintética, já temos tecnologia consolidada porque ela depende apenas do hidrogênio. O desafio aqui é no transporte e no retorno do hidrogênio, pois não é interesse ficar com a amônia. Para que toda a cadeia funcione, é necessário pensar também no reaproveitamento do material posteriormente.

O LOHC é outra possibilidade, que consiste em transformar o hidrogênio em líquidos sintéticos diversos. Essa tecnologia ainda está em estágios iniciais, com TRLs baixos e muita coisa desconhecida. Para pesquisadores e desenvolvedores, essa é uma área interessante para trabalhar, mas ainda falta competitividade nesse setor. É importante lembrar que é natural que coisas em desenvolvimento ainda não sejam competitivas, assim como a energia eólica há 30 ou 40 anos atrás.

Por fim, o hidrogênio comprimido já está pronto e possui TRL alto, sendo considerado bastante tecnológico. A preocupação está na adequação dos gasodutos, insegurança de vazamentos e na resistência dos materiais envolvidos, como válvulas e distribuição em geral.

No contexto do transporte de Hidrogênio Verde, a amônia é uma opção com tecnologia já consolidada e amplamente utilizada. Ela é produzida em larga escala e possui regulamentação e conhecimento estabelecidos em relação ao seu manuseio e periculosidade. Além disso, a amônia pode ser facilmente liquefeita, o que facilita o seu transporte.

No entanto, o processo de produção da amônia exige um alto consumo de energia e há a necessidade de realizar diversos outros processos para chegar à sua produção. Além disso, a reconversão do hidrogênio na amônia pode ser bastante penalizadora para quem importa, já que a produção de amônia é mais comum em países exportadores. É importante destacar também que a produção de amônia pode gerar a emissão de NOX, devido ao nitrogênio presente no processo de craqueamento.

Transporte de hidrogênio é uma parte importante da cadeia de produção e distribuição desse combustível. Existem diversas formas de transportá-lo, cada uma com suas vantagens e limitações.

Uma das opções é o uso de gasodutos, que já são amplamente utilizados para transporte de gás natural. No entanto, é importante lembrar que nem todas as regiões possuem infraestrutura de gasodutos disponível. Além disso, é necessário fazer adaptações nos materiais para que eles possam transportar hidrogênio, já que nem todos os materiais utilizados para gás natural são adequados para o transporte de hidrogênio.

### Amônia:

#### Vantagens:

- Já é produzido em larga escala;
- Já é comercializado globalmente;
- Baixas perdas de transporte;

- Elevada densidade energética e teor de hidrogênio;
- Portador sem carbono;
- Pode ser usado diretamente em algumas aplicações (por exemplo, fertilizantes, geração de energia, combustível para transporte marítimo);
- Pode ser facilmente liquefeito (20 °C a 7,5 bar ou -33 °C a 1 bar).

#### Desvantagens:

- Alto consumo de energia na síntese de amônia (12-26%);
- Alto consumo de energia (13-34%) na reconversão (região importadora) com necessidade de alta temperatura (até 900 o C), mas comum na faixa de 500-550 oC);
- Pode exigir purificação adicional do hidrogênio produzido;
- Compressão de hidrogênio necessária para a maioria das aplicações;
- Maior produção de NOx (óxidos de nitrogênio) durante o transporte exigiria tratamento de gases de combustão;
- Tóxico e corrosivo;
- Flexibilidade da síntese de amônia e craqueamento ainda a ser comprovada.

O hidrogênio líquido é outra opção para ser utilizada como combustível. Apesar de ser um pouco caro, ele apresenta vantagens importantes. Uma delas é que seu consumo é limitado por regiões, já que é necessário regaseificá-lo antes de utilizá-lo.

Além disso, ele não precisa passar por nenhum processo de purificação, pois já é o próprio hidrogênio. Embora a temperatura necessária para liquefazê-lo seja muito baixa, essa tecnologia já é comercialmente viável e está amplamente dominada.

No entanto, é importante lembrar que o transporte de hidrogênio líquido requer muita atenção, pois ele tem uma perda considerável de quantidade por dia. Além disso, é preciso levar em conta os gastos energéticos envolvidos na sua produção, transporte e armazenamento, já que podem ocorrer perdas ao longo do processo. Por isso, é

fundamental que o transporte seja realizado rapidamente para evitar perdas desnecessárias.

### Hidrogênio líquido:

#### Vantagens:

- Consumo limitado de energia para regaseificação (a maior parte da energia é consumida na região exportadora, que deverá ter baixos custos de energia renovável);
- Não há necessidade de um sistema de purificação no destino;
- Maior facilidade de transporte no terminal de importação;
- Baixo consumo de energia para aumentar pressão de hidrogênio;
- A liquefação já é uma tecnologia comercial;
- Portador sem carbono.

#### Desvantagens:

- Elevadas perdas de energia na liquefação (30-36%), o que exige maior fornecimento de energia;
- Ebulição (0,05-0,25% por dia) durante o transporte e armazenamento;
- As temperaturas criogênicas levam ao alto custo do equipamento;
- Atualmente disponível apenas em pequena escala.

O hidrogênio orgânico líquido é uma forma de hidrogênio que pode ser utilizada na infraestrutura já existente do petróleo. Isso torna o hidrogênio líquido interessante para a cadeia do petróleo, pois muitas coisas já estão prontas e existe armazenamento disponível.

No entanto, o processo para produzir o hidrogênio líquido consome muita energia, principalmente na etapa de desidrogenização em altas temperaturas. Isso se deve ao fato de que esse tipo de hidrogênio é utilizado em processos petroquímicos e outros. Atualmente, a tecnologia ainda precisa ser comprovada e o nível de maturidade tecnológica (TRL) ainda é baixo.

## Transportadores de hidrogênio orgânico líquido (LOHC):

### Vantagens:

- Pode ser transportado como o petróleo usando a infraestrutura existente, tornando-o adequado para transporte multimodal;
- Baixo custo de capital para todas as etapas;
- Pode ser facilmente armazenado.

### Desvantagens:

- Alto consumo de energia (25-35%) para desidrogenação (região importadora);
- Requer alta temperatura (150-400 °C) para desidrogenação;
- Requer maior purificação do hidrogênio produzido;
- O hidrogênio é produzido a 1 bar, exigindo compressão;
- Apenas 4-7% do peso do transportador é hidrogênio;
- Todas as transportadoras possíveis têm atualmente um alto custo;
- Perdas no transporte a cada ciclo (0,1% por ciclo);
- Portadores provavelmente conteriam fósseis CO<sub>2</sub>.

O transporte de hidrogênio através de gasodutos é uma opção muito viável e já existem muitos gasodutos em operação. No entanto, é importante observar que nem todas as regiões possuem gasodutos disponíveis. Além disso, é necessário fazer uma adequação dos materiais, pois nem todo material utilizado para gás natural pode ser utilizado para o hidrogênio.

Uma grande vantagem do uso de gasodutos para transportar hidrogênio é que não é necessário realizar a sua limpeza com frequência, como acontece com o gás natural. Isso porque o hidrogênio não apresenta resíduos que possam obstruir o gasoduto.

No entanto, é importante ressaltar que o transporte de hidrogênio é mais caro em termos de consumo de energia do que o transporte de gás natural. Isso ocorre porque o hidrogênio é transportado por volume e não por massa. Ou seja, é necessário bombear uma maior quantidade de hidrogênio para transportar a mesma quantidade de energia que o gás

natural. Isso faz com que o consumo de energia para o transporte de hidrogênio seja praticamente o dobro do consumo de energia para o transporte de gás natural.

### Gasoduto:

#### Vantagens:

- O transporte e o armazenamento são comprovados em escala comercial;
- A rede de dutos existente pode ser reaproveitado para o hidrogênio;
- Nenhuma conversão é necessária (somente compressão);
- Portador sem carbono;
- Torna-se mais atraente à medida que o volume aumenta.

#### Desvantagens:

- O armazenamento em tipos específicos de reservatórios pode levar a perdas e contaminação (necessidade de purificação);
- Nem todos os materiais de tubulação são adequados para hidrogênio;
- Nem todas as regiões têm gasodutos;
- O custo aumenta significativamente para gasodutos offshore;
- O consumo de energia para o transporte é superior ao do gás natural.

### Custos das opções de transporte ao considerar o volume e distância:

Um ponto positivo do transporte por gasodutos é a facilidade de regulamentação, já que existem regulamentações específicas para gasodutos em muitos países e regiões. No entanto, é preciso ter em mente que o transporte de hidrogênio por gasodutos pode consumir mais energia do que o transporte de gás natural, já que o hidrogênio tem menos energia por unidade de volume do que o gás natural.

Outra opção de transporte é o uso de navios para transportar hidrogênio líquido. Essa opção é especialmente vantajosa para grandes volumes transportados em distâncias maiores. É importante lembrar que o

transporte de hidrogênio líquido também exige adaptações nos materiais utilizados para armazenamento e transporte.

Por fim, é importante mencionar que existe a possibilidade de converter o hidrogênio em amônia para transporte por gasodutos e navios. No entanto, essa opção pode ser mais complexa e exigir mais investimentos em infraestrutura e conversão de amônia de volta em hidrogênio.

Cada opção de transporte tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha dependerá de diversos fatores como disponibilidade de infraestrutura, distância a ser percorrida e volume a ser transportado.

#### **6.4. Fornecimento global de hidrogênio e derivados a longa distância inter-regional**

O maior volume de transferência de longa distância será de gasodutos domésticos do oeste para o leste da China e dentro dos Estados Unidos. A Europa também importará grandes volumes de hidrogênio canalizado de sua periferia, incluindo da Noruega e do norte da África.

Depois do hidrogênio canalizado, a amônia e o querosene sintético serão os produtos mais comercializados. A amônia será exportada da Austrália, Oriente Médio, América do Norte e do Norte da África.

Os maiores exportadores de querosene sintético serão o Chile, Oriente Médio e África Austral. E o aço verde será dominado pelo Brasil e Canadá, com exportações para a China.

O comércio de metanol da América do Norte para a China será uma rota importante, e o hidrogênio embarcado será predominantemente comercializado do Oriente Médio para o Japão e a Coreia do Sul.

Em um sistema de comércio global otimizado, certos fluxos que podem existir desde o início, como Austrália, Oriente Médio e África Austral para a Europa, podem ser reorientados para a Ásia para otimizar os fluxos comerciais globais em todo o mundo.

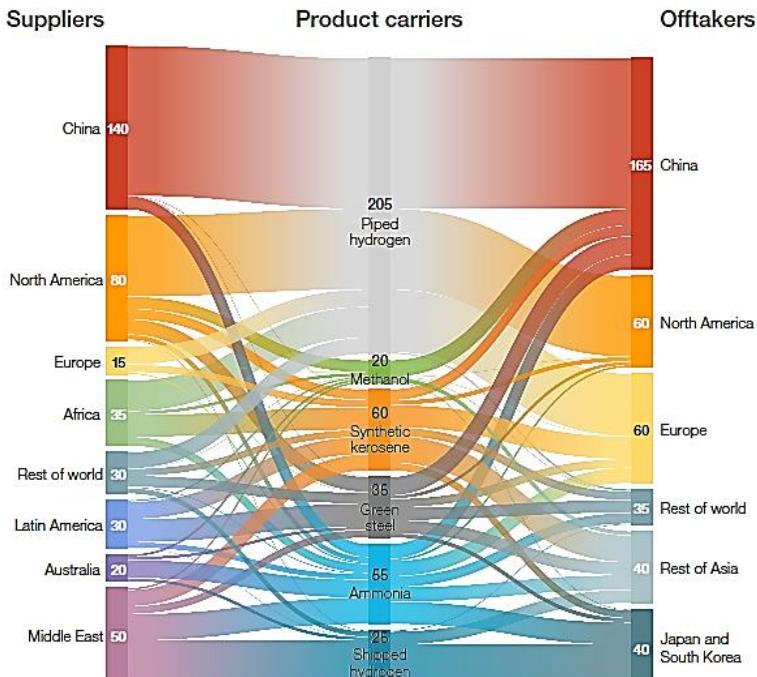


Figura 70: Fornecimento global de hidrogênio e derivados a longa distância inter-regional. Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a)

Este gráfico possui muita informação e pode ser um pouco confuso para entender. Por isso, a informação foi limpa para que possamos entender o que é mais interessante. Antes de mostrar os pontos destacados, é bom observar no diagrama para visualizar a distribuição.

De um lado, temos os supridores, a América Latina, juntamente ao Chile, Argentina e Uruguai. Do outro lado, temos os Offtakers, que são os consumidores, ou seja, aqueles que vão utilizar o Hidrogênio Verde para produzir algo.

No meio está o transporte por gasodutos que pode ser convertido em metanol, querosene sintético e utilizado para aviação. O aço verde é um produto final e não retorna para ser transformado em hidrogênio novamente. A amônia pode ser utilizada ou não. O hidrogênio é despachado por navios, em sua forma líquida.

Observe que a China pode produzir cerca de 140, mas como é um grande consumidor, ela precisa importar. Os Estados Unidos possuem uma produção maior do que o consumo interno. Já a Europa tem uma capacidade de produção muito pequena e um consumo quatro vezes maior do que a produção. O Japão e a Coreia também são grandes consumidores, mas não aparecem como produtores neste mapa.

É importante lembrar que o Hidrogênio Verde é uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser utilizada em diversos setores, como transporte e indústria, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa e contribuindo para a sustentabilidade do planeta.

No cenário do Hidrogênio Verde, a transferência de longa distância será realizada principalmente por gasodutos domésticos, como ocorre na China e nos Estados Unidos, onde já existe uma rede de transporte consolidada. Porém, em países que produzem e consomem, como a Europa, a maior parte do hidrogênio será importada de países produtores como a Austrália, Oriente Médio e América do Norte. Além disso, outros produtos derivados do hidrogênio, como a amônia e o querosene sintético, também serão comercializados e exportados para diferentes regiões do mundo.

A amônia será exportada principalmente da Austrália, Oriente Médio e América do Norte, enquanto o querosene sintético será exportado pelo Chile, Oriente Médio e África Austral. Já o aço verde terá como principais exportadores o Brasil e o Canadá, com destino à China. O metanol, por sua vez, será comercializado da América do Norte para a China.

Quanto ao transporte, o hidrogênio líquido será predominantemente comercializado do Oriente Médio para o Japão e Coreia do Sul. É importante destacar que, no sistema global de comércio, os fluxos podem ser reorientados para otimizar os fluxos comerciais e atender à demanda dos grandes consumidores, como a Ásia.

Nesse contexto, a interligação comercial é fundamental para garantir a eficiência do mercado global de comércio de hidrogênio. Embora a guerra comercial seja uma possibilidade, a dependência mútua pode

postergar possíveis conflitos em grande escala. Assim, a interligação comercial pode ser vista como um compromisso capaz de gerar benefícios para todos os envolvidos, além de reduzir a possibilidade de conflitos.

A via de transporte de hidrogênio mais econômica em 2050 em função da dimensão do projeto e da distância do mercado.

O mercado global de transporte de hidrogênio é influenciado pela distância e pelo tamanho dos projetos. Existem adaptações dos gasodutos para o transporte de hidrogênio e amônia. Os combustíveis líquidos ainda têm uma posição inicial e ganharão importância com o tempo.

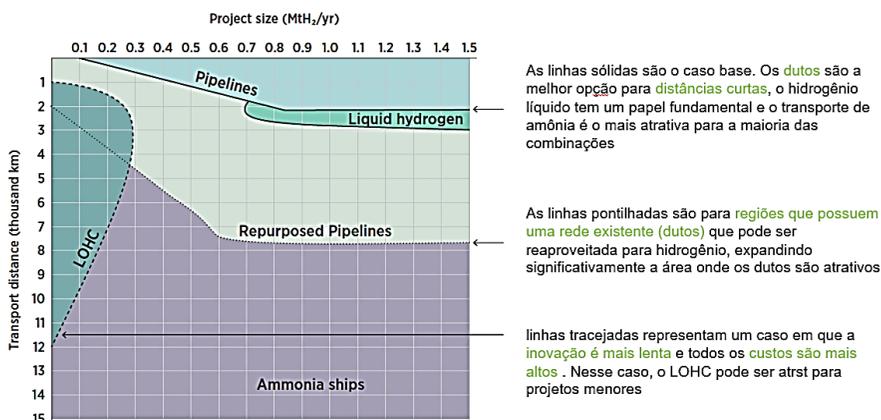


Figura 71: A via de transporte de hidrogênio mais econômica em 2050 em função da dimensão do projeto e da distância do mercado. Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a)

O custo do transporte de hidrogênio é influenciado pela distância. Para o transporte intercontinental, a forma mais conveniente é a amônia, utilizando navios. Para curtas distâncias, o transporte é feito através de gasodutos. O custo do transporte intercontinental pode ser superior a U\$2,0/kg. Existem várias opções para o transporte, incluindo amônia, combustíveis líquidos, metanol e hidrogênio líquido, que podem ser combinados para atender à demanda de cada caso.

## 6.5. Projetos de investimento

Dos 534 projetos de grande porte (anunciados antes de maio de 2022) no valor de US\$ 240 bilhões, que serão implantados até 2030, 165 (cerca de um terço) estão a ser submetidos a estudos de viabilidade e apenas 10% dos investimentos tiveram uma decisão final do investimento.

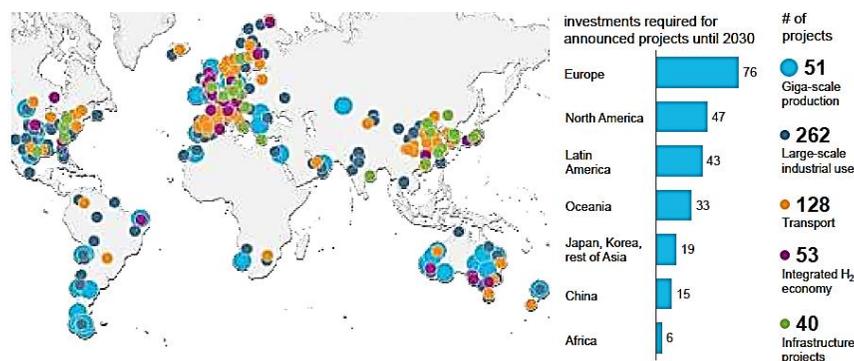


Figura 72: A via de transporte de hidrogênio mais econômica em 2050 em função da dimensão do projeto e da distância do mercado. Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a)

Quando se fala em Hidrogênio Verde, é importante considerar os investimentos, infraestrutura e desenvolvimento industrial necessários para tornar essa tecnologia viável em larga escala. No mundo todo, existem muitos projetos em fase de planejamento e aprovação, mas poucos deles já se tornaram realidade. Isso porque o uso do hidrogênio como fonte de energia ainda é uma novidade e requer investimentos significativos em pesquisas, desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura.

Atualmente, Estados Unidos e China são os principais países que lideram os investimentos em Hidrogênio Verde, enquanto a Rússia tem se mantido discreta nessa área. Na África, há alguns projetos sendo desenvolvidos, principalmente no norte do continente. Na Europa, a maioria dos projetos está focada no consumo de hidrogênio, em vez da produção. Já na América Latina, existem alguns projetos em andamento e a região ocupa a terceira posição em termos de investimentos.

É importante lembrar que o transporte de hidrogênio é influenciado pela distância e o custo pode variar bastante. Para distâncias intercontinentais, por exemplo, é mais conveniente utilizar o hidrogênio em forma de amônia, por meio de navios. Já para curtas distâncias, os gasodutos são mais indicados.

Os combustíveis líquidos ainda não possuem um TRL maduro e têm uma posição inicial, mas devem ganhar importância com o tempo. Portanto, não há uma solução única para o transporte de hidrogênio, mas sim uma combinação de opções que podem ser utilizadas em conjunto.

É baixo o número de projetos que avançaram para execução (comprometidos).

São necessárias ações prioritárias do governo (políticas públicas) e da indústria (investimento)

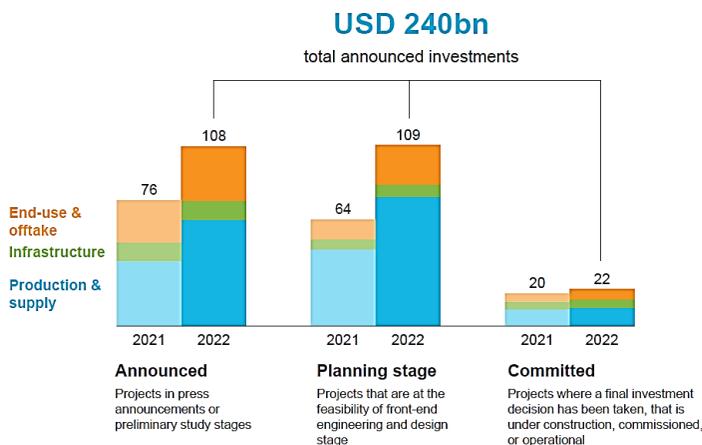


Figura 73: **Projetos de investimentos global.** Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a) < <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf> >

O desenvolvimento de projetos relacionados ao Hidrogênio Verde ainda está em uma fase inicial. Muitas notícias sobre esses projetos são divulgadas, mas poucas avançam da fase de protocolos de intenção para a ação concreta. Apenas 10% dos investimentos relacionados ao hidrogênio já têm decisão em todo o mundo. Isso acontece porque o

desenvolvimento desses projetos ainda é uma novidade e requer uma análise cuidadosa de viabilidade.

Nesse contexto, é importante destacar o papel do Estado. O mercado não é capaz de regular sozinho o desenvolvimento desses projetos, sendo necessário que o Estado atue na criação de políticas públicas que incentivem a produção e o consumo do Hidrogênio Verde. Portanto, é fundamental a colaboração entre o Estado e o mercado para que haja uma efetiva implementação dos projetos relacionados ao Hidrogênio Verde.

Dentro do contexto de desenvolvimento de projetos relacionados ao Hidrogênio Verde, cada agente tem um papel importante a desempenhar. A indústria é responsável por projetos de pesquisa e desenvolvimento, buscando aprimorar tecnologias e obter economia de escala para, por fim, construir os projetos.

Já o Estado tem um papel fundamental na regulamentação e orientação desses projetos, garantindo segurança tanto interna quanto nas relações internacionais e coordenando ações em âmbito internacional. Além disso, o Estado deve garantir o equilíbrio entre oferta, demanda e produção, bem como investir em formação de pessoal e pesquisa e desenvolvimento.

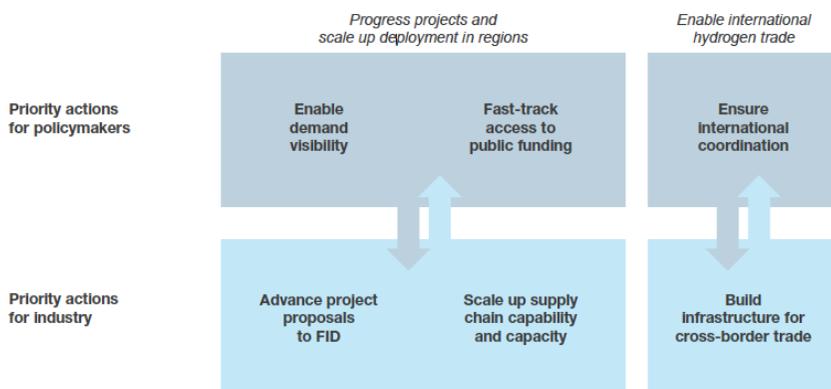


Figura 74: **Sincronizar esforços dos governos com a indústria.** Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a) < <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf> >

- *Planejamento de mercado interno e externo – pelos governos*
- *Considerar a infraestrutura adequada – por parte da indústria*

Para cumprir suas funções, o Estado precisa de recursos financeiros, arrecadados e distribuídos de forma estratégica para apoiar ações que visam ao desenvolvimento sustentável e à transição para uma economia baseada em energias renováveis.

No mundo, há vários países que estão investindo em tecnologias de Hidrogênio Verde, como China, Europa, Estados Unidos e Japão, que são os principais. Cada país tem sua especialidade: na China, o destaque é para os eletrolisadores, enquanto na Europa há projetos de manufatura. Nos Estados Unidos, há tanto manufatura quanto pesquisa em eletrolisadores e construção de membranas.

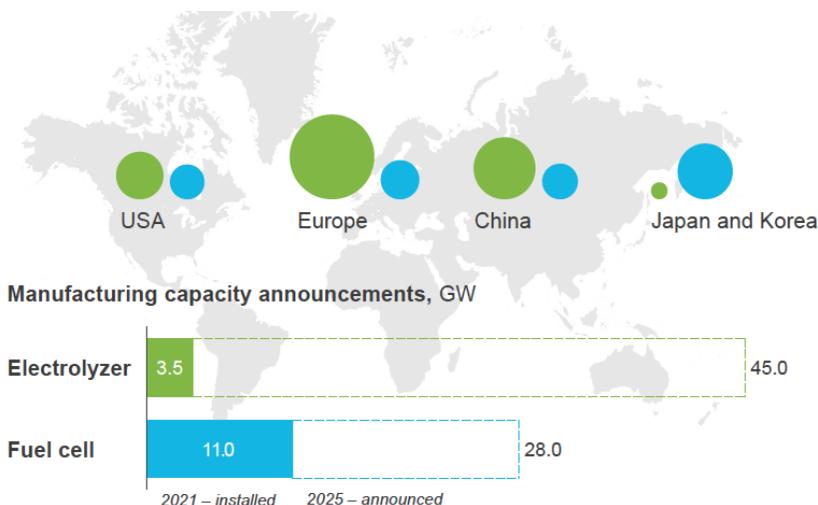


Figura 75: Capacidade de fabricação de eletrolisadores e células de combustível. Fonte: Hydrogen Council and McKinsey & Company (2022a) < <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf> >

- *Europa, China e EUA serão os principais fornecedores de eletrolisadores.*
- *Japão e Coreia do Sul serão os principais fornecedores de células de combustível.*

No Brasil, infelizmente, ainda estamos longe de ter uma indústria de Hidrogênio Verde tão avançada. Enquanto em outros países há instalações de manufatura e pesquisa que impressionam, aqui ainda não

temos sequer uma fábrica de chips, o que é uma vergonha para um país de tamanho e importância como o nosso. Precisamos investir mais em capacitação de mão de obra e em tecnologia para podermos competir nesse mercado e contribuir para um futuro mais sustentável.

Alguns dutos de transmissão de gás natural existentes poderiam ser reaproveitados (com modificações técnicas) para transportar hidrogênio.

Cada nova decisão de investimento é de longo prazo, portanto, novas infraestruturas de gasodutos devem considerar o uso de vários tipos de gases. Por exemplo, qualquer gasoduto construído hoje deve ser passível de “reaproveitamento” para transportar hidrogênio e/ou biometano.

## 6.6. Infraestrutura para H2

Na busca pela expansão da produção e do uso do Hidrogênio Verde, um aspecto crucial é a infraestrutura para o transporte e distribuição desse combustível limpo. Em várias partes do mundo, existem redes de gasodutos e rotas marítimas que podem ser utilizadas para transportar o hidrogênio.

Na África, por exemplo, existem algumas rotas de transporte que ligam o continente a regiões como a Europa e o Oriente Médio. O Canal de Suez é uma passagem obrigatória para o transporte de hidrogênio que vem de algumas regiões africanas.

No Oriente Médio, existem rotas de transporte que conectam a região à Europa, via Turquia. Além disso, há ligações intercontinentais que conectam a China ao seu lado ocidental.

No Brasil, temos o gasoduto Bolívia-Brasil, que traz gás natural da Bolívia até o Rio Grande do Sul, e outras ligações de gasodutos que atravessam o Nordeste do país. Já a Argentina possui uma rede antiga de gasodutos, mas que nem sempre é confiável para o transporte de hidrogênio e biometano.

A construção de novas infraestruturas para transporte de Hidrogênio Verde é essencial para a sua disseminação global. Cada país deve avaliar suas possibilidades e investir em soluções que permitam o transporte seguro e eficiente do combustível limpo.

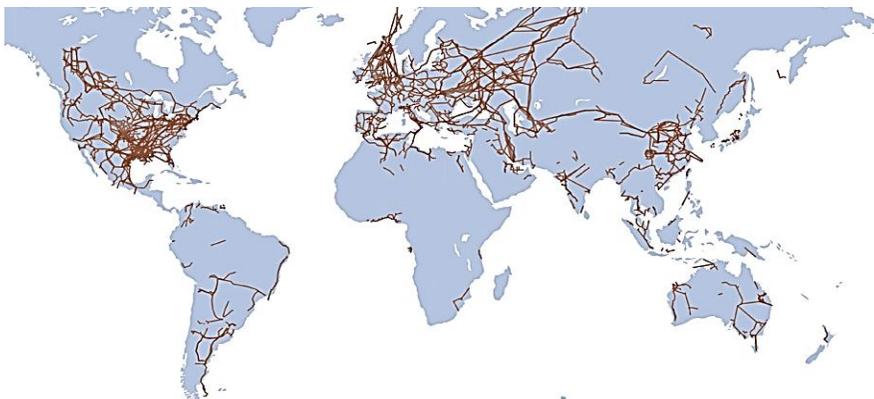


Figura 76: Capacidade de fabricação de eletrolisadores e células de combustível. Fonte: IRENA (2022a) <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>



Figura 77: Avaliação da reutilização da atual rede de gasodutos na Europa para hidrogênio. Fonte: DNV (2022) <[https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html?utm\\_source=Google&utm\\_medium=Search&utm\\_campaign=eto22&gclid=Cj0KCQjwk5ibBhDqARIsACzmgLSy9cc-99C21Q3A1CjeqooXoPFWSZjL0VTCptv\\_wcB-KE9zFiJitIla](https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html?utm_source=Google&utm_medium=Search&utm_campaign=eto22&gclid=Cj0KCQjwk5ibBhDqARIsACzmgLSy9cc-99C21Q3A1CjeqooXoPFWSZjL0VTCptv_wcB-KE9zFiJitIla)>

- Categoria A: gasodutos reutilizáveis considerando o estado atual de conhecimento/padrões (avaliado pela equipe Re-Stream) – Cinza.
- Categoria B: gasodutos que requerem mais testes e/ou atualização de padrões para serem reutilizáveis (avaliados pela equipe Re-stream) – Azul.
- Categoria A: gasodutos reutilizáveis (avaliados por TSOs-Operadores de Sistemas de Transmissão) – Verde.

## 6.7. Desenvolvimento industrial em países ricos em energias renováveis

O acesso à energia tem sido um dos principais fatores que determinam a localização da atividade industrial. Desde a dinastia “Song” do século 12 na China, na Inglaterra durante a Revolução Industrial e no Alto Centro-Oeste dos Estados Unidos no século 20, as indústrias siderúrgicas surgiram em locais com acesso ao carvão e minério de ferro.

Para indústrias de uso intensivo de energia, como aço, produtos químicos, petroquímicos, metais não ferrosos e produtos cerâmicos, o custo da matéria-prima e do combustível fóssil representa uma parte importante dos custos totais de produção.

Alguns países sem acesso a energias renováveis baratas poderão manter indústrias a jusante, assim como países sem petróleo podem ter grandes indústrias petroquímicas. Mas algumas indústrias de uso intensivo de energia podem se mudar para países com excedentes renováveis de baixo custo, exportando commodities ou produtos semi-acabados (ferro reduzido direto etc.) para acabamento em outros países.

A Austrália, por exemplo, atualmente exporta minério de ferro para os altos-fornos a carvão da China, que produzem metade do aço do mundo. Dado o enorme potencial renovável da Austrália, pode-se argumentar para que ela mude da exportação de coque e minério de ferro para a exportação direta de ferro reduzido baseado em hidrogênio renovável.

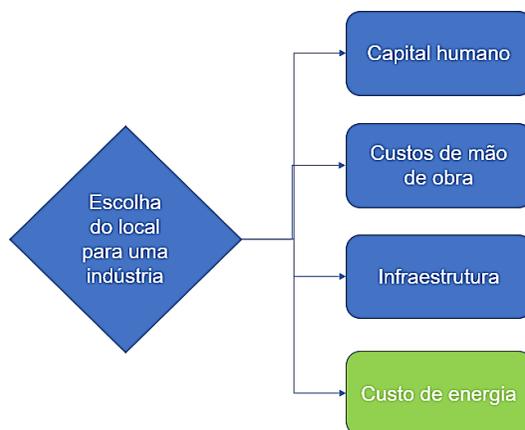


Figura 78: Desenvolvimento industrial em países ricos em energias renováveis. Fonte: IRENA (2022a) < <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen> >

O Brasil é um bom produtor de energia e, por isso, também pode ser um candidato a receber o uso final da energia produzida. A escolha do local para uma indústria está diretamente relacionada ao custo de energia, o que coloca o Brasil em uma posição favorável.

No entanto, a infraestrutura ainda é um ponto fraco em comparação com países como Estados Unidos, Europa, China e Japão. O custo de mão de obra também é discutível, já que os salários no Brasil são deprimidos e as leis trabalhistas acabam encarecendo a mão de obra. Além disso, o capital humano brasileiro tem potencial, mas é necessário investir em educação para qualificá-lo.

## 6.8. Projetos de produção de H2 Verde

Na Europa, já estão sendo instalados eletrolisadores que permitem produzir Hidrogênio Verde em uma única unidade. Essa tecnologia é uma das principais apostas do continente para atingir suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e de transição para uma economia de baixo carbono.

## Países Baixos

### POSHYDON



- Considerado o primeiro projeto offshore de hidrogênio verde do mundo.
- Integração de três sistemas de energia no ambiente marinho: energia eólica offshore, gasoduto existente e produção de hidrogênio verde.
- A plataforma está localizada a 13 km da costa de Scheveningen, a uma profundidade de 20m.
- Sistemas: unidade de conversão química compreendendo: (a) sistema de eletrólise e unidade de tratamento de água, (b) sistema de energia, uma unidade de HVAC
- Entre os componentes que necessitam de energia elétrica para funcionar estão: o sistema de bombeamento de água, o eletrolisador, os trocadores de calor, a instrumentação, os painéis mestres de controle.

### NorthH<sub>2</sub>

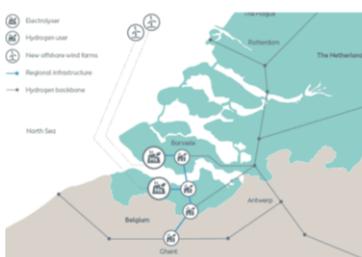


- O projeto NorthH2 é considerado o maior projeto de produção de hidrogênio verde.
- O projeto prevê a construção de parques eólicos offshore exclusivamente para a produção de hidrogênio verde (3 a 4 GW para 2030 e 10 GW para 2040)
- O projeto inclui a instalação de turbinas eólicas offshore, que ficarão localizadas entre 80 e 100 km da costa norte da Holanda, a uma profundidade de 35 m.
- As turbinas eólicas a serem instaladas têm potência nominal entre 12 e 15 MW.
- O eletrolisador inicialmente será localizado em terra, mas com possibilidade de mudança para ambiente offshore e construção de rede gasodutos para o escoamento da produção.

Figura 79: Produção de hidrogênio verde: Europa.

Fonte: Hidrogênio Global Flows, Hydrogen Council e McKinsey & Company (2022b)

### SeaH2Land



- O projeto 'SeaH2Land' visa integrar a eletrólise em escala GW à grande demanda industrial no cluster holandês do Mar do Norte através de um gasoduto regional.
- A visão da SeaH2Land inclui um sistema de produção de hidrogênio renovável com capacidade de 1 GW até 2030
- O projeto contempla conectar um eletrolisador de capacidade de 1 GW diretamente a um novo parque eólico offshore com capacidade de geração de eletricidade de 2 GW.
- Prevê a conexão da usina ao sistema regional de dutos, com 45 km de extensão entre Holanda e Bélgica.

Figura 80: Produção de hidrogênio verde: Europa.

Fonte: Hidrogênio Global Flows, Hydrogen Council e McKinsey & Company (2022b)



É considerado que o hidrogênio será transportado em estado líquido para os Estados Unidos, Europa, África e Ásia (FGV EUROPE, 2022).

O Porto do Pecém é um local estratégico para o projeto da ENERGICKS, que abrange o Complexo Industrial do Pecém em uma área de 500 hectares. O objetivo principal é a produção de 600 mil toneladas por ano de Hidrogênio Verde, com foco na exportação. Embora a produção esteja sendo viabilizada, também há planos para exportação do produto.

Centro de hidrogênio de Quair, está localizado no porto de Suape, Pernambuco.

Será implantado em duas fases, com início de operação em 2025. A empresa planeja instalar um complexo para o hidrogênio verde, produzido a partir de eletrólise com energia renovável. Também inclui uma usina de dessalinização para usar a água do mar.



Figura 82: Projeto da Quair. Fonte: SUAPE (2022)

A energia elétrica será gerada por usinas eólicas e solares. Na primeira fase, a planta de eletrólise será de 1 GW. Além disso, o projeto prevê uma expansão para mais de 2 GW na segunda etapa (EPBR, 2022).

O projeto de Hidrogênio verde da Unigel estará localizado no Pólo Industrial de Camaçari, na Bahia.

A Unigel pretende construir a planta de Hidrogênio Verde com um investimento inicial de US\$ 120 milhões. A usina deve entrar em operação até o final de 2023 (UNIGEL, 2022).

A planta, em sua primeira fase, terá capacidade de produção de 10.000 toneladas/ano de hidrogênio e 60.000 toneladas/ano de amônia.



Figura 83: Hidrogênio verde da Unigel. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Na segunda fase, prevista para entrar em operação em 2025, a planta deve quadruplicar sua produção. A usina deverá gerar pelo menos 500 empregos diretos e indiretos (UNIGEL, 2022).

A energia elétrica será da fonte eólica. Para a primeira fase do projeto, a Unigel adquiriu da thyssenkrupp três eletrolisadores com potência total de 60 MW de energia (UNIGEL, 2022).

Na Bahia, a empresa Unigel está construindo uma fábrica de Hidrogênio Verde que está se tornando a maior fábrica desse tipo no Brasil. A produção de Hidrogênio Verde é considerada uma alternativa mais limpa em relação à produção de hidrogênio convencional, uma vez que é produzida a partir de eletricidade renovável e água, não gerando emissões de gases de efeito estufa durante o processo. A Unigel está investindo nessa tecnologia para suprir a crescente demanda por Hidrogênio Verde no mercado e contribuir para uma economia mais sustentável.

A planta será instalada no Porto do Açu, no Rio de Janeiro, em parceria com a Shell Brasil.

O projeto tem capacidade inicial de 10 MW, podendo chegar a 100 MW (EPBR, 2022a). Os usuários finais serão os setores de fertilizantes,

produtos químicos, energia e transporte. O projeto está dividido em 3 fases (SHELL, 2022).



Figura 84: Hidrogênio verde do Porto do Açúcar. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Fase 1 (Central de eletrólise de demonstração) – A linha de transmissão será ligada à planta de eletrólise, que terá como principal produto o hidrogênio renovável. Parte do hidrogênio gerado será destinado ao armazenamento e posterior envio a potenciais consumidores.

Fase 2 (Aumento de capacidade) – A planta passará por um aumento em sua capacidade, permitindo, assim, testes em maior escala da aplicação de hidrogênio renovável, principalmente no processo de descarbonização industrial.

Fase 3 (Expansão da capacidade com integração de fontes renováveis de energia) – A usina terá um aumento adicional de sua capacidade de geração através da conexão com uma segunda fonte de geração de energia.

## Considerações Finais

Espera-se que este livro tenha fornecido uma introdução abrangente ao mundo do hidrogênio, com foco na "*Hidrogênio Verde e oportunidades de mercado: nacional e internacional*". Durante esta exploração, foram abordados aspectos essenciais relacionados à observação crítica das mudanças climáticas globais.

Foi enfatizada a inserção do H<sub>2</sub> no mercado como forma de minimizar emissões de CO<sub>2</sub>; políticas de custos e contabilidade de carbono; estudo da viabilidade técnica e econômica para implantação de projetos e negócios em H<sub>2</sub>.

Também foram abordados temas que envolvam o dimensionamento da capacidade de produção de H<sub>2</sub> e os custos da operação; emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do processo, vantagens e desvantagens do uso de eletricidade da rede e/ou energias renováveis in situ ou dedicada para produção de H<sub>2</sub>.

## Referências

DOE, EPA. Relatório da força-tarefa interagências sobre captura e armazenamento de carbono. Departamento de Energia e Agência de Proteção Ambiental; 2010.

IEA, NEA, OECD. Perspectivas da tecnologia energética 2015. Agência Internacional de Energia, Agência de Energia Nuclear e Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico; 2015.

Viktorsson L, Heinonen J, Skulason J, Unnthorsson R. A step towards the hydrogen economy: a life cycle cost analysis of a hydrogen re-labeling station. *Energies* 2017;10.

Neuling, U., Hydrogen supply chains, Dia da Engenharia Alemã, VDI, 2021.

Sachverständigenrat für Umweltfragen, Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse, junho 2021, p.48/fig.8.

<https://devkopsys.de/ptx-atlas/>

PtX-Atlas - DeV-KopSys (devkopsys.de)

Fraunhofer IEE, relatório P2X Atlas, 2021

BloombergNEF, Hydrogen Economy Outlook, 2022.

Neuling, U., Hydrogen supply chains, Dia da Engenharia Alemã, VDI, 2021.

União Europeia, Avaliação das Opções de Entrega de Hidrogênio, 2021 - JRC124206, p.3.

Nationaler Wasserstoffrat, Wasserstofftransport, julho de 2021, p.4.

<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

Conselho de Hidrogênio, Hydrogen Insights Report 2021

Bank, R., Power-to-X como base para a logística energética global, Deutscher Ingenieurtag, VDI, 2021

Agora Energiewende, Agora Indústria, 12 Insights on Hydrogen, 2021, p. 41/fig.25.

<https://www.hydeal.com/copie-de-hydeal-ambition#Thelargestgreenhydrogenhub>

DLR, Kawasaki, 2021

<https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>

Neuling, U., Hydrogen supply chains, Dia da Engenharia Alemã, VDI, 2021.

Schmidt, M., Politische und ökonomische Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära, FVEE Annual Conference 2021.

Fonte: Proposta da Aliança PtX para a concepção e ponderação dos critérios para a compra de eletricidade da rede de eletricidade dos eletrólitos para a produção de combustíveis renováveis de acordo com a Arte. 27 da Diretiva de Energia Renovável (RED II) - Power to X Alliance (ptx-allianz.de)

Stiftung Umweltenergierecht, Requisitos legais para hidrogênio verde, 2021

Novas exigências da Comissão Europeia para o mercado europeu de gás e hidrogênio e para a segurança do abastecimento de gás - BBH Blog (bbh-blog.de)

Nova estrutura da UE para descarbonização dos mercados de gás (europa.eu)

Novas exigências da Comissão Europeia para o mercado europeu de gás e hidrogênio e para a segurança do abastecimento de gás - BBH Blog (bbh-blog.de)

Nova estrutura da UE para descarbonização dos mercados de gás (europa.eu)

Rothfuchs, H., Gelingt die Einbindung von Wasserstoff in die Energieversorgung?, StorEnergy Congress, 2021

<https://h2-global.de/#konzept>,

<https://www.iwr.de/news/bundesregierung-will-import-von-gruenem-wasserstoff-beschleunigen-news37474>

900 milhões de euros para projetos de hidrogênio - A Comissão Europeia aprova a H2Global - Associação Alemã de Hidrogênio e Células a Combustível (DWV) e. V. ([dvw-info.de](http://dvw-info.de))

IRENA (2022a) <  
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen> >

Hydrogen Council e McKinsey & Company (2022a) <  
<https://hydrogencouncil.com/en/global-hydrogen-flows/>>

# H2BRASIL



[www.quali-a.com/h2brasil](http://www.quali-a.com/h2brasil)



Por meio da:



Apoio:



Organização:

