

RAFAEL CELSO PEREIRA

**GEOPOLÍTICA E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA ALEMANHA:  
POTENCIALIDADES E DESAFIOS DO HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Universidade Anhembi  
Morumbi para obtenção do título de  
Bacharel em Relações Internacionais.

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana de Souza  
Leite Garcia

SÃO PAULO  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, meu pai Geraldo Pereira que serviu como minha primeira referência profissional e apresentou caminhos que foram fundamentais para formação do meu caráter. Minha mãe Joselia Pereira, que conduziu a vida de nossa família com grande amor, apesar das adversidades. Minha irmã Rosane Cristina que apesar da distância nunca deixou de estar nos meus pensamentos.

A minha linda esposa Leticia Silva, a mulher inteligente e guerreira que me inspira e motiva a seguir em frente.

Aos meus amigos, aos que estão próximos, aos que por qualquer motivo não estão presentes, mas que a sua amizade me deram força para chegar até aqui. Agradecimentos especiais a meus amigos que não estão mais presentes nessa vida, Douglas Paixão e Fábio Marques, mas parte deles sempre estarão presentes comigo.

Aos meus colegas e professores de curso, que me trouxeram uma nova visão de mundo, espero honrá-los compartilhando bons momentos e conhecimento.

Aos meus colegas profissionais, em especial dos grupos de trabalho sobre hidrogênio verde da Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR) e da Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio) onde pude explorar o tema de estudo desse trabalho.

A dedicação da minha orientadora Profa. Dra. Tatiana de Souza Leite Garcia, a quem devo muito pelas horas de discussões, análises críticas e recomendações de bibliografia, que foram fundamentais para a conclusão desse trabalho e me motivam a continuar explorando o tema em artigos científicos e teses que estão por vir.

As diversas instituições, autores que serviram como base para esse trabalho e todos aqueles que me inspiram a inovar, perseverar e buscar respostas para questões fundamentais da vida.

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de analisar o contexto geopolítico energético da Europa para uma transição de baixo carbono e explorar como a Alemanha se tornou protagonista do fomento a descarbonização da economia através do hidrogênio verde. Apresento o contexto geopolítico de segurança energética após a invasão da Ucrânia pela Rússia que acelerou os programas de fomento e desenvolvimento tecnológico da cadeia de valor do hidrogênio, tanto da perspectiva dos mercados consumidores quanto dos países com potencial de geração de energia renovável e hidrogênio verde em grande escala. Também apresento uma análise do mercado energético alemão, suas políticas públicas, planejamento e sua estratégia de cooperação e fomento da produção do hidrogênio nos diferentes mercados. São apresentadas as rotas tecnológicas do hidrogênio, incluindo as formas possíveis de produção, armazenamento, transporte e as dinâmicas do mercado. Abordo o posicionamento dos diferentes mercados de produção de hidrogênio, incluindo seus *roadmaps*. Exploro uma visão holística dos *cases* globais de projetos de hidrogênio verde, características técnicas principais, processos e impactos na sociedade. Encerro o trabalho abordando as principais cooperações internacionais sobre o tema, incluindo uma análise quanto ao posicionamento do Brasil nesse novo tabuleiro da geopolítica energética de baixo carbono.

**Palavras-chave:** Geopolítica; Energia; Hidrogênio; Alemanha.

## ABSTRACT

The present final paper aims to analyze the geopolitical energy context in Europe for a low carbon transition and explore how Germany became a protagonist in promoting the decarbonization of the economy through green hydrogen. I present the geopolitical context of energy security after Russia's invasion in Ukraine, which speed up programs for the promotion and technological development of the hydrogen value chain, both from the perspective of consumer markets and countries with potential for generating renewable energy and green hydrogen in utility scale. I also present an analysis of the German energy market, its policies, planning and its strategy of cooperation and promotion of hydrogen production in different markets. The technological routes of hydrogen are presented, including the possible forms of production, storage, transport and market dynamics. I address the positioning of the different hydrogen production markets, including their roadmaps. I explore a holistic view of global cases of green hydrogen projects, key technical characteristics, processes and impacts on society. I close the paper by addressing the main international cooperation on the subject, including an analysis of Brazil's position on this new board of low-carbon energy geopolitics.

**Keywords:** Geopolitics; Energy; Hydrogen; Germany.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Traçado dos gasodutos europeus – Nord Stream 1 e 2.....	32
Figura 2- Mapeamento dos dez maiores fabricantes de eletrolisadores da Europa e a capacidade produtiva .....	40
Figura 3 - Projetos da cadeia de valor H2V na EU – Innovation Fund – European Commission.....	48
Figura 4 - Complexo para a produção de H2V - <i>Mohammed Bin Rashid Al Maktoum</i> .....	50
Figura 5 - Projeto FH2R em Fukushima no Japão .....	51
Figura 6 - Projeto de Power-To-X em Haru-Oni no Chile. ....	55
Figura 7- Planta industrial para produção de amônia verde na Espanha.....	56
Figura 8 - Projeto da startup Strohm – Dutos para o escoamento de H2V Offshore.....	58
Figura 9 - Plataforma digital – Malha de estações de carregamento de veículos a H2 .....	59
Figura 10 - Projeto de armazenamento de H2V em caverna Hycavmobil.....	60
Figura 11 - Projeto Aquasector – Produção de H2V offshore no Mar do Norte alemão .....	62
Figura 12 - Planta de produção de H2V para refino de petróleo em Wesseling.....	64
Figura 13 - Estratégia nacional de hidrogênio lançado em 2020 – Alemanha.....	69
Figura 14 - Reportes de 2021 – Implementação da estratégia nacional de H2 – Alemanha .....	70
Figura 15 - Logo Euro – Repowereu .....	72
Figura 16 - Cadeia de valor dos combustíveis sintéticos derivados de H2V .....	75
Figura 17 - White Paper – força tarefa Austrália e Alemanha – Cadeia produtiva ....	77
Figura 18 - Área delimitada na Colômbia para a produção de eólica offshore (Concessão de Prismas).....	85
Figura 19 - Atlas de recursos energéticos renováveis na Argélia.....	87
Figura 20 - Roadmap de H2V no Uruguai .....	89
Figura 21 - Estudo de cooperação para a exploração do potencial do H2V entre Arábia Saudita e Alemanha.....	91
Figura 22 - Mapa para o armazenamento e integração de redes de transportes de H2 na Europa em 2040 (European Hydrogen Backbone).....	95

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Cores do hidrogênio e características do processo de produção.....	36
Quadro 2- Quadro comparativo dos tipos de tecnologia para eletrólise.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área necessária para produção de energia. ....	16
Tabela 2- Pegada de carbono de bens essenciais.....	20

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz energética global INCC e Acordo de Paris .....	22
Gráfico 2 - Matriz elétrica da Alemanha em 2020 .....	29
Gráfico 3 - Matriz energética primária da Alemanha – Primeiro semestre de 2022 ..	29
Gráfico 4- Perfil de consumo elétrico diário alemão. ....	30
Gráfico 5 - Projeção de produção de amônia até 2050 – IRENA 2022. ....	38
Gráfico 6 - Custos logísticos de H2 intercontinentais .....	42
Gráfico 7- Densidade energética dos combustíveis .....	44
Gráfico 8 - Densidade volumétrica x energética dos combustíveis .....	44
Gráfico 9 - Projeção de demanda de aplicação do hidrogênio por aplicação – IRENA (2022).....	46
Gráfico 10 - Impactos no preço para a competitividade do H2.....	47
Gráfico 11 - Competitividade para a produção de H2V no Brasil .....	93

## LISTA DE INFOGRÁFICOS

Infográfico 1 - Processo químico de eletrólise para a produção de H <sub>2</sub> V.....	37
Infográfico 2 - Rotas de transporte usuais para o hidrogênio em larga escala.....	43
Infográfico 3 - Mapa de projetos de produção de aço verde na Europa.....	53
Infográfico 4 - Projeto Aquaventus na Alemanha .....	65
Infográfico 5 - Projeção de custos e panorama da estrutura regulatória – H <sub>2</sub> Latam.....	73
Infográfico 6 - Dinâmica do mercado internacional de H <sub>2</sub> V.....	78
Infográfico 7- Integração do porto de Rotterdam com o Backbone (malha de distribuição de H <sub>2</sub> V na Europa).....	80
Infográfico 8- Estratégia de curto, médio e longo prazo para o H <sub>2</sub> V no Reino Unido.....	82
Infográfico 9 - Área necessária para a produção e exportação de H <sub>2</sub> V no Brasil .....	94
Infográfico 10 - Estrutura operacional H <sub>2</sub> global para o leilão de H <sub>2</sub> V na Alemanha .....	96

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	13
2 GEOPOLÍTICA ENERGÉTICA.....	15
2.1 Geopolítica.....	15
2.2 Geopolítica das energias não renováveis .....	16
2.3 Geopolítica da energia renovável .....	17
3 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA .....	20
3.1 Visão geral.....	20
3.2 Matriz Energética Global e Panorama Atual .....	21
3.3 Segurança Energética .....	24
3.4 3 Ds (Descarbonização, Digitalização e Descentralização).....	25
4 MERCADO ENERGÉTICO ALEMÃO .....	28
4.1 Matriz Energética Alemã.....	28
4.2 Perfil de Consumo Elétrico Alemão .....	30
5 CONTEXTO DE DEPENDÊNCIA DOS GÁS NATURAL RUSSO .....	31
5.1 Acordos de Suprimentos de Gás Com a Alemanha .....	31
5.2 Projetos Nord <i>stream</i> 1 e 2.....	32
5.3 Conflito entre Rússia e Ucrânia .....	33
6 HIDROGÊNIO VERDE .....	35
6.1 Características do hidrogênio .....	35
6.2 Cores do hidrogênio.....	35
6.3 Processo Haber-Bosch - Produção de amônia verde.....	37
6.4 Produção De Hidrogênio Verde .....	38
6.4.1 Tecnologias .....	38
6.4.2 Transporte.....	41
6.4.3 Armazenamento .....	43
6.5 Projeções de Custos e Produção .....	45
6.5.1 Fundo de Investimento Europeu para Projetos de Inovação47	
6.5.2 Abu Dhabi Hydrogen Alliance.....	49
6.5.3 FH2R - Campo de Pesquisa de Hidrogênio em Fukushima50	
6.5.4 Energia Renovável e H2V na Produção de Aço Verde .....	51

6.5.5 Projeto Power-to-X em Haru-Oni no Chile - Produção de combustíveis sintéticos através de hidrogênio verde .....	53
6.5.6 Planta de Amônia Verde - Iberdrola .....	55
6.5.7 <i>Startups</i> no mercado de hidrogênio verde .....	56
6.6 Projetos na Alemanha.....	58
6.6.1 H2 Mobility - Malha de estações de carregamento de H2..	58
6.6.2 Projeto de P&D Hycavmobil - Armazenamento de hidrogênio em cavernas.....	59
6.6.3 Projeto Aquasector - estudo investiga potencial para o primeiro parque de hidrogênio offshore de grande escala no mar do norte alemão .....	61
6.6.4 Projeto Refhyne - hidrogênio verde no processo de refino de petróleo na Alemanha .....	62
6.6.5 Aquaventus: geração de energia eólica e hidrogênio verde <i>offshore</i> na Alemanha .....	64
6.7 Políticas de fomento ao hidrogênio verde no mercado alemão .....	65
7 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA REGIONAL.....	71
7.1 Planos de integração energética do hidrogênio no contexto da União Europeia .....	71
7.1.1 Repowereu: plano de aceleração da transição energética europeia .....	71
7.1.2 Panorama do mercado de hidrogênio verde na América Latina e Caribe.....	73
7.2 Regras da União Europeia para o P2X ( <i>Power to X</i> ).....	74
7.2.1 Força tarefa para o mercado de hidrogênio verde Austrália-Alemanha .....	75
7.2.2 Mapa das dinâmicas de importações e exportações de H2 de baixo carbono em 2040.....	77
7.2.3 Port of Rotterdam - Hub de importação de hidrogênio para Europa.....	78
7.2.3 Estratégia para o hidrogênio do Reino Unido.....	80
8.1 A competitividade na produção de hidrogênio .....	83
8.1.1 O mercado de eólica offshore e hidrogênio na Colômbia...	83

8.1.2 A geopolítica energética dos mercados emergentes para o hidrogênio verde.....	85
8.1.3 Roadmap do mercado de hidrogênio verde no Uruguai.....	87
8.1.4 Cooperação Arábia Saudita e Alemanha para a produção de hidrogênio .....	90
8.1.5 Cooperação entre Brasil e Alemanha para a produção de hidrogênio .....	91
8.1.6 Projeto European Hydrogen Backbone .....	94
8.1.7 Programa alemão H2 global.....	95
CONCLUSÃO.....	97
REFERÊNCIAS .....	99

## 1 INTRODUÇÃO

A geopolítica energética é o estudo de como os Estados se posicionam no tabuleiro das relações internacionais e também envolve o 'olhar' para dentro do território de cada país, a considerar sua autossuficiência e segurança energética. Os recursos energéticos são essenciais para o desenvolvimento das nações, pois contribuem para o seu desenvolvimento econômico, melhora nos indicadores de qualidade de vida e avanços tecnológicos.

Nas últimas décadas o mundo desenvolveu a percepção do ônus causado por uma matriz energética predominante em combustíveis fósseis. É consenso na comunidade científica os efeitos do aquecimento global e como as crises climáticas eminentes colocam nosso futuro em risco. Nesse sentido, governos, grandes empresas e a academia têm se dedicado ao fomento de economia de baixo carbono.

Há décadas a Alemanha tornou-se pioneira entre os países desenvolvidos, no que se refere a diversificação, descentralização e inovação tecnológica de sua matriz energética, com a introdução e ampliação na produção e uso de fontes renováveis, justamente para diminuir sua dependência de fontes não renováveis obtidas no seu território ou importadas de outros países. O país teve papel fundamental na inserção e consolidação das fontes termonuclear, solar fotovoltaica, eólica, eletrificação do mercado de mobilidade e agora tem sido a principal fomentadora do mercado de hidrogênio de baixo carbono, o hidrogênio verde.

Nos últimos meses, com a crise entre a Ucrânia e a Rússia, o mercado europeu reconhece a necessidade de aceleração da sua transição energética, principalmente para reduzir sua dependência do gás natural russo. Soma-se ao momento pós-pandemia de Covid-19, pois muitos países consideram a transição energética um mecanismo estratégico para o crescimento econômico.

Nesse contexto de transição energética global, a Alemanha vislumbra o hidrogênio verde como fonte potencial para substituição do gás natural; porém, para sua produção seria necessária grande disponibilidade de recursos energéticos renováveis de baixo carbono, como geração de energia eólica e solar. Somente a Alemanha demandará 100 TWh de hidrogênio verde em 2030 e só será capaz de produzir internamente 10% dessa capacidade. A limitação desses recursos não só na Alemanha, mas em toda a Europa, traz uma grande oportunidade para os países com

grande potencial em radiação solar, ventos com alta velocidade em terra ou no mar, além de domínio nas tecnologias para produção de energia renovável em grande escala.

Nesse sentido, os atores estatais e não estatais do atual tabuleiro da geopolítica energética estão se movimentando rumo às estratégias para sua cadeia de valor do hidrogênio verde. Partindo dessa conjuntura, o objetivo deste estudo é analisar essas movimentações e todos os elementos que orbitam a transição energética para o hidrogênio verde, tendo como referência o mercado energético da Alemanha.

## 2 GEOPOLÍTICA ENERGÉTICA

### 2.1 Geopolítica

A definição tradicional de geopolítica é a influência da geografia sobre as relações externas dos Estados. No entanto, nos últimos anos, o papel dos atores não estatais nas relações internacionais cresceu e se tornou cada vez mais reconhecido. Líderes e formuladores de políticas são cada vez mais consumidos por ameaças transnacionais, que representam desafios para vários países e cruzam fronteiras, como, por exemplo, a cibernética, o terrorismo e as mudanças climáticas (SULLIVAN, 2017).

O termo geopolítica foi utilizado pela primeira vez pelo cientista político sueco Rudolf Kjellén (1894-1922) inspirado pela obra geografia política do geógrafo alemão Friedrich Ratzel (1844-1904). A geopolítica clássica tratava das relações entre poder, ambiente, estado, território, guerra, estratégia e geografia; já a geopolítica moderna incorpora também as questões relacionadas ao meio ambiente, mudanças climáticas, energia, disputas econômicas, conflitos culturais e ideológicos, mudanças demográficas, guerras cibernéticas e inovações tecnológicas (CARMONA, 2020). Segundo Ronaldo Carmona (2020), a geopolítica energética pode ser definida como o impacto dos fluxos de energia sobre o poder e a influência das nações.

O setor da energia possui uma dinâmica de transição (evolução) contínua determinada pela segurança nacional de suprimento em função do acesso aos recursos energéticos e de inovação tecnológica que visa a redução dos custos e ganhos de eficiência na sua produção e competitividade.

Podemos incluir entre esses vetores de evolução a recente preocupação pela descarbonização, influenciando para que os países busquem explorar novos recursos energéticos, ao ponto da descoberta e exploração de novas fontes de energia alterar o equilíbrio de poder nas relações internacionais.

Na tabela abaixo apresento uma relação entre o espaço físico e o potencial para produzir energia a partir das diversas fontes de recursos. A partir de uma análise comparativa entre as fontes, percebesse que um dos grandes desafios, que está associado à geopolítica, é a necessidade de grandes áreas para a produção de energia com baixa pegada de carbono como solar, eólica, hidrelétricas e biomassa.

Tabela 1 - Área necessária para produção de energia

<b>Quanta Potência podemos gerar por metro quadrado ?</b>	
<b>Fonte de Energia</b>	<b>Watts por metro quadrado</b>
Combustíveis fósseis	500 - 10.000
Nuclear	500 - 1.000
Solar	5 - 20
Hidrelétrica (barragens)	5 - 50
Eólica	1 - 2
Biomassa (madeira e outras)	Menos de 1

Fonte: GATES (2021).

## **2.2 Geopolítica das energias não renováveis**

Por décadas, a geopolítica da energia tem sido amplamente sinônimo da geopolítica do petróleo e do gás. O foco em como o petróleo e o gás moldam a maneira como os Estados se desenvolvem, interagem uns com os outros, formam alianças e travam guerras fez um certo sentido. Petróleo e gás respondem por mais da metade do consumo global de energia e capturaram cerca de 70% do investimento total em fornecimento de energia de 2000 a 2015. Os sistemas de transporte do mundo e as economias nacionais dependem quase completamente do suprimento de petróleo (SULLIVAN, 2017).

Na indústria do petróleo, a formação de preços decorre da interação entre os atores a partir de cálculos de poder relativo e, secundariamente, segundo as leis de oferta e demanda ou da relação “livre” entre produção e consumo. No contexto da energia como recurso de poder ocorre um choque de vontades entre produtores e consumidores de energias em que o estado produtor está interessado em potencializar e monetizar os recursos e o estado consumidor precisa garantir sua segurança energética, diversificar fornecedores e firmar bons acordos comerciais, porém, nem sempre esses três fatores convergem (CARMONA, 2020).

A ação do cartel da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) é um exemplo de geopolítica do petróleo em que a formulação de preços sofreu influência de questões inerentes à razão de mercado (CARMONA, 2020).

É importante ressaltar algumas características geográficas e técnicas dos combustíveis fósseis. Os recursos fósseis são finitos, as reservas de petróleo e carvão estão concentradas principalmente no Golfo Pérsico, na Rússia e na região do Mar Cáspio. Considerando a produção centralizada em oligopólios, os mercados

consumidores estarão sempre sujeitos a vulnerabilidade no suprimento (CARMONA, 2020).

### 2.3 Geopolítica da energia renovável

A velocidade da transição energética para uma matriz mais limpa e renovável dependerá das decisões e estratégias que cada Estado adota e está condicionada a evolução das tecnologias que permitem o aproveitamento mais intensivo das fontes de energia renovável e a intensificação da capacidade de armazenamento de energia gerada por essas fontes, que são consideradas intermitentes, ou seja, estão limitadas a disponibilidade da velocidade e disponibilidade do vento (m/s) e a radiação solar (kWh/m<sup>2</sup>). Grandes investidores em inovação como Elon Musk da Tesla, Jack Ma do Alibaba e Jeff Bezos da Amazon tem investido em *startups* que buscam desenvolver essa capacidade. A *Bloomberg Nef* previu investimentos de US\$ 9 bilhões em 2019 em baterias, quatro vezes mais que em 2017. As baterias de lítio registram queda de 85% nos custos em relação a 2010 (CARMONA, 2020, p. 5-6).

De acordo com Francis O'Sullivan, do MIT Initiative, “estamos saindo de um mundo em que o valor da energia está incorporado no recurso para onde a tecnologia é o recurso” (THE ECONOMIST, 2018).

Conforme apontado por André Moreira Nascimento (2020 *apud* CARMONA, 2020), existem cinco características geográficas e técnicas da geração de energia renovável que são:

1. Não são escassas ou geograficamente restritas como os combustíveis fósseis e todo país tem pelo menos alguma fonte de energia renovável disponível;
2. As principais fontes renováveis como solar e eólica são intermitentes;
3. Possibilidade de serem exploradas de forma distribuída e descentralizada;
4. As tecnologias às vezes requerem materiais de terras raras que por vezes precisam ser importados;
5. Necessidade de uma infraestrutura física para a transmissão elétrica para a integração entre países, diferentes de navios petroleiros que atravessam o mar aberto.

No relatório *The Geopolitics of Renewable Energy* (O'SULLIVAN, OVERLAND e SANDALOW, 2017) são elencados sete mecanismos pelos quais a transição para energias renováveis poderá alterar a geopolítica energética (CARMONA, 2020, p. 39-41):

1. Cadeias de suprimentos de materiais críticos estarão sujeitos a cartéis;
2. Dinâmica dos mercados de materiais essenciais para a transição energética. Lítio utilizado nas baterias de veículos elétricos e para controle da intermitência das fontes renováveis estão concentrados na Austrália, Chile, China e Argentina. A Bolívia possui uma reserva significativa e inexplorada de lítio. O índio e o cobalto também são utilizados na manufatura de painéis fotovoltaicos e baterias. A China fornece metade do índio do mundo e a República Democrática do Congo fornece mais da metade do cobalto do mundo;
3. Disponibilidade de recursos e tecnologia poderão se tornar uma oportunidade de cooperação entre os estados ou motivo de tensão geopolítica entre países em desenvolvimento e desenvolvidos. Conflitos poderão surgir em função da integração da infraestrutura para transmissão de energia elétrica ou escoamento de hidrogênio, embates entre a exploração do mercado por *startups* em um mercado descentralizado e grandes empresas com influência financeira e científica;
4. Uma nova maldição dos recursos, onde os países produtores de energia renovável, em que países com disponibilidade de recursos minerais estariam sujeitas as controvérsias sócio-políticas, econômicas e ambientais quanto ao impacto e a influência das renováveis em sua economia;
5. Mudanças nas redes elétricas. Possibilidade de integrações elétricas entre países por meio de redes multinacionais (*supergrids*) ou a descentralização através da geração distribuída (*microgrids*) e a autoprodução de energia (*off-grids*);
6. Menor demanda de óleo e gás natural em que possibilitaria impulsos a reformas políticas e diversificação econômica nos países produtores;

7. As energias renováveis como solução para as mudanças climáticas e podem reduzir o risco de conflitos e instabilidade por escassez de recursos, porém pode aumentar os casos e intensidade de desastres naturais.

A geopolítica da energia renovável será fundamental para entendermos a futura dinâmica dos estados a partir dos princípios que serão apresentados nos próximos capítulos. A matriz energética global passará por mudanças profundas nas próximas décadas, fundamentadas por uma transição energética de baixo carbono; por isso, é preciso ter visão geral de como é a matriz energética atual, as motivações e os pilares para essa transição que impactará como consumimos energia, transformamos as matérias-primas e evoluímos tecnologicamente para atingir metas desafiadoras de descarbonização.

## 3 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

### 3.1 Visão geral

A transição energética é um conceito que representa a transformação da forma como produzimos e consumimos energia. O avanço das tecnologias e a necessidade para uma matriz energética de baixo carbono e descentralizada, com o objetivo de mitigar situações de insegurança energética em âmbito nacional e reduzir a dependência de fornecedores internacionais

Na tabela abaixo, apresentamos uma adaptação do livro do Bill Gates “Como Evitar um Desastre Climático” da pegada de carbono na produção de bens essenciais. A partir do mapeamento de quais setores possuem maior pegada de carbono, ou seja, emitem mais GEE (Gases de Efeito Estufa), a sociedade é capaz de tomar ações para adaptar as formas a produção a meios mais sustentáveis (GATES, 2021).

Tabela 2- Pegada de carbono de bens essenciais

<b>Qual é a proporção de Gases de Efeito Estufa gerada pelas coisas que fazemos ?</b>	
Fabricar as Coisas (Cimento, aço e plástico)	31%
Ligar as coisas na tomada (eletricidade)	27%
Cultivar e criar as coisas (plantas e animais)	19%
Transportar as coisas (aviões, caminhões e cargueiros)	16%
Manter as coisas quentes e frias (sistemas de aquecimento, ar-condicionado e refrigeração)	7%
	100%

Fonte: GATES (2021).

Abordarei adiante os conceitos conhecidos como três D's que significam descentralização, digitalização e descarbonização e sintetizam a proposta da transição energética. Com a evolução das tecnologias para a produção de energia renovável, muitos países têm conseguido descarbonizar a sua matriz elétrica, porém, as emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) não estão limitados à produção de eletricidade.

Veremos no decorrer do estudo o porquê de o hidrogênio verde é considerado um catalisador da transição energética. O hidrogênio verde é uma possibilidade real de descarbonizar indústrias intensivas em demanda de calor, a produção de fertilizantes verdes e a descarbonizar a indústria de transportes, considerando as

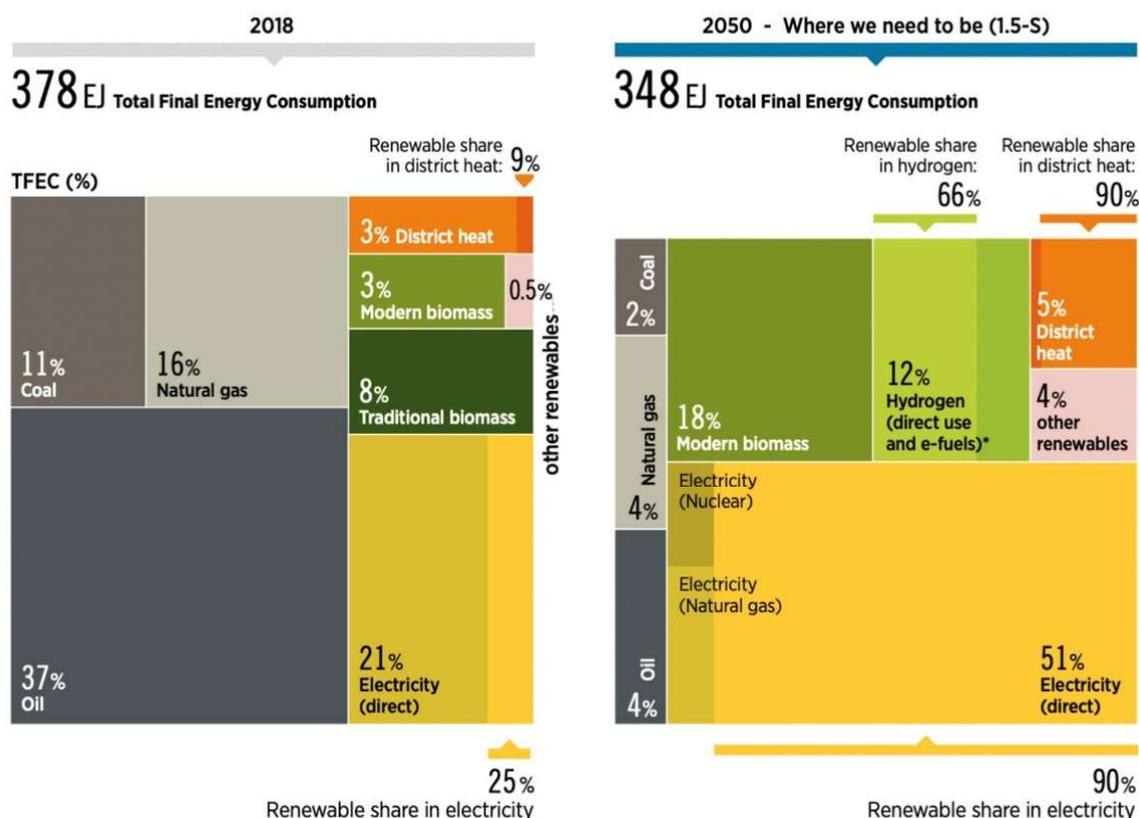
limitações físicas e econômicas de eletrificação de veículos pesados (caminhões, trens, navios e aviões), ou seja, através do hidrogênio e da energia renovável seria possível descarbonizar integralmente a cadeia de bens essenciais.

### **3.2 Matriz Energética Global e Panorama Atual**

De acordo com o artigo "*Action on Clean Hydrogen is Needed to Delivery Net-Zero by 2050. Here's how*" do World Economic Forum, para atingirmos essa meta de limitar o aumento de temperatura global a 1,5 °C até 2050, será necessário rever nossa matriz energética global e substituir os combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, porém como já exploramos, existe o desafio das limitações como a disponibilidade de recursos renováveis nos grandes mercados consumidores, superar a intermitência e a conversão em poder calorífico de forma eficiente.

No gráfico abaixo é apresentado a matriz global de 2018 como uma referência da matriz atual com participação de 25% de fontes de energia renovável e a matriz projetada para 2050 com participação de 90% de fontes de energia renovável para garantir a meta de aumento da temperatura global em 1,5 °C (BOUSSIDAN; SANDSTROM; STARK, 2022).

Gráfico 1 - Matriz energética global INCC e Acordo de Paris



Matriz energética atual e meta para atender as recomendações do INCC e Acordo de Paris para 1,5 °C em 2050.

Fonte: BOUSSIDAN; SANDSTROM; STARK (2022).

Para termos uma visão sistêmica do panorama energético atual será preciso analisar a política energética das principais potências globais: EUA, União Europeia e China.

Os EUA aumentaram sua autonomia energética com a produção de petróleo e *shale gas*, reduzindo consideravelmente a importação do Oriente Médio e provocou excesso de oferta no mercado internacional a partir de 2014. A OPEP liderada pela Arábia Saudita recusou-se a reduzir a produção mesmo com a queda drástica do preço do barril visando desestimular a produção americana que ainda é mais cara. No final de 2016, com a retomada da demanda estimulada pela China e com a redução de produção pela OPEP, houve uma nova elevação dos preços que continuou estimulando a produção norte-americana.

Em 2017 os EUA tiveram mais exportações de gás natural que importações pela primeira vez em seis décadas, resultado do desenvolvimento de métodos não convencionais, como perfuração horizontal e o fraturamento hidráulico, que permitiram que as empresas explorassem gás natural de formações rochosas de xisto. Esse avanço tecnológico permitiu que os EUA aumentassem a sua produção de mais de 11 vezes entre 2007 e 2015. O transporte de gás natural também se desenvolveu com a consolidação da liquefação, conhecido como GNL que permitiu que fosse transportado com segurança por meio de navios petroleiros (CARMONA, 2020).

Com essa evolução do mercado de gás americano aumentou o número de fornecedores e, conseqüentemente, reduzindo a dependência de um único fornecedor de gás natural (CARMONA, 2020).

Em 2018, os EUA ultrapassaram a Rússia e a Arábia Saudita na produção de petróleo bruto, um fato inédito em mais de 20 anos, de acordo com a Administração de Informações de Energia dos Estados Unidos (EIA). A Agência Internacional de Energia estima que, até 2023, os Estados Unidos serão os maiores produtores mundiais de petróleo e gás, produzindo mais de 17 milhões de barris por dia (CARMONA, 2020).

A União Europeia possui alta dependência do gás natural russo, que se tornou um ponto de vulnerabilidade e controvérsia na política energética do bloco europeu. Atualmente um terço do gás europeu vem da Rússia e essa dependência poderia aumentar com os projetos dos gasodutos *Turkish Stream* que atenderia os mercados do sul da Europa via Turquia e Grécia e o *Nord Stream 2* pelo norte da Alemanha que abasteceria os principais países da Europa Ocidental (NOACK, 2018).

Os Países Bálticos e Nórdicos pretendem reduzir a dependência das importações do gás russo com a construção de um novo gasoduto chamado *balticconnector* que ligará a Finlândia e a Estônia. O projeto possui três objetivos, melhorar a segurança energética regional a possibilidade de inserir outras fontes de energias alternativas como o hidrogênio e o biogás, além de permitir a integração futura com o mercado comum da União Europeia (CARMONA, 2020, p. 32-33).

Quanto à China, o país possui alta dependência de combustíveis fósseis, o que é um grande desafio na política ambiental. O país é o maior consumidor mundial de carvão, o segundo maior de petróleo depois dos EUA e produz mais dióxido de carbono do que qualquer outro país. A China pretende reduzir sua dependência

excessiva de combustíveis fósseis, reequilibrando a sua economia que hoje é baseada em indústrias intensivas em energia e liderando uma transição energética para fontes renováveis.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a China possui um terço da energia eólica do mundo e um quarto da capacidade solar, além de ter os dez fabricantes de painéis solares e quatro dos principais fabricantes de turbinas eólicas. O país também é o maior mercado de veículos elétricos e continua investindo na construção de usinas nucleares.

O aumento da produção e uso de energias renováveis, baterias e veículos elétricos chineses podem trazer consequências geopolíticas beneficiando a China através da redução da sua dependência de importações e combustíveis fósseis, exercendo *soft power* na liderança das ações no Acordo Climático de Paris e no desenvolvimento de tecnologias, colocando o país na vanguarda da transição energética frente aos EUA e a Europa (CARMONA, 2020).

### **3.3 Segurança Energética**

A segurança energética dos estados é fundamentada por políticas que visam a segurança do suprimento, valorizando os recursos energéticos nacionais e a universalização do acesso à energia. Atualmente podemos incluir nesses fundamentos uma preocupação crescente com questões inerentes a sustentabilidade, eficiência energética e desenvolvimento tecnológico. Esses fundamentos são importantes para garantir segurança nacional, bem-estar econômico, estabilidade social e a política das nações.

Planejar o setor energético de uma nação é essencial para que ela se posicione de maneira competitiva no contexto econômico internacional, garantindo as suas necessidades sociais e ambientais (GÓES, 2021).

No Brasil, como exemplo, o planejamento político para a segurança energética se dá através do Plano Nacional de Energia (PNE) que é um veículo de comunicação e debate com a sociedade para a estruturar a estratégia energética nacional de longo prazo (GÓES, 2021).

De acordo com o Lucas Kerr Oliveira (2012), a segurança energética pode ser entendida como um estado "ideal" em que um país ou região possui disponibilidade de energia o suficiente para garantir o crescimento econômico, desenvolvimento e

melhorando progressivamente as condições de vida da população. Ainda segundo Oliveira (2012), as condições ideais de segurança energética devem incluir a garantia da integridade e segurança da infraestrutura de energia (geração, distribuição e consumo de energia), necessária para sustentar a logística nacional e a soberania do estado.

De acordo com o pesquisador argentino Gustavo Lahoud (2005), a soberania energética de um país é fundamentada pela capacidade política de exercer o controle e a autoridade para regular de maneira sustentável a exploração dos recursos energéticos, conservando uma margem de manobra e uma liberdade de ação que lhe permitam minimizar os custos associados às pressões externas.

### **3.4 3 Ds (Descarbonização, Digitalização e Descentralização)**

A descarbonização busca reduzir a participação das fontes fósseis na matriz elétrica, contribuindo para a diminuição do aquecimento global. Outro objetivo deste D, bem mais estratégico, é permitir o aumento da segurança energética dos países desenvolvidos e muito dependentes da importação de recursos energéticos, uma vez que vento e sol são recursos que possivelmente tem disponíveis nos territórios dos países, a depender das condições geográficas. Outro componente estratégico vinculado à descarbonização é o desenvolvimento da mobilidade elétrica, a qual irá promover uma mudança radical na indústria automobilística e no setor elétrico, com a necessidade de abastecimento de milhares de carros e veículos de carga em um futuro breve, representando uma transição disruptivas do “posto ao poste” (CASTRO, 2019).

Na publicação *Ten Principles for Policy Making in the Energy Transition* elaborado pela *Economics of Energy Innovation Systems Transitions* (EEIST) em setembro de 2022 é apresentado como case de princípio de política voltada a escolha de uma tecnologia voltada a descarbonização a energia eólica *offshore* no Reino Unido. A região, que já foi conhecida como “Ilha do carvão”, criou políticas de subsídios a tecnologia no começo do seu mercado que foram fundamentais para que a indústria de fabricação dos aerogeradores e equipamentos essenciais para a projetos eólicos *offshore* se desenvolvesse, atraísse a atenção de grandes investidores do setor energético, inclusive do setor de *Oil & Gas* como a BP e a *Shell*

resultando na redução dos custos desse tipo de energia. Como resultado dessas ações, os preços da energia eólica *offshore* caíram de £ 170/MWh em 2008 para £ 37/MWh em 2022 (EEIST, 2022, p. 12-13).

A conscientização quanto a descarbonização surgiu em meados dos anos de 1950, depois que no final da Segunda Guerra Mundial uma espessa nuvem de fumaça de poluição sobrou em Los Angeles e, pouco tempo depois, o mesmo correu em Londres. Na ocasião foi importante a adoção de políticas públicas, como a lei do ar limpo americana, que estabeleceu regulamentações para controlar a qualidade do ar e conseguiu reduzir as emissões de dióxido de carbono em 56%, de monóxido de carbono, 77% e dióxido de enxofre, 88% (GATES, 2021).

Como referência de uma política pública de descarbonização de sucesso podemos citar a política *feed-in tariff* na Alemanha no fomento da energia solar distribuída. Consumidores de energia que possuíam sistema de energia solar podiam injetar o excedente de energia na rede, sendo remunerados por uma tarifa com valor mais alto que a tarifa de consumo.

À medida que as populações criam consciência sobre a urgência de mudarmos a forma como exploramos os recursos naturais, políticas públicas são formuladas para esse fim.

As discussões mais recentes sobre a descarbonização sugerem substituir os atuais prêmios verdes como a geração de créditos de carbono pela taxa de carbono aos grandes emissores, para repassar o prejuízo causado por eles (GATES, 2021).

Ao final da COP21 (Conferência das Partes para Mudanças Climáticas, realizada em 2015) foi estabelecido um novo acordo global com metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa que resultam nas mudanças climáticas. Caso as medidas sejam implementadas, a temperatura média mundial aumentará a ponto que impactos negativos como marés crescentes inundarão regiões costeiras, haverá alteração nos padrões de chuvas impactando a produtividade agrícola, além da frequência de tempestades destrutivas (GÓES, 2021).

Na COP26 em Glasgow foi regulado o mercado de carbono através do Artigo 6° do Acordo de Paris, com o propósito de dar respaldo normativo para os países negociarem créditos de carbono. Os créditos de carbono são mecanismos para compensação de emissões de CO<sub>2</sub>, ou seja, quando uma empresa compra 1 crédito

carbono, ela está compensando ou possui a permissão para gerar uma tonelada de emissões de CO<sub>2</sub>.

A digitalização vai possibilitar às empresas do setor elétrico ganhos concretos de produtividade, derivados do uso das tecnologias de informação e comunicação. Destacam-se, entre outros, o uso de robôs em processos administrativos e o processamento de *big datas* com os medidores e redes inteligentes, permitindo o conhecimento, em detalhes, dos hábitos e gastos dos consumidores, abrindo oportunidades de novos negócios (CASTRO, 2019).

Um *case* de digitalização é o projeto de *Virtual Power Plant* (VPP) da Tesla com a *Pacific and Electric Company* na Califórnia (PG&E). O conceito de usinas virtuais é a integração por meio de plataformas digitais que permitem a integração de diversas fontes de recursos energéticos distribuídos e dessa forma trazer benefícios para o sistema elétrico. O projeto integra diversos usuários de sistemas de armazenamento de energia elétrica em baterias *powerwall* da fabricante Tesla. A partir dessa integração, a PG&E comunica os usuários participantes do projeto de VPP através de aplicativos em dispositivos móveis sobre a necessidade de utilização das baterias para a injeção de energia para estabilizar a rede elétrica ou acabar com *blackouts*. Os usuários são remunerados por cada evento de integração com a rede elétrica através de redes de energia inteligentes (*smart-grid*).

A descentralização refere-se às fontes de geração, com a difusão de novas fontes renováveis associadas e em breve a baterias. Esta tendência inclui a possibilidade do consumidor ser também produtor, através da geração distribuída, majoritariamente com a utilização de painéis fotovoltaicos (CASTRO, 2019).

Trazendo novamente uma referência da publicação da EEIST (2022), o *case* do mercado de geração distribuída solar no Brasil é abordado com um caso de política energética adaptativa que foi essencial para o desenvolvimento do mercado de energia solar fotovoltaica no país. A regulação do mercado de geração distribuída de energia no Brasil ocorreu em 2012, porém a adaptação realizada em 2015 através da resolução normativa 685 de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) permitiu que consumidores de energia que tivessem sistema de geração distribuída instalados e conectados junto a rede pudesse injetar os excedentes de energia na rede e esses seriam convertidos em créditos de energia que poderiam ser utilizados em até 60 meses (*net metering*). Os benefícios dos créditos de energia que

possibilitou novos modelos de negócio e a padronização de processos para a conexão dos sistemas junto a concessionárias de energia permitiram que o país alcançasse 12 GW em sistemas de geração distribuída conectados à rede em agosto de 2022 (EPBR, 2022).

## **4 MERCADO ENERGÉTICO ALEMÃO**

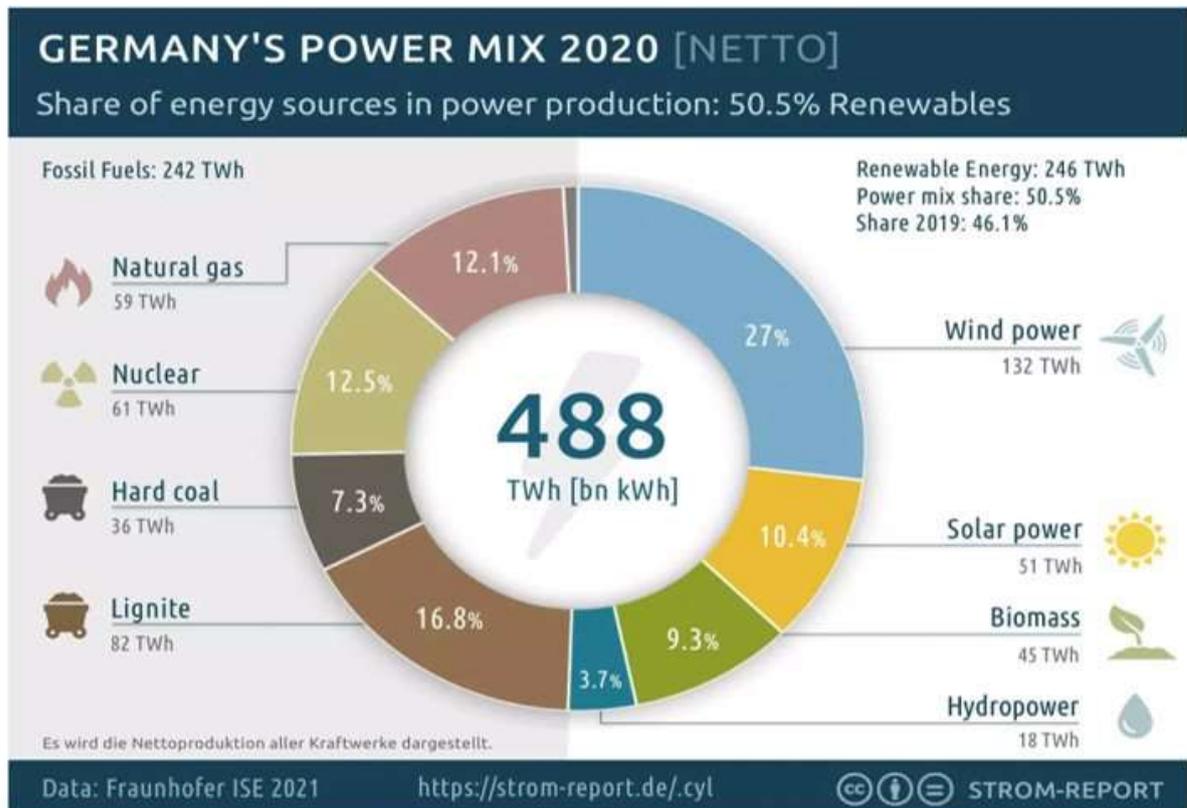
### **4.1 Matriz Energética Alemã**

A matriz elétrica alemã possui grande participação das fontes renováveis em função de décadas de incentivo para o desenvolvimento dessas fontes, principalmente eólica e solar, porém ainda com grande participação de gás natural, carvão e nuclear. É importante ressaltar que a fonte de energia nuclear possui baixa pegada de carbono, diferente de outras termoelétricas, porém os países da União Europeia reduzem a participação da fonte na sua matriz em função de compromissos voltados para a segurança após o incidente de Fukushima no Japão em 2011.

Se tratando de matriz energética, que leva em consideração energia para aquecimento e calefação (*heating*) e o setor de transportes, percebemos que quase 80% da matriz do país depende de combustíveis fósseis.

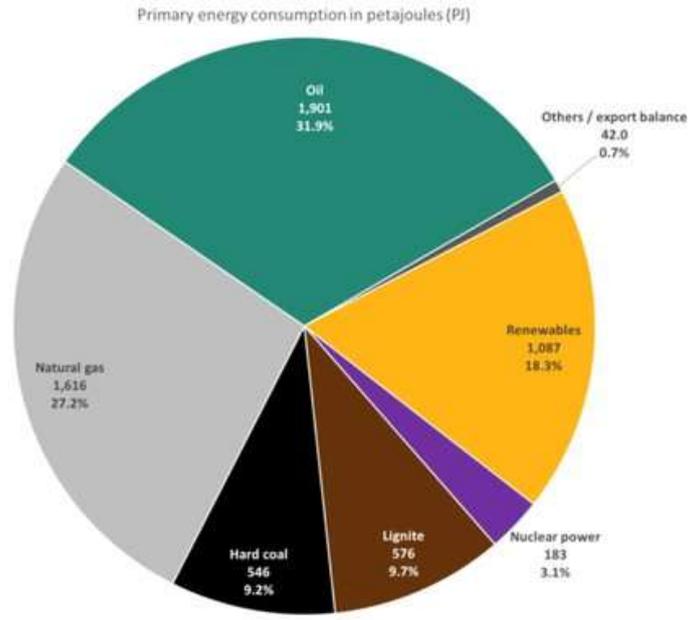
Nos gráficos abaixo são apresentados a matriz elétrica da Alemanha com base em 2020 (Gráfico 2) com 50,5% de fontes de energia renovável, considerando solar, eólica, biomassa e hidrelétricas e no gráfico 3 a matriz energética do primeiro semestre de 2022, com 78% provindas de fontes não renováveis como petróleo e gás natural.

Gráfico 2 - Matriz elétrica da Alemanha em 2020



Fonte: STROM-REPORT (2021).

Gráfico 3 - Matriz energética primária da Alemanha – Primeiro semestre de 2022



Matriz Energética Primária da Alemanha - Primeiro Semestre de 2022

Fonte: CLEW (2022).

## 4.2 Perfil de Consumo Elétrico Alemão

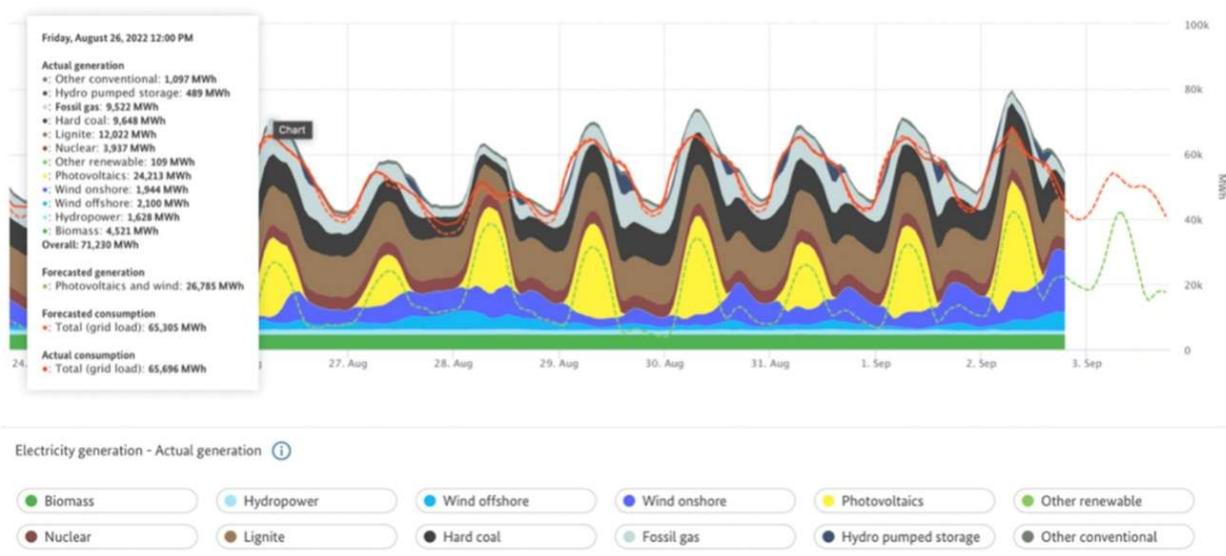
Analisando o perfil de consumo elétrico da Alemanha através do portal de dados do sistema elétrico do país *smard*, percebe-se o quanto as fontes fósseis têm participação na demanda diária (linha vermelha no gráfico de perfil de consumo), independente da intermitência da geração eólica e solar.

É possível concluir que com a substituição das fontes fósseis de lignite, carvão e gás natural (camadas marrom, preta e cinza respectivamente no gráfico) seria necessário grande participação de fontes renováveis na matriz. Considerando as limitações de área e de recursos solares (camada amarela) e eólicos (camada azul escura para eólica *onshore* e azul claro para *offshore*) é fundamental que a Alemanha explore alternativas para uma transição energética eficiente.

Gráfico 4- Perfil de consumo elétrico diário alemão.

## Electricity generation and consumption in Germany

Compare market data interactive



Perfil de Consumo Elétrico Diário Alemão - Fonte SMARD

Fonte: CLEW (2018).

## 5 CONTEXTO DE DEPENDÊNCIA DOS GÁS NATURAL RUSSO

### 5.1 Acordos de Suprimentos de Gás Com a Alemanha

Em 1955, o então chefe da República Federal da Alemanha (RFA), Konrad Adenauer visitou Moscou a fim de estabelecer relações diplomáticas e, três anos mais tarde, fecharam o primeiro acordo comercial bilateral entre a URSS e a RFA.

Com o embargo do governo americano comandado por John F. Kennedy para o fornecimento de tubulações à URSS no contexto da expansão energética soviética para o leste europeu (oleoduto *druzhiba*), na ocasião, a Alemanha Ocidental era o fornecedor das tubulações.

Ao longo da década de 1970 houve acordos em que as importações de gás natural russo eram pagas com tubulações de aço. No ano de 1973 o gás soviético passa a suprir a Alemanha Ocidental e a RDA (bloco oriental).

Na década de 1990 a estatal russa Gazprom tinha o interesse que o fornecimento de gás para a Europa evitasse passar pela Ucrânia, principalmente por questões geopolíticas (DEUTSCHE WELLE, 2021).

## 5.2 Projetos Nord *stream* 1 e 2

Em 1997 a Gazprom e a empresa finlandesa Neste (futura *Fortum*) formaram uma *joint venture*, *North Transgas Oy* para a construção e operação de um gasoduto que interligava a Rússia com o norte da Alemanha através do Mar Báltico. O parceiro alemão do projeto foi a Ruhrgas (futura E.ON).

Após estudo de viabilidade em 2001, em novembro de 2002 o comitê de gestão da Gazprom aprovou o cronograma de implementação do projeto. Em maio de 2005, a Fortum vendeu sua participação de 50% para a Gazprom e, no mesmo ano, junto da Basf e a E.ON assinaram o acordo básico para a construção do *North European Gas Pipeline*, que mais tarde se chamaria *Nord Stream Gas Pipeline* (NSGP).

O primeiro oleoduto foi construído em abril de 2010 e foi concluído em junho de 2011. O segundo duto do mesmo projeto começou em maio de 2011 e foi concluído em abril de 2012.

Cada oleoduto tem 1.224 km de extensão, diâmetro de 1.200 mm e a espessura da parede da tubulação é de 38 mm com pressão de trabalho de 220 Bar.

O projeto *Nord Stream 2* com orçamento de US\$11 bilhões tem características técnicas similares e acompanha praticamente o mesmo traçado do primeiro. São 1.200 km de extensão com dois tubos, começando do sudoeste de St. Petersburg e terminando na costa alemã em Greifswald, com capacidade de transportar 55 bilhões de metros cúbicos de gás russo por ano para a União Europeia por, pelo menos, 50 anos.

Na figura abaixo são apresentados os traçados dos gasodutos *Nord Stream 1* e 2:

Figura 1 - Traçado dos gasodutos europeus – Nord Stream 1 e 2.



Fonte: ZAP.AEIOU (2022).

O projeto aumentou a dependência da Europa do gás natural russo, reduzindo consideravelmente a sua segurança energética. Quase todo o gás natural da Alemanha é importado através de gasodutos e 55% desse gás vem da Rússia.

### 5.3 Conflito entre Rússia e Ucrânia

O processo de transição energética da União Europeia ganhou uma nova dimensão e velocidade a partir da invasão da Rússia no território da Ucrânia, iniciando um conflito a partir do dia 24 de fevereiro de 2022, onde a Rússia atacou Kiev, Kharkiv, Odessa e a região de Donbass. A Rússia justificou infringir a soberania da Ucrânia alegando que o objetivo da operação militar era de proteger a população da região de Donbass onde a língua predominante é o russo. Em razão das sanções econômicas impostas à Rússia pela maioria dos países ocidentais, incluindo boicote às importações de petróleo, levou a Rússia, em retaliação, a suspender o fornecimento de gás natural para a Europa.

No que se refere ao petróleo, a Europa consegue outros fornecedores, como os EUA, porém, se tratando de gás natural, a situação é distinta em função da alta dependência do gás russo e uma nova infraestrutura de gasodutos seria demorado para construir e refletiria diretamente no aumento dos custos de energia sobre a inflação e atividades econômicas.

A Alemanha tem adotado políticas de subsídios às famílias em função do aumento do custo de energia e calefação. Indústrias com demanda intensiva de energia para os seus processos são impactadas pela perda da competitividade, como no caso de plantas siderúrgicas do grupo *Acelormittal*.

O impacto da guerra na Ucrânia nos custos de energia representou um aumento de € 40/MWh no início de 2022 para € 1,000/MWh em agosto de 2022 (NIVALDE; BRANDÃO; SANTOS, 2022).

Alguns dos fatores que influenciaram na redução do fluxo do gás natural russo entre 2021 e 2022 foram os seguintes (THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, 2022):

I. A Rússia reduziu seus próprios estoques de armazenamento de gás em função do frio no primeiro trimestre de 2021. Durante o verão, a empresa Gazprom reabasteceu seu estoque doméstico na Rússia, mas não os estoques a jusante para o armazenamento de gás na Europa;

II. Em março de 2022, um decreto presidencial russo exigiu que os pagamentos a Gazprom fossem realizados em rublos russos, não em dólares americanos ou euros. Várias empresas recusaram e tiveram seu fornecimento cortado. Dentre as empresas constavam a Pcnig (Polônia), Bulgargaz (Bulgária), Gasum (Finlândia), Gasterra (Holanda), Ørsted (Noruega), Shell Energy Europe (Alemanha) e Latvijas Gāze (Letônia).

III. A capacidade de trânsito de gás através da Ucrânia foi reduzida a partir de maio de 2022, devido ao conflito em seu território.

## **6 HIDROGÊNIO VERDE**

### **6.1 Características do hidrogênio**

O hidrogênio é o elemento mais abundante da natureza. Apesar disso, sua obtenção só pode ser feita a partir de processos químicos que envolvam outros elementos para a separação de moléculas. Atualmente 98% do hidrogênio utilizado no mundo é extraído a partir de combustíveis fósseis e é chamado de hidrogênio cinza, cujo nome se dá por conta das emissões associadas ao processo de obtenção. A produção de hidrogênio cinza hoje representa cerca de 830 toneladas de dióxido de carbono emitidos por ano.

Como veremos a seguir nas cores do hidrogênio, existem diversas maneiras de se obter o hidrogênio, sendo que a maneira mais sustentável é a produção de hidrogênio verde.

### **6.2 Cores do hidrogênio**

- Hidrogênio verde: hidrogênio gerado através de eletrólise da água com energia renovável (fonte principais são energia eólica e solar);
- Hidrogênio rosa: hidrogênio gerado através de eletrólise da água com energia nuclear;
- Hidrogênio amarelo: hidrogênio gerado através de eletrólise da água com energia provindo de um mix de fontes com uma pegada de carbono média;
- Hidrogênio azul: hidrogênio provindo do gás natural com captura e armazenamento de carbono (CCS) para evitar a maioria das emissões de GEE;
- Hidrogênio turquesa: hidrogênio provindo de pirólise de combustível fóssil onde o subproduto é o carbono sólido;
- Hidrogênio cinza: hidrogênio gerado a partir de gás natural com emissão de dióxido de carbono no processo;
- Hidrogênio marrom: hidrogênio gerado a partir de gaseificação de carvão lignite com emissão de dióxido de carbono no processo;

- Hidrogênio preto: hidrogênio gerado a partir de carvão preto com emissão de dióxido de carbono no processo.

Quadro 1 - Cores do hidrogênio e características do processo de produção

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind   Solar   Hydro Geothermal   Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas   coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

\*GHG footprint given as a general guide but it is accepted that each category can be higher in some cases.

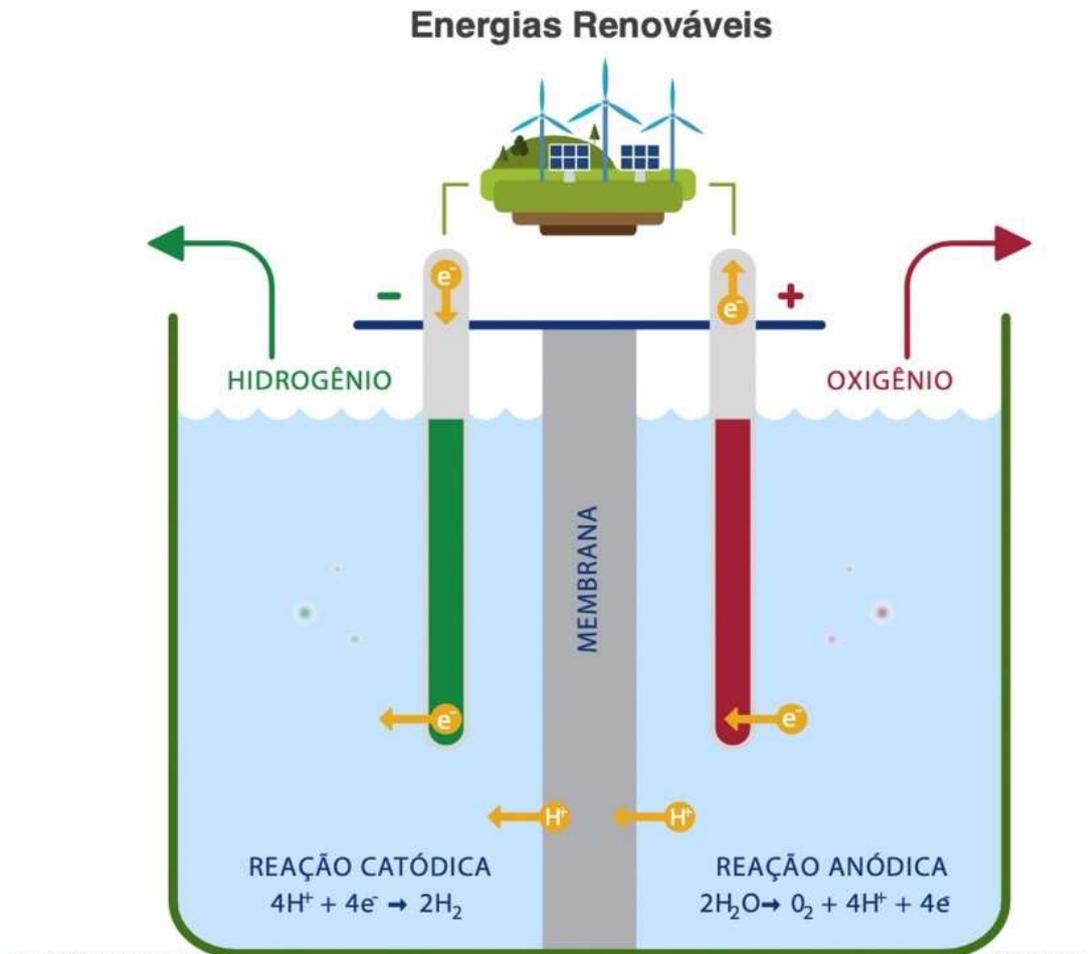
Fonte: GLOBAL ENERGY INFRASTRUCTURE (2021).

A produção de hidrogênio verde pode ser realizada de diversas formas. Uma das mais usuais envolve a eletrólise da água, que consiste na decomposição da molécula da água (H<sub>2</sub>O) por meio de uma corrente elétrica, resultando em moléculas de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>). Esse processo não é novo, mas era realizado com combustíveis fósseis. O hidrogênio é considerado verde quando a energia utilizada no processo de eletrólise advém de fontes renováveis como a geração de energia solar e eólica.

De acordo com o relatório da Agência Internacional da Energia (AIE) - IEA (2019), o hidrogênio verde obtido através de eletrólise da água pode resultar em uma demanda atual de 3.600 TWh, ou seja, mais que a geração anual atual da União Europeia (BATAGLIOTTI, 2021).

No infográfico 1 é apresentado o processo químico de eletrólise através de energia elétrica renovável para a produção de hidrogênio verde.

Infográfico 1 - Processo químico de eletrólise para a produção de H2V.



Fonte: Departamento de Energia dos EUA e Wood Mackenzie

### 6.3 Processo Haber-Bosch - Produção de amônia verde

O processo de síntese Haber-Bosch foi desenvolvido pelos químicos alemães Fritz Haber (1868-1934), ganhador do Nobel da química em 1918 e Carl Bosch (1874-1940) também ganhador do Nobel da química em 1931. O processo químico Haber-Bosch permitiu a transformação do hidrogênio através da captura de nitrogênio do ar, resultando no  $\text{NH}_3$  (amônia) para fabricação de fertilizantes sintéticos.

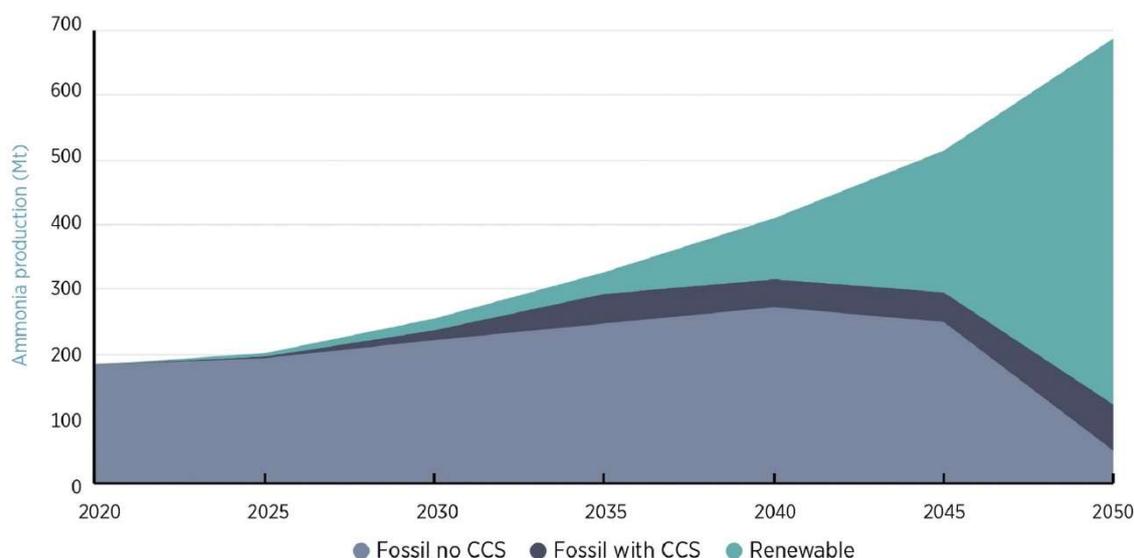
Chamamos de amônia-verde, aquela produzida com hidrogênio verde, que além de possibilitar a exploração do hidrogênio na cadeia de valor da indústria de fertilizantes é um portador para facilitar o transporte, como veremos à frente.

De acordo com o estudo *Innovation Outlook Renewable Ammonia* elaborado pelo *International Renewable Energy Agency (IRENA)* em conjunto com *Ammonia Energy Association*, para manter as metas de descarbonização até 2050 será necessário substituir gradualmente o consumo de amônia produzida com combustíveis fósseis por amônia verde até chegarmos na capacidade de 700 milhões de toneladas.

No gráfico abaixo é apresentado a projeção de demanda de amônia produzida por hidrogênio verde considerando a meta de aumento da temperatura global em 1,5 °C.

Gráfico 5 - Projeção de produção de amônia até 2050 – IRENA 2022.

**Expected ammonia production capacity up to 2050 for the 1.5°C scenario.**



Fonte: IRENA (2022).

## 6.4 Produção De Hidrogênio Verde

### 6.4.1 Tecnologias

- Eletrólise alcalina (ALK): essa tecnologia usa líquido alcalino (normalmente uma solução com 30% de hidróxido de potássio), e operada sob baixas temperaturas (entre 60 e 90 °C) e pressões (entre 10 e 30 Bar), com eficiência de cerca de 62-82% e nível de maturidade tecnológica consolidada (TRL – *Technology Readiness Level*) TRL9 (CNI, 2022);

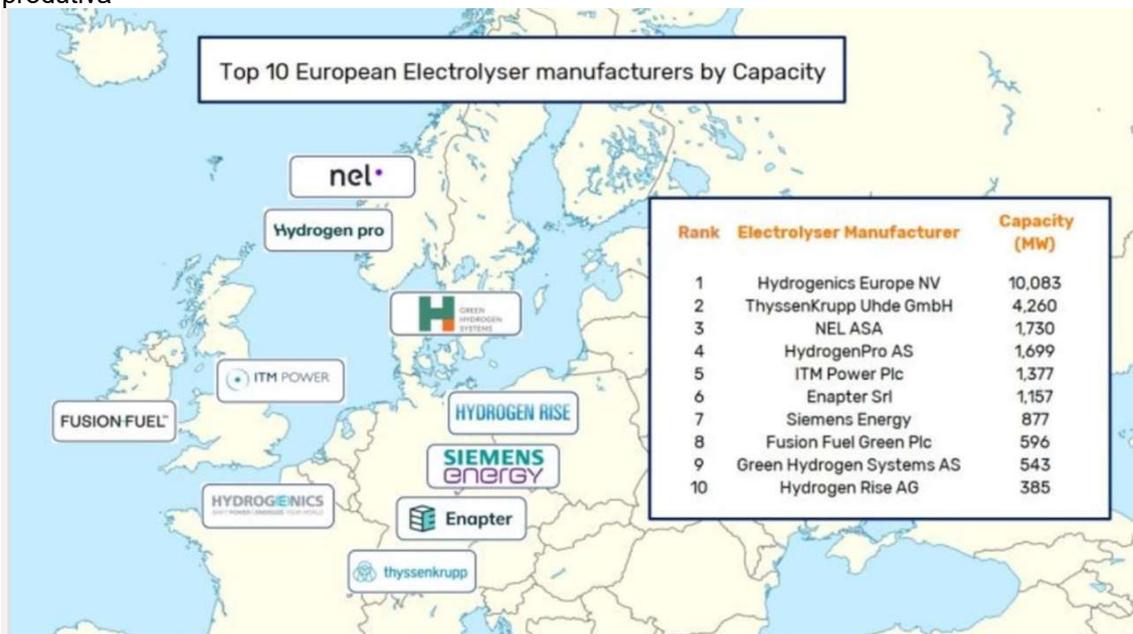
- Eletrólise em membranas de troca de prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane*): nesse caso, utiliza-se um eletrólito de polímero sólido, que permite apenas o fluxo de íons de hidrogênio (H<sup>+</sup>). O processo requer a utilização de catalisadores com metais nobres. As faixas de temperatura (entre 50 e 80 °C) e pressão (entre 20 e 50 Bar) são próximas às da PEM. Entretanto, proporciona uma resposta rápida às flutuações de corrente, podendo a carga da célula variar de 0 a 100% em milissegundos (em vez da ordem de segundos, nas outras tecnologias) e a eficiência do processo atinge 67-82% com um TRL9. Está em desenvolvimento uma variante deste tipo de eletrolisador que utiliza membranas trocadoras de ânions OH (AEM – *Anion Exchange Membran*) e que não requer catalisadores com metais nobres (CNI, 2022);
- Eletrólise com óxidos sólidos (SOEC – *Solid Oxide Electrolysis Cell*): é um processo de eletrólise que opera a altas temperaturas (entre 700 e 900 °C) e baixas pressões (até 15 Bar), o que permite gerar hidrogênio também a partir da energia térmica. Com o aproveitamento do rejeito térmico de outros processos, o consumo de energia elétrica é menor, tornando a tecnologia atrativa economicamente. Assim, a eficiência do processo SOEC atinge 81-86%, mas o nível de maturidade tecnológica encontra-se entre TRL6 e TRL8 (CNI, 2022).

Abaixo são apresentados o quadro comparativo de tecnologias para eletrólise e o mapa com a localização dos dez principais fabricantes de eletrolisadores da Europa e sua capacidade produtiva em 2022.

Tipo de tecnologia	Alcalina	PEM	SOEC
Eletrólito	20-40 %m de KOH	Água líquida	Vapor d'água
Temperatura de operação (°C)	60 - 90	50 - 80	700 - 900
Pressão de operação (bar)	10 - 30	20 - 50	1 - 15
Densidade de corrente (A.cm <sup>-2</sup> )	0,2 - 0,4 / 1,2	0,6 - 2,0	0,3 - 2,0
Área da célula (m <sup>2</sup> )	< 4	< 0,3	< 0,01
Consumo específico do stack (kWh <sub>el</sub> .Nm <sup>-3</sup> de H <sub>2</sub> )	4,2 - 4,8	4,4 - 5,0	> 3,0
Consumo específico do sistema completo (kWh <sub>el</sub> .Nm <sup>-3</sup> de H <sub>2</sub> )	5,0 - 5,9	5,0 - 6,5	3,7 - 3,9 (4,7 kWh <sub>el</sub> .Nm <sup>-3</sup> de H <sub>2</sub> )
Menor faixa dinâmica (%)	10-10 / < 10	0 - 10	> 30
Pureza do gás	> 99,50 / > 99,95	99,99	99,90
Tempo de resposta	Segundos	Milissegundos	Segundos
Duração da partida a fria (min)	< 60 / < 1-50%	< 20	< 60
Vida útil (h)	60.000 - 90.000	20.000 - 60.000	< 10.000
Maturidade	Madura	Comercial	Demonstração
Custo de capital (€.kW <sup>-1</sup> )	800 - 1 500	1 400 - 2 100	> 2 000

Fonte: TEMHUMBERT (2017).

Figura 2- Mapeamento dos dez maiores fabricantes de eletrolisadores da Europa e a capacidade produtiva



Fonte: GABBRIELLESCHI (c2022).

#### 6.4.2 Transporte

O hidrogênio pode ser transportado no estado gasoso ou líquido, porém para cada um desses estados existem desafios que precisam ser considerados, conforme será detalhado a seguir.

Transporte de hidrogênio por dutos: o hidrogênio é comprimido até chegar na pressão de operação da tubulação. Os gasodutos existentes para o gás natural podem ser aproveitados para transportar hidrogênio. A injeção de hidrogênio em redes gás natural ainda está em discussão, mas já existem testes com misturas de 20% de hidrogênio em projetos piloto (ROLAND BERGER, 2021).

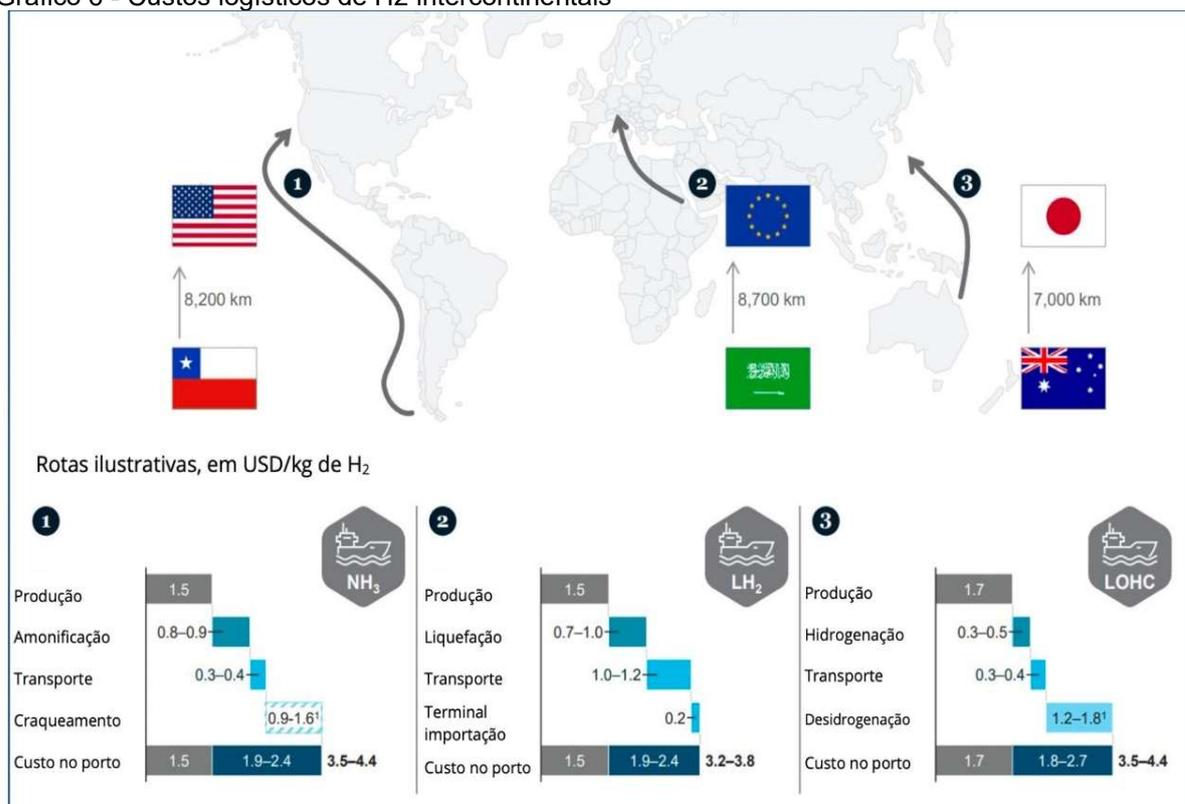
A amônia (NH<sub>3</sub>) como portador de hidrogênio é uma alternativa viável considerando a consolidação dos modais de transporte a longas distâncias por navios, além do manuseio nos portos. Como já visto anteriormente, a síntese *Haber-Bosch* é o processo de produção de amônia através da mistura do hidrogênio com nitrogênio capturado do ar. Essa amônia pode ser o produto final ou pode passar pelo processo de *cracking* para extrair o hidrogênio (ROLAND BERGER, 2021).

O hidrogênio liquefeito é uma alternativa para o transporte, pois a sua densidade volumétrica pode ser melhorada significativamente. Porém, as restrições para a liquefação são o alto consumo de energia para o resfriamento a -252,8 °C, estar sujeito a evaporação e o fato que atualmente não existem navios para o transporte de hidrogênio líquido disponíveis para operação comercial (ROLAND BERGER, 2021).

O *Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC) envolve a ligação quimicamente de hidrogênio ao composto líquido para que ele possa ser transportado à pressão atmosférica. No destino final o hidrogênio é liberado por meio de um processo de desidrogenação endotérmico (que requer calor) (ROLAND BERGER, 2021).

No Gráfico 6 abaixo são apresentados os custos logísticos para potenciais rotas de transporte de hidrogênio, sendo (i) Chile e EUA através de amônia verde, (ii) Arábia Saudita e União Europeia através de hidrogênio liquefeito e (iii) Austrália e Japão através do LOHC.

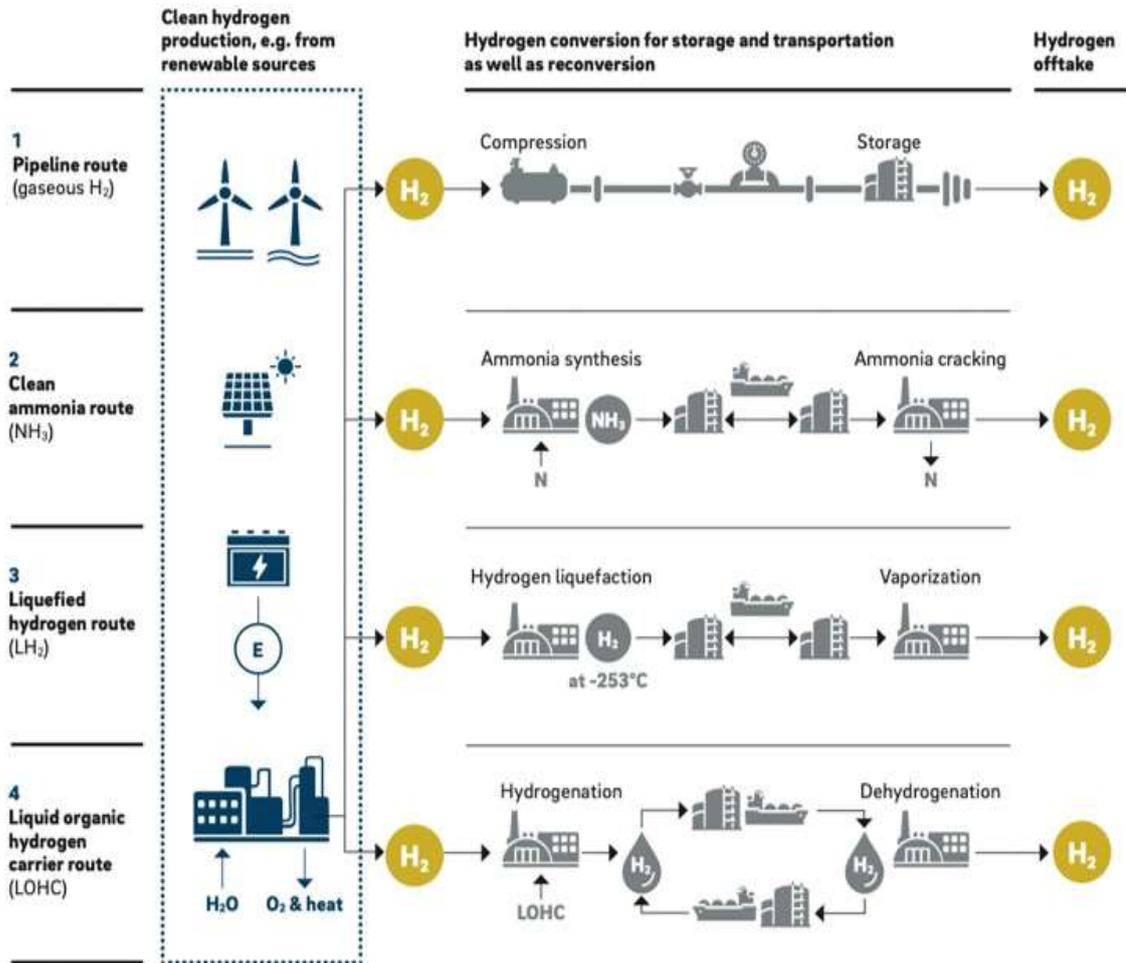
Gráfico 6 - Custos logísticos de H2 intercontinentais



Fonte: ROLAND BERGER (2021).

No Infográfico 2 são apresentadas as quatro rotas de transporte apresentadas:

Infográfico 2 - Rotas de transporte usuais para o hidrogênio em larga escala.



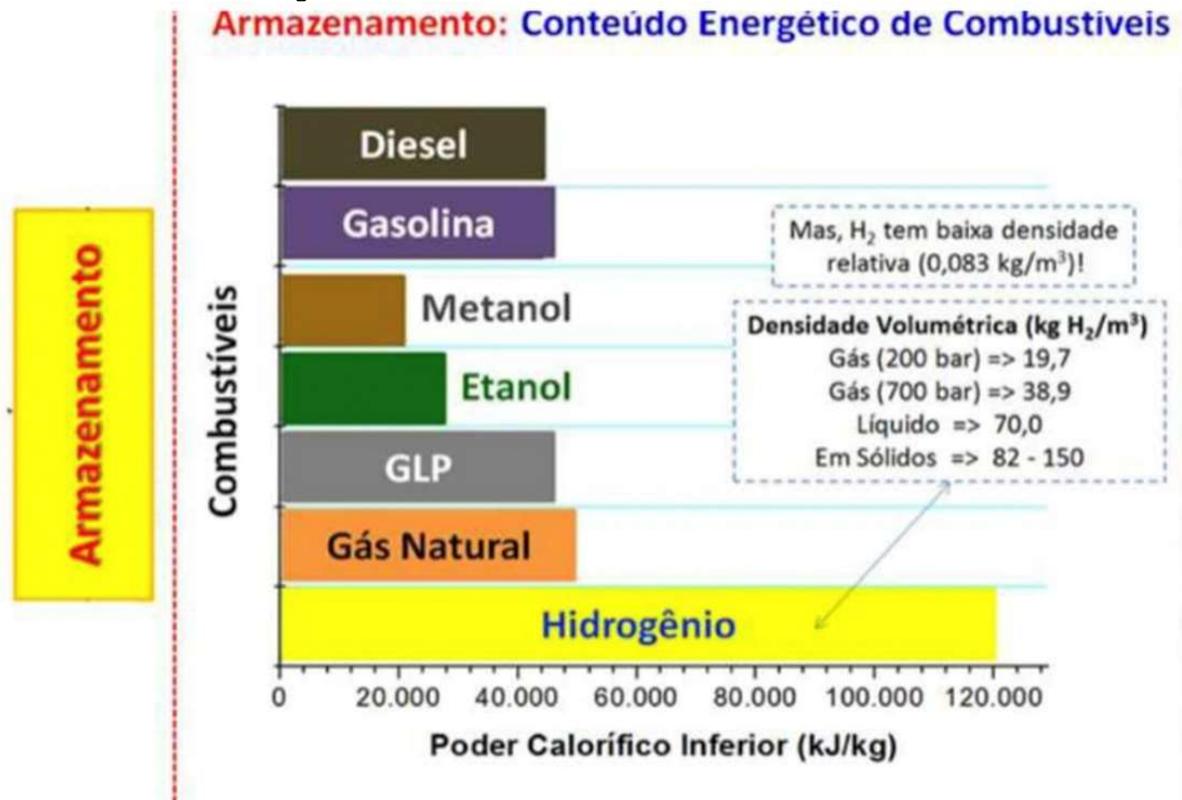
Source: Roland Berger

Fonte: ROLAND BERGER (2021).

### 6.4.3 Armazenamento

O hidrogênio é um gás com alta densidade energética, ou seja, para cada kg de hidrogênio temos mais que o dobro de energia que a maioria dos combustíveis convencionais. Porém, o hidrogênio também possui baixa densidade volumétrica, dificultando o armazenamento e transporte em estado natural como gás. Nos gráficos abaixo são apresentadas as vantagens comparativas de densidade energética do hidrogênio (Gráfico 7) e densidade volumétrica (Gráfico 8).

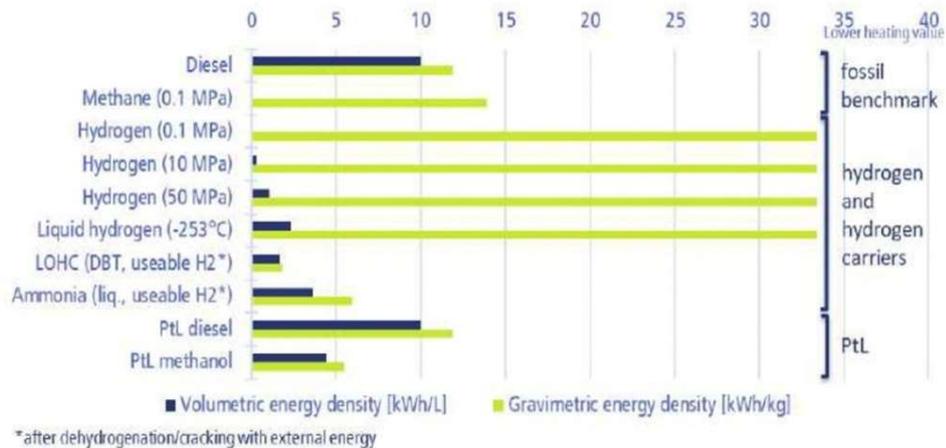
Gráfico 7- Densidade energética dos combustíveis



Fonte: FURTADO, J.G.M (2019).

Gráfico 8 - Densidade volumétrica x energética dos combustíveis

## Armazenamento de Energia



### Comparação de densidades de energia de diferentes portadores de energia

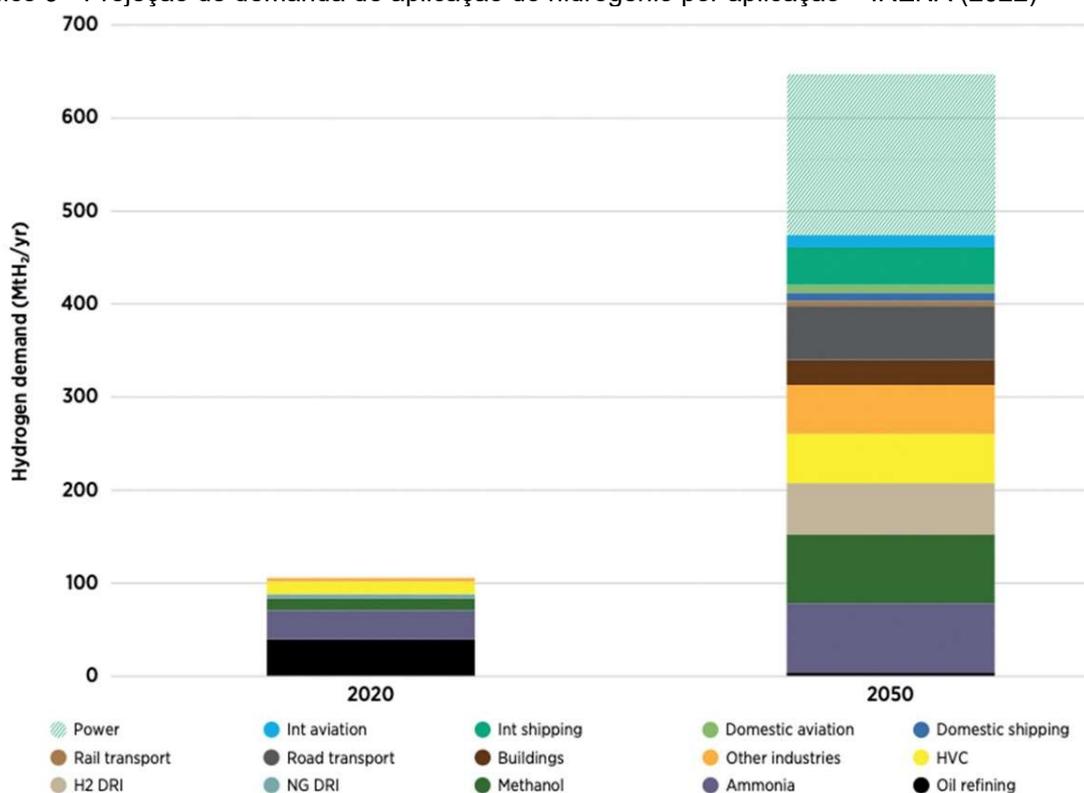
Fonte: INTERNATIONAL HYDROGEN STRATEGIES, WORLD ENERGY COUNCIL (2020).

O hidrogênio pode ser armazenado de diversas formas que podem ser configuradas a partir das tecnologias de produção, logística de transporte e distribuição assim como do seu uso final. Pode ser comprimido em tanques com pressões entre 300 a 700 Bar, em estruturas geológicas como cavernas; é possível armazená-lo no estado liquefeito em temperatura de  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; armazená-lo através de adsorção com ligação do  $\text{H}_2$  molecular a materiais com elevada área superficial específica como polímeros porosos, materiais carboníferos, MOFs (*Metal-organic frameworks*) e o mineral com estrutura porosa zeólito; e químicos como hidretos metálicos, amônia, metanol, ácido fórmico e LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*).

## **6.5 Projeções de Custos e Produção**

De acordo com o estudo *Global Hydrogen Trade to Meet The 1.5 °C Climate Goal* (IRENA 2022) a demanda de hidrogênio global aumentará de 100 milhões de tonelada/ano para 614 milhões de tonelada/ano (equivalente a 74 exajoules [EJ] por ano) em 2050 conforme demonstrado no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Projeção de demanda de aplicação do hidrogênio por aplicação – IRENA (2022)

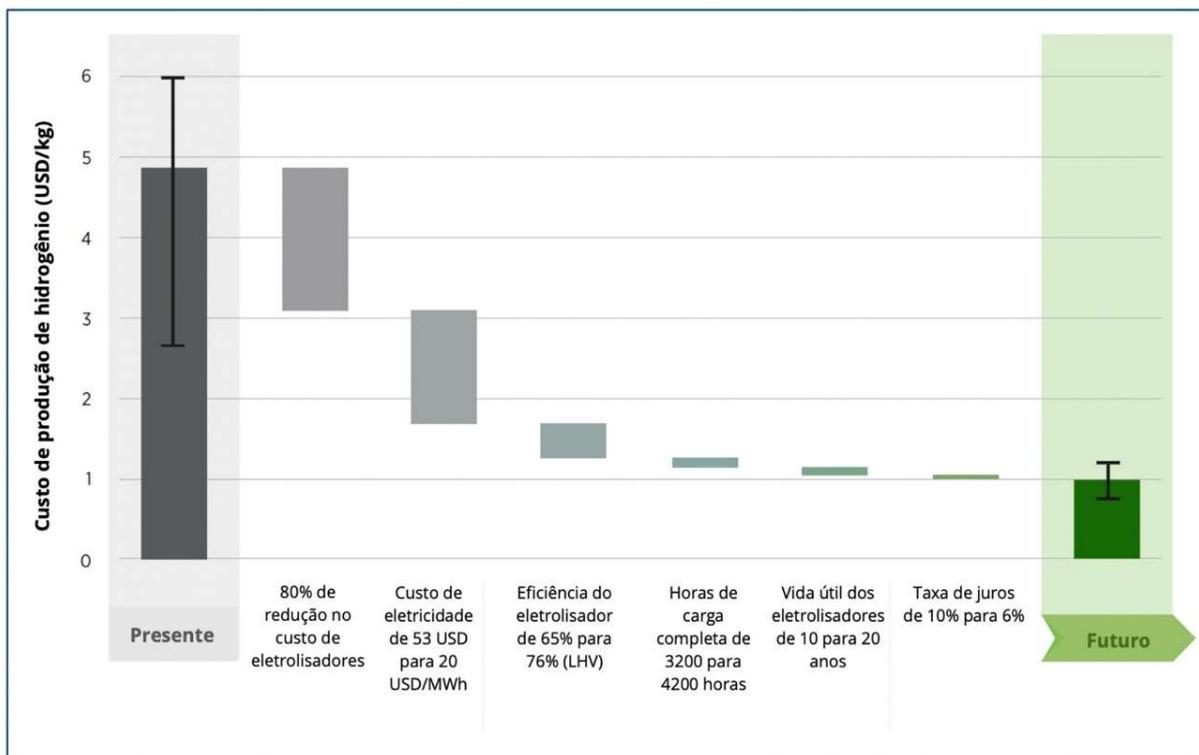


Note: Hydrogen demand for 2020 excludes hydrogen as part of the mix of off-gases for steel production. DRI = direct reduced iron; HVC = high-value chemicals; Int = international; NG = natural gas.

Fonte: IRENA (2022).

As projeções consideram uma redução considerável nos custos de produção do hidrogênio em função da otimização dos eletrolisadores, custo da energia elétrica renovável que ocorrerá em função dos avanços tecnológicos, principalmente das fontes solar e eólica, além da disponibilidade de recursos financeiros a taxas mais atrativas considerando que as tecnologias estarão consolidadas o risco de investimento será menor. No Gráfico 9 verificamos a sensibilidade da projeção de redução de custos do kg do hidrogênio (USD/kg) a otimização dos processos e os ganhos advindos da escala de produção.

Gráfico 10 - Impactos no preço para a competitividade do H2



Fonte: IRENA (2022).

Porém, o que não estão considerados na projeção do IRENA a influência de outros fatores fundamentais para as metas de custos de produção e transporte do hidrogênio, tornando-o competitivo frente aos combustíveis fósseis: rever os prêmios verdes e possibilitar a taxaço do carbono nas fontes de energia fóssil, políticas públicas de fomento ao desenvolvimento de um mercado de hidrogênio com perspectivas, além da própria geopolítica energética, que irá ditar as dinâmicas do mercado de hidrogênio para as próximas décadas.

### 6.5.1 Fundo de Investimento Europeu para Projetos de Inovação

Em agosto de 2022 a *European Commission* formalizou o investimento de 1,8 bilhão de euros em 17 projetos inovadores voltados à geração de recursos energéticos renováveis *Utility Scale* através do *Innovation Fund*.

1) Quatro projetos da indústria de produção de cimento através de captura de carbono, produção de metanol sintético na Alemanha, Polônia, França e Bulgária;

2) Três projetos na Finlândia e Suécia para a indústria química que envolve a reciclagem de plástico onde os produtos serão utilizados como matéria-prima em refinarias, produção de metanol através de conversão de CO2, hidrogênio verde e

biogás. Um dos projetos na Suécia irá produzir fibra de celulose para substituição de poliéster na indústria têxtil;

3) Três projetos na Holanda de hidrogênio produzidos através de eletrólise por geração eólica *offshore* e por biogás de resíduos sólidos não recicláveis;

4) Dois projetos em refinarias de petróleo com tecnologias de produção de biocombustível através de resíduos florestais na Noruega e uma planta de *e-fuel* para aviação na Suécia;

5) Três projetos destinados à fabricação de tecnologias para armazenamento em baterias químicas e a produção de energias renováveis, incluindo uma planta reciclagem de baterias de íon-lítio na França;

6) Um projeto de hidrogênio *offshore* na Alemanha;

7) Um projeto de captura e armazenamento de CO2 na Islândia.

O *Innovation Fund* é um dos maiores programas de financiamento do mundo para a demonstração de tecnologias inovadoras de baixo carbono.

O fundo disponibilizará 38 bilhões de euros de apoio entre 2020 e 2030 (75 euros/TCO<sub>2</sub>), para a demonstração comercial de tecnologias inovadoras de baixo carbono, com o objetivo de trazer ao mercado soluções industriais para descarbonizar a Europa e apoiar sua transição para a neutralidade climática.

Figura 3 - Projetos Cadeia de Valor do H2V na EU – Innovation Fund – European Commission



Fonte: INNOVATION FUND (2022).

## 6.5.2 Abu Dhabi Hydrogen Alliance

Em 2017, o governo dos Emirados Árabes Unidos lançou a '*Energy Strategy 2050*' visando aumentar a sua participação de renováveis na matriz energética para 50% até 2050. Atualmente a participação de renováveis é de 2%, o que é considerado baixo para um país com radiação solar média anual de 2.150 kWh/m<sup>2</sup> (ARAB NEWS, 2022).

Em Dubai, a *Dubai Electricity & Water Authority - Dewa* e a *Siemens Energy* estão cooperando para gerar hidrogênio verde com energia solar usando a tecnologia de eletrólise tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) a partir do gigantesco complexo *Mohammed Bin Rashid Al Maktoum*.

O projeto irá produzir hidrogênio verde e *power-to-x* para a produção de combustíveis sintéticos a partir do processo *fischer-tropsch*.

- 1) potência total: 5 GW até 2030;
- 2) área total: 127 km<sup>2</sup>;
- 3) tecnologias: solar fotovoltaico e solar térmico através de 70.000 helióstatos que garantem 15 horas de armazenamento térmico;
- 4) planta de dessalinização de água captada do mar por osmose reversa de 50 m<sup>3</sup>/dia;
- 5) investimento total: US\$ 13,6 bilhões;
- 6) emissões de carbono evitadas: 6,5 milhões de toneladas por ano (BUZZ, 2021).

O centro de P&D da *Dewa* no parque solar *Mohammed Bin Rashid Al Maktoum* conta com a colaboração de várias instituições acadêmicas como a *Stanford University*, *United Arab Emirates University*, *Khalifa University* e a *University of Sharjah* para desenvolver pesquisas conjuntas em energia renovável. O centro tecnológico também realiza testes para painéis fotovoltaicos em condições climáticas desérticas.

Os projetos PtX (*Power to X*) para a produção de combustíveis sintéticos serão explorados com os parceiros estratégicos *Siemens Energy*, *Masdar (Abu Dhabi Future Energy Company)*, *Etihad*, *Lufthansa Group*, *Marubeni Corporation* e *Khalifa University*:

Mobilidade terrestre: produção de hidrogênio verde para carros de passeio e ônibus na área da cidade de Masdar;

Aviação: planta de síntese de querosene para converter a maior parte do hidrogênio verde em combustível de aviação sustentável;

Marítimo: produção de combustíveis descarbonizados para o setor marítimo.

Figura 4 - Complexo para a produção de H2V - *Mohammed Bin Rashid Al Maktoum*



Fonte: ARABIAN BUSINESS (2022).

### 6.5.3 FH2R - Campo de Pesquisa de Hidrogênio em Fukushima

O projeto FH2R é uma planta de hidrogênio verde destinada à pesquisa onde são explorados a cadeia de valor do hidrogênio e seu uso final (mobilidade e suprimento energético) no Japão.

Localizado em Fukushima, palco do segundo maior acidente nuclear da história, o projeto de produção de hidrogênio verde através de fontes de energias renováveis é simbólico e também um marco da transição energética japonesa (NEDO, 2020).

Potência da planta (eletrolisadores): 10 MW

Operação: 2020

Usina solar fotovoltaica: 20 MW

Área do projeto: 22 hectares (18 ha para planta solar e 4 ha para o H2V)

Produção de hidrogênio: 900 t/ano

Investimento: US\$ 200 milhões (recurso público e privado)

O Japão tem como estratégia inserir o hidrogênio na sua matriz energética como forma de diversificação das fontes e atender as metas de descarbonização do Acordo de Paris. O país pretende investir US\$12,3 bilhões em P&D no tema e possui parcerias internacionais de cooperação e suprimento de H2V com Austrália e Brunei.

Parceiros no projeto: *Toshiba Corporation, Tohoku Electric Power Co Inc, Iwatani Corporation e Asahi Kasei.*

Figura 5 - Projeto FH2R em Fukushima no Japão



Fonte: FH2R [s/d].

#### 6.5.4 Energia Renovável e H2V na Produção de Aço Verde

No seu livro “Como Evitar Um Desastre Climático” Bill Gates apresenta uma relação interessante da quantidade de emissões de carbono para a produção de cada tonelada de materiais indispensáveis no nosso dia-a-dia como o plástico, cimento e o aço. Para cada tonelada de aço fabricado são emitidas 1,8 toneladas de carbono, tornando a descarbonização do setor da siderurgia um grande obstáculo para superarmos as mudanças climáticas.

Descarbonizar o setor da siderurgia e, na verdade descarbonizar o processo do derretimento do minério de ferro em alto-forno com temperaturas de 1.700 graus Celsius onde o processo de calor é obtido com a queima de carvão refinado (coque).

Alguns projetos que apresentam alternativas:

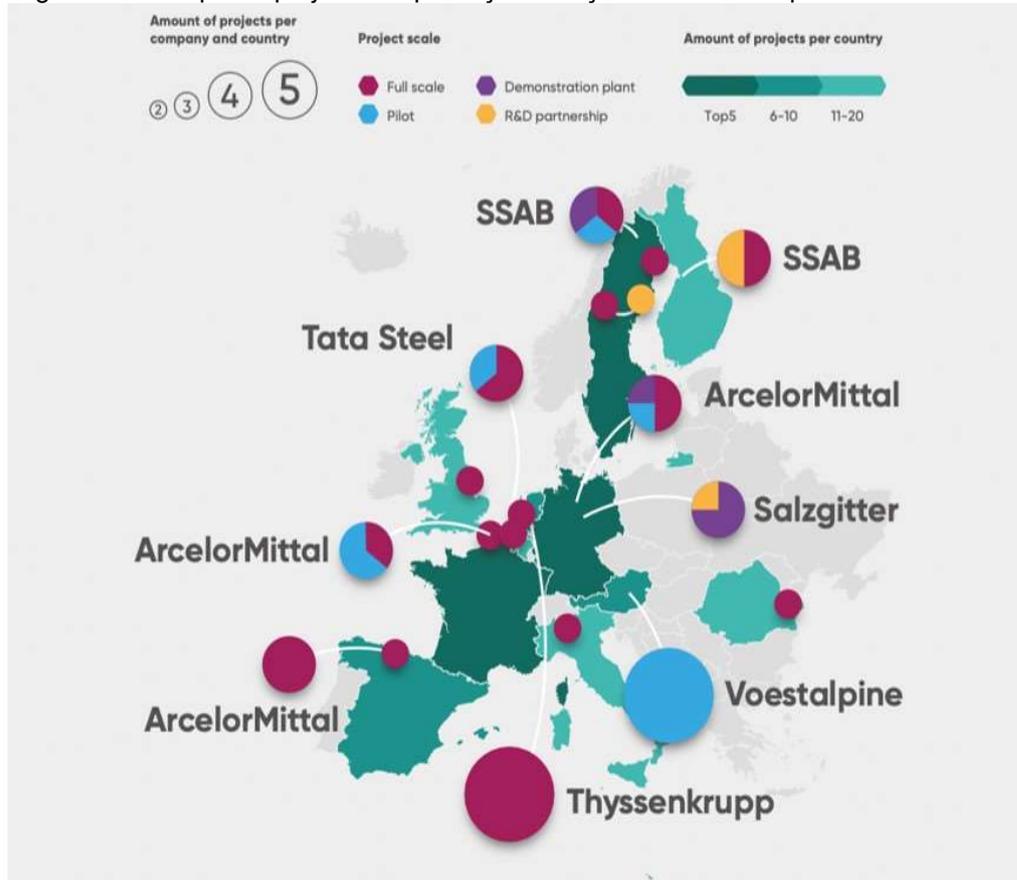
1) *Iberdrola* e a empresa *H2 Green Steel* assinaram acordo de hidrogênio verde de 2,3 bilhões de euros. As empresas construíram uma usina de 1.000 MW para a produção de hidrogênio verde em Boden no norte na Suécia.

A nova usina produzirá e abastecerá com hidrogênio verde um forno direto de redução de minério de aço com capacidade para produzir 2 milhões de toneladas de ferro gusa, o que permitiria a produção de aço verde com uma redução de 95% das emissões de CO<sub>2</sub> (H2 GREEN STEEL, 2021).

2) A *Arcelormittal* está desenvolvendo um novo projeto de inovação na sua unidade em Hamburgo, na Alemanha, visando a primeira produção e uso em escala industrial de ferro reduzido direto (DRI) feito com 100% de hidrogênio como redutor, com uma produção anual de 100.000 toneladas de aço. O DRI é um processo de fabricação para produzir aço usando hidrogênio para reduzir ferro ao invés de se utilizar o carvão de coque (ARCELORMITTAL, c2022).

3) *Boston Metal* é uma empresa *Spinout* do *Massachusetts Institute Of Technology* que embora tenha um projeto que não se utilize de hidrogênio verde no seu processo, aplica eletrólise através de energia renovável. A tecnologia de eletrólise de óxido fundido usa corrente elétrica para separar o oxigênio do minério de ferro que é uma etapa crítica do processo de fabricação de aço (BOSTON METAL, c2022).

Infográfico 3 - Mapa de projetos de produção de aço verde na Europa



Fonte: HYDROGEN EUROPE (2022).

### 6.5.5 Projeto Power-to-X em Haru-Oni no Chile - Produção de combustíveis sintéticos através de hidrogênio verde

O projeto de *Haru-Oni* no Chile é a primeira usina integrada e comercial em grande escala do mundo para a produção de combustíveis sintéticos livre de pegada de CO<sub>2</sub>, com a produção de hidrogênio verde e posterior transformação em e-metanol através do processo químico de *Fischer-Tropsch*.

O processo *Fischer-Tropsch* foi inventado em 1925 como uma alternativa aos hidrocarbonetos à base de petróleo. O processo permite a produção de hidrocarbonetos líquidos a partir do hidrogênio verde gerado por energia renovável.

O projeto conta com a produção de energia eólica para a produção do hidrogênio verde na região de Magallanes no sul do Chile.

Características do projeto-piloto:

- 1) Aerogerador eólico de 3,4 MW de propriedade da *Enel Green Power*;

2) Eletrolisador *Siemens Energy Pem (Proton Exchange Membrane)* de 1,25 MW;

3) Na fase preliminar, como um piloto espera produzir 350 toneladas por ano de metanol (e-metanol) e 130.000 litros por ano de gasolina sintética (e-gasolina);

O aerogerador eólico gerará a energia renovável suficiente para a produção da energia elétrica que através dos eletrolisadores PEM irão separar as moléculas de água e hidrogênio da água, o CO<sub>2</sub> será capturado do ar e combinado com hidrogênio verde irão produzir o e-metanol. O e-metanol, por sua vez pode ser convertido em e-gasolina.

Fases do projeto:

Piloto 2022: produção de 130.000 litros de e-combustível por ano;

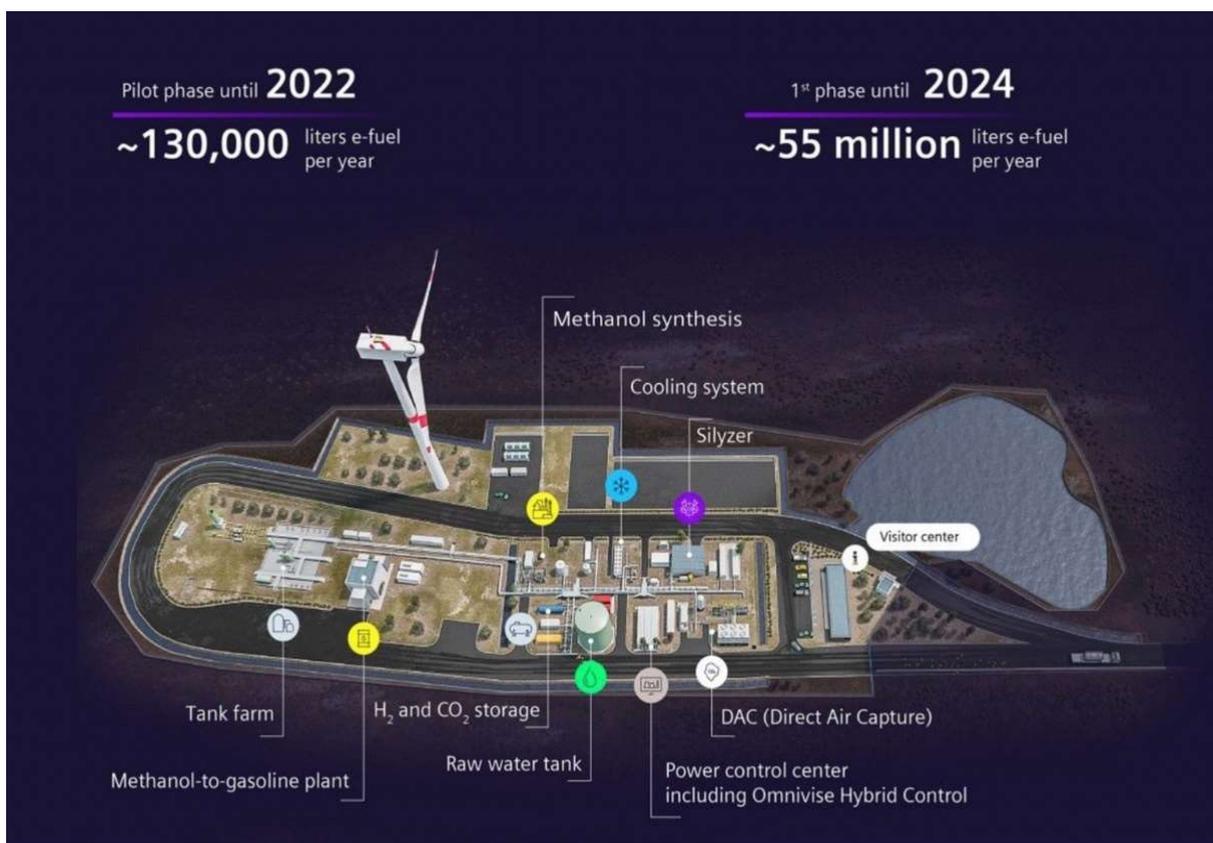
Primeira fase 2024: 55 milhões de litros de e-combustível por ano;

Segunda fase 2026: 550 milhões de litros de e-combustível por ano.

De acordo com Michael Sterner (2017), professor da Universidade Oth Regensburg da Alemanha, *Power-To-X* é uma forma de converter eletricidade, entendida como energia primária, em um transportador de energia, calor, frio, produto ou matéria-prima (*Power-To-Gas, Power-To-Liquid, Power-To-Fuel, Power-To-Chemicals e Power-To-Heat*). Hoje pode ser considerado uma solução eficaz para a descarbonização e autonomia energética dos países dependentes de combustíveis fósseis.

Parceiros no projeto: *Siemens Energy, Porsche Ag e Hif Global, Enel Green Power, Exxonmobil, Gasco, National Gas & Industrialization Company e Enap.*

Figura 6 - Projeto de Power-To-X em Haru-Oni no Chile.



Fonte: SIEMENS (2021).

### 6.5.6 Planta de Amônia Verde - Iberdrola

O projeto localizado no complexo industrial de Puertollano na Espanha produzirá amônia verde através do processo de *Haber-Bosch* (processo químico de transformação do hidrogênio através da captura de nitrogênio resultando no NH<sub>3</sub>) que será aplicado na produção de fertilizantes.

Algumas características do projeto:

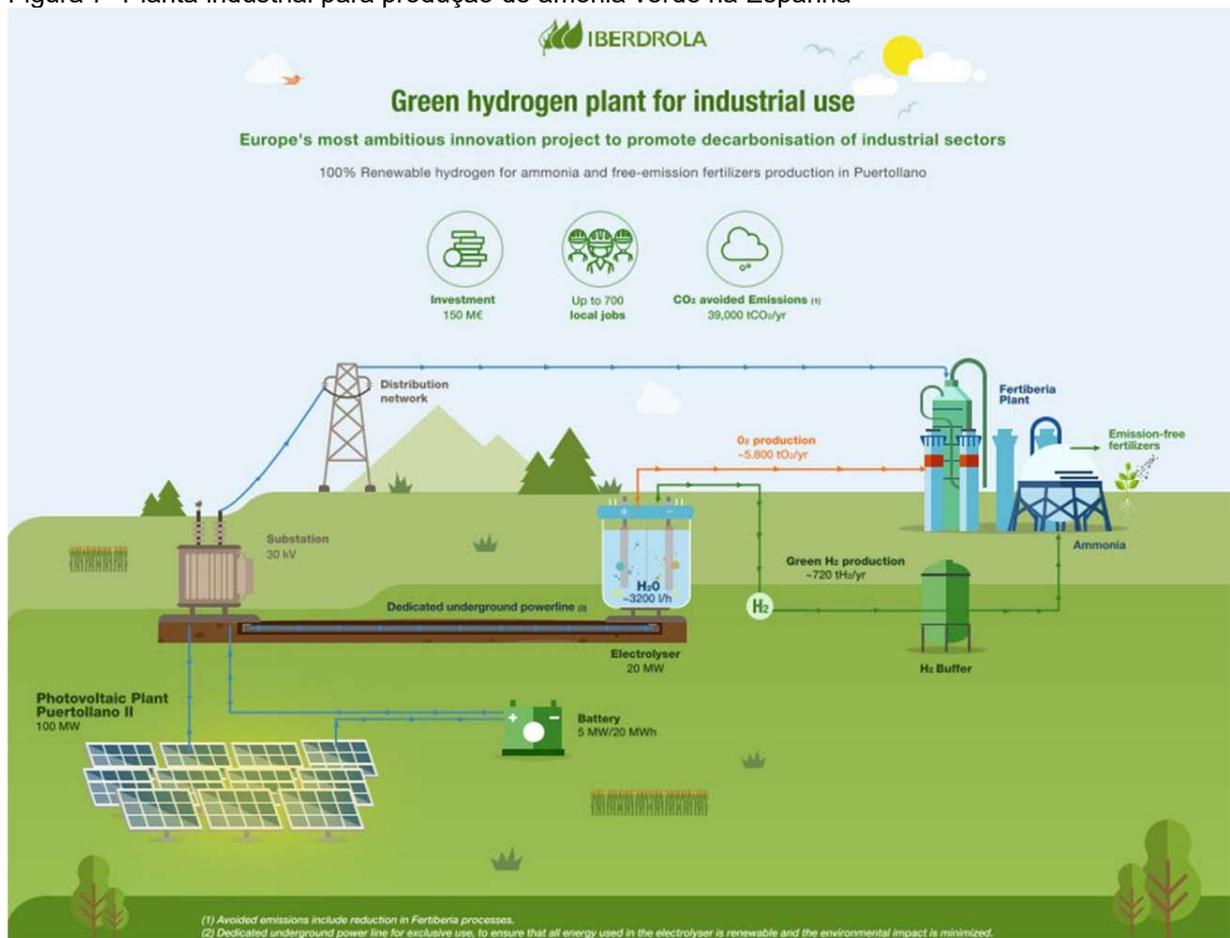
- 1) 20 MW de eletrolisadores com capacidade de produção de até 3.000 toneladas de hidrogênio verde por ano;
- 2) 100 MW de usina solar que garante que a produção de hidrogênio seja totalmente verde e livre de emissões de CO<sub>2</sub> no seu processo;
- 3) 20 MWh de armazenamento em baterias de íon-lítio garantem a autonomia da planta e controle de intermitência da geração de energia solar;
- 4) Investimento de 150 milhões de euros para a sua implantação;

- 5) O projeto resultou na criação de 1.000 empregos diretos;
- 6) Resultará em 78.000 mil toneladas de CO2 evitadas por ano.

O projeto é um marco no mercado do hidrogênio verde, pois demonstra o potencial de diversificação de aplicações da fonte energética.

A descarbonização do setor do agronegócio através de fertilizantes verdes é uma possibilidade. O Brasil possui um sistema elétrico interligado capaz de levar energia renovável dos ventos com grande velocidade e alta radiação solar do nordeste até os grandes pólos de produção agrícola nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do país que trarão grandes oportunidades para o hidrogênio e amônia verde (IBERDROLA, c2022).

Figura 7- Planta industrial para produção de amônia verde na Espanha



Fonte: IBERDROLA (c2022).

### 6.5.7 Startups no mercado de hidrogênio verde

Com o aumento das expectativas sobre o mercado de hidrogênio, *startups* com soluções inovadoras têm chamado a atenção de grandes investidores e fundos internacionais. Listo aqui algumas *startups* que considero de relevância para quem está atento a esse mercado.

- *Strohm* é uma *startup* que desenvolve infraestrutura de dutos para o escoamento de hidrogênio produzido junto a plataformas de eólica *offshore*. A empresa recebeu o aporte de 8,4 milhões de libras da *Hydrogenone Capital Llp*, fundo de investimento dedicado a projetos para a produção de hidrogênio de baixo carbono. São coinvestidores no projeto a *Shell Energy*, *Chevron Technology Ventures* e *Evonik Venture Capital* (LONDON STOCK EXCHANGE, 2022).
- A *startup* inglesa *Green Hydrogen Solutions*<sup>TM</sup> desenvolveu uma tecnologia de inteligência artificial e *blockchain* para integrar provedores de energia renovável, fabricantes de equipamentos e mercados de produção de hidrogênio verde através de eletrólise e *Offtakers* (*Green Hydrogen Solutions*).
- *Versogen* é uma *startup* americana que promete o desenvolvimento de hidrogênio verde em larga escala e de baixo custo sem afetar a vida útil ou o desempenho através da construção de eletrolisadores de baixo custo com membranas de troca de ânions (Piperion).
- *Ryze hydrogen* é uma *startup* de Oxford no Reino Unido que atua com transporte e distribuição de hidrogênio e garante o fornecimento ao mesmo preço do diesel de forma sustentável e segura (VERSOGEN, 2020).
- A *Mitsubishi Heavy Industries* investiu recentemente na *startup* americana *Electric Hydrogen* (EH2). O investimento foi realizado através de um consórcio com os investidores *Breakthrough Energy*, *Equinor*, *Amazon*, *Honeywell* e Rio Tinto. A *startup* é detentora de uma tecnologia própria de eletrólise modular que promete redução de capex e opex dos projetos voltada para aplicações industriais com grande pegada carbono como mineração, produção de aço e cimento (ELECTRIC HYDROGEN, 2022).

Figura 8 - Projeto da startup Strohm – Dutos para o escoamento de H2V Offshore



Projeto da Startup Strohm: Dutos para o escoamento de hidrogênio verde junto de aerogeradores offshore.

Fonte: STROHM (2022).

## 6.6 Projetos na Alemanha

### 6.6.1 H2 Mobility - Malha de estações de carregamento de H2

A *H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG Deutschland* foi fundada pelos parceiros *Air Liquide, Daimler India Commercial Vehicles, Linde, Omv, Shell e Totalenergies* que são responsáveis pela implantação de uma infraestrutura de hidrogênio para abastecer carros a células de combustível na Alemanha (H2 MOBILITY, c2022).

Metas para a expansão da malha de carregadores H2:

- 1) Meta de H2 *Stations*: 400 estações até 2025 (atualmente são 94);
- 2) Meta de trens movidos a H2 em 2021: 14 trens de passageiros com tecnologia de célula de combustível;
- 3) Meta de Trens movidos a H2 em 2023: 41 unidades.

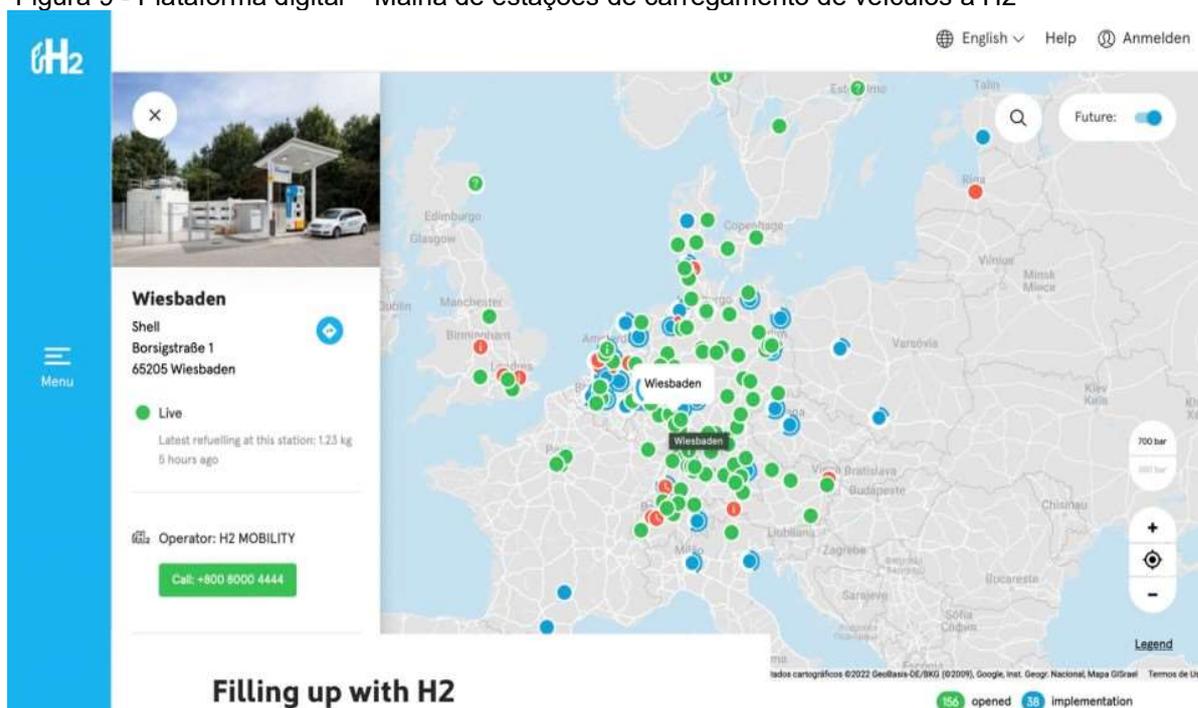
O projeto também apresenta um mapa interativo com atualizações a cada dois minutos. É possível filtrar no mapa a disponibilidade das estações com pressão de 350 bar (principalmente para ônibus e veículos comerciais) ou 700 bar (veículos de passageiros e alguns tipos de caminhões).

Os pontos verdes e vermelhos apresentam a disponibilidade da estação de carregamento. Quando acionamos o botão "future" no canto superior direito da tela, são apresentadas as estações que estão em planejamento, em construção ou em fase de testes.

Os pagamentos para o uso das estações podem ser feitos através de cartões de fidelidade ou faturas que são enviadas por e-mail.

O preço de um quilograma de hidrogênio em todos os postos de gasolina públicos *H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. Kg* na Alemanha e de € 9,50, equivalente a 100 km para um veículo movido a célula combustível.

Figura 9 - Plataforma digital – Malha de estações de carregamento de veículos a H2



Fonte: H2 (c2022).

### 6.6.2 Projeto de P&D Hycavmobil - Armazenamento de hidrogênio em cavernas

O grupo alemão *Ewe Ag* em parceria com o *German Aerospace Center (DLR) Institute* está construindo uma caverna para o armazenamento subterrâneo de

hidrogênio em rocha salina a uma profundidade de 1.000 metros em Rüdersdorf, próximo a Berlim

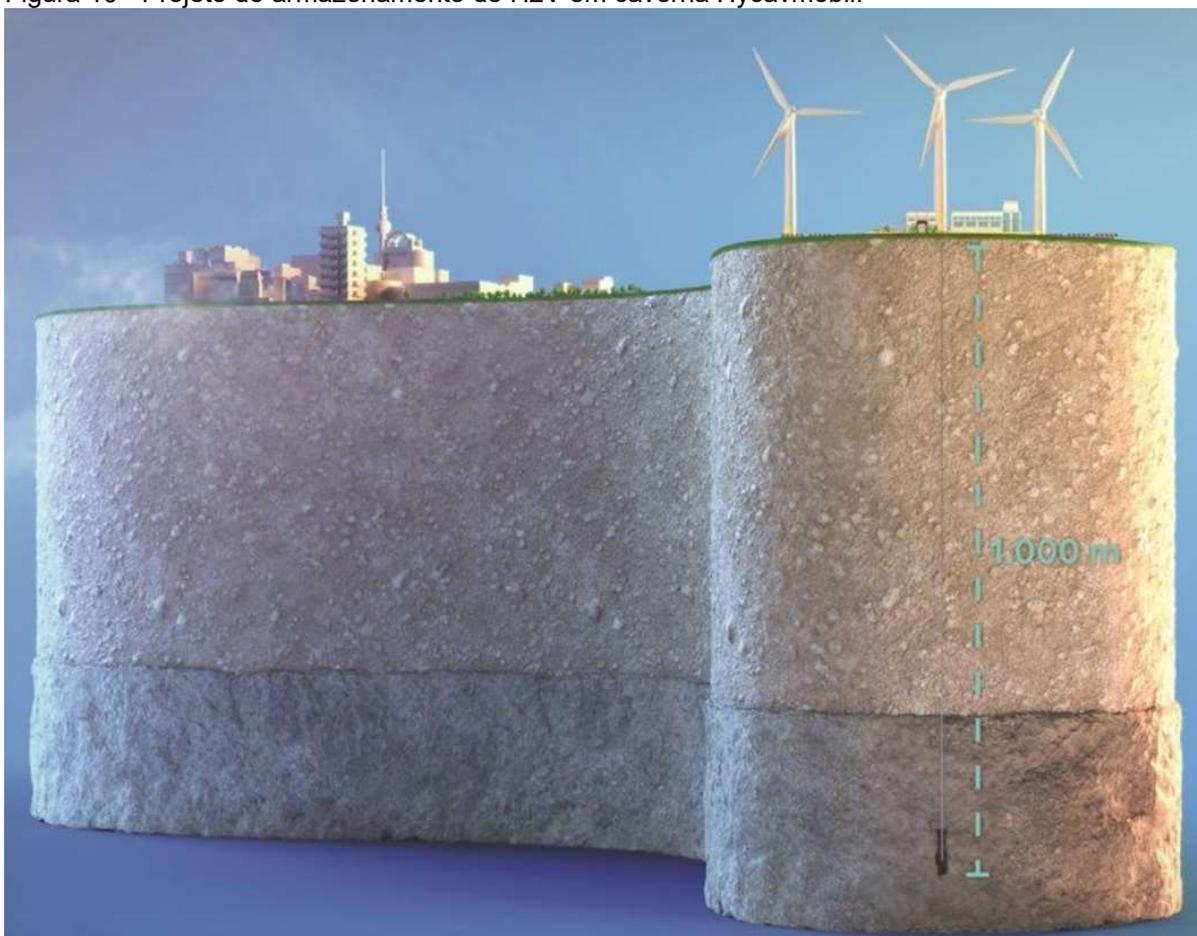
Trata-se de um projeto pioneiro com o intuito de explorar alternativas de armazenamento do hidrogênio de forma segura e que não afetem a sua qualidade (EWE, c2022).

A caverna terá capacidade de 500 metros cúbicos e assim que concluída armazenará até seis toneladas de H<sub>2</sub>. A previsão é que o projeto seja concluído esse ano.

O projeto contou com um investimento de dez milhões de euros. A partir da validação do projeto, a EWE pretende investir em novos projetos de *Utility Scale* com capacidade de 500.000 metros cúbicos nas suas 37 cavernas salinas espalhadas pela Alemanha.

Coinvestidores no projeto: *Bundesministerium Für Digitales Und Verkehr* por meio do *National Innovation Programme For Hydrogen And Fuel Cell Technology*.

Figura 10 - Projeto de armazenamento de H<sub>2</sub>V em caverna Hycavmobil.



Fonte: EWE (2022).

### **6.6.3 Projeto Aquasector - estudo investiga potencial para o primeiro parque de hidrogênio offshore de grande escala no mar do norte alemão**

O projeto *Aquasector* pretende instalar uma capacidade de eletrolisador de aproximadamente 300 megawatts (MW) para produzir até 20.000 toneladas por ano de hidrogênio verde offshore na Alemanha. O hidrogênio verde está planejado para ser transportado através de um gasoduto, chamado *Aqueductus* (RWE, 2021).

Em comparação com o transporte de eletricidade gerada no exterior, a produção de hidrogênio no mar e o transporte por gasoduto podem oferecer vantagens econômicas claras. A tubulação poderia substituir cinco sistemas de transmissão de corrente contínua de alta tensão (HVDC), que de outra forma teriam que ser construídos. Trata-se de uma opção mais econômica para transportar grandes volumes de energia por longas distâncias.

O projeto pode apoiar o desenvolvimento do mercado que trará uma demanda cada vez maior por hidrogênio verde. O primeiro passo no projeto *Aquasector* para os parceiros é realizar um estudo de viabilidade detalhado. O estudo fornecerá indicações iniciais importantes das condições sob as quais o parque de hidrogênio *offshore* em larga escala pode ser realizado com sucesso, bem como os desafios técnicos e comerciais que precisam ser superados em relação à produção de hidrogênio *offshore*.

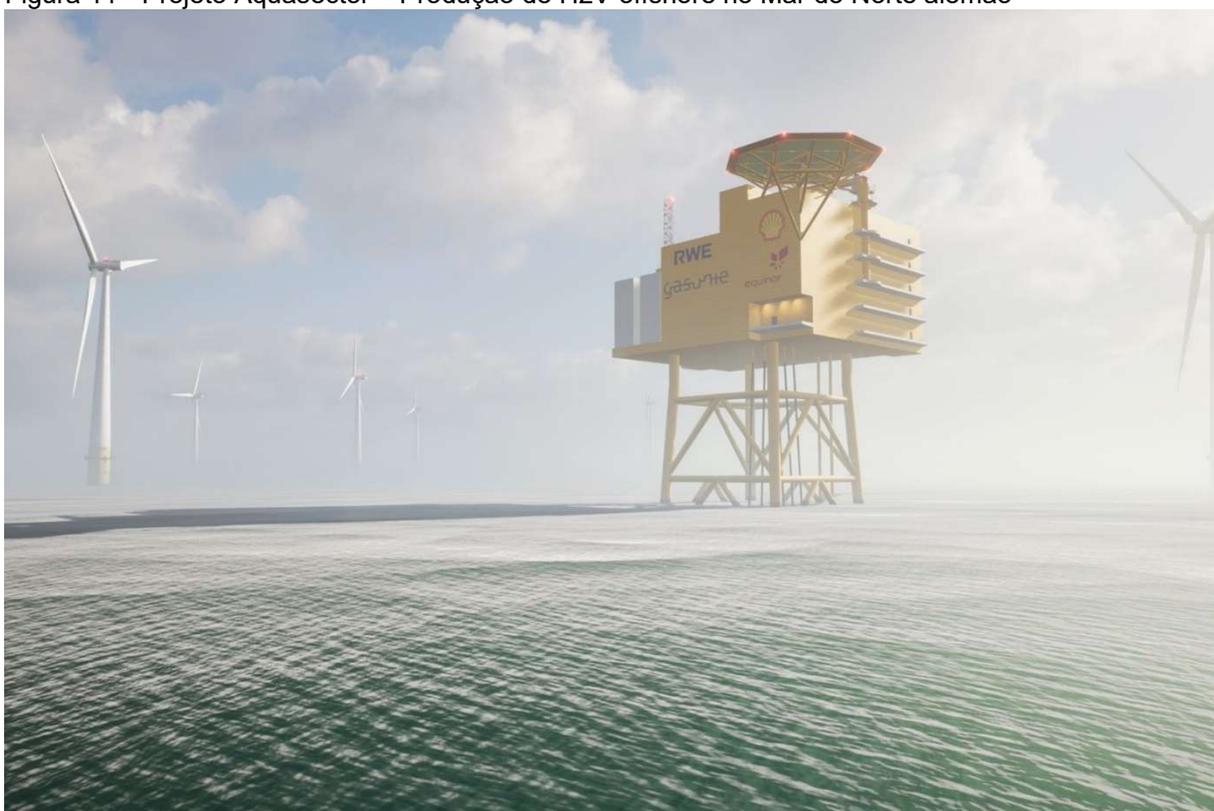
De acordo com a *Roadmap* eólica offshore da EPE (2020) o Brasil possui um potencial de até 1.335 GW (altura 100 m) e até 1.541 GW (altura de 200 m) que poderiam ser explorados na ZEE (zona econômica exclusiva) é a faixa de mar que se estende até 12 milhas náuticas (22 km), contadas a partir do litoral ao longo de 9.200 km de costa.

No mês de maio 2022, representantes de empresas nacionais e internacionais do setor apresentaram na comissão de infraestrutura (CI) um conjunto de propostas para a criação de um marco regulatório do setor. Dentre as propostas estão a criação de leilões de energia específicos como ocorreu no passado para fomentar novas fontes de energia, definição de processos quanto às sessões dos prismas para a implantação dos projetos, criação de barreiras para a entrada de agentes especulativos, valor teto para outorgas e alinhamento com um futuro marco legal para o hidrogênio verde.

Nos próximos anos acompanharemos o avanço das tecnologias de eletrolisadores e operação dos pilotos de produção de H<sub>2</sub>V *offshore*. Projetos como o *Aquasector* são referências importantes, pois *cases* como esse podem trazer novas perspectivas quanto o *modus operandi* de exploração do potencial eólico *offshore* de outros países e a sua sinergia com o hidrogênio verde.

Parceiros no projeto: *RWE, Shell, Equinor e Gasunie Deutschland*.

Figura 11 - Projeto Aquasector – Produção de H<sub>2</sub>V offshore no Mar do Norte alemão



Projeto AquaSector - Produção de H<sub>2</sub>V offshore no Mar do Norte Alemão

Fonte: RWE (2021).

#### **6.6.4 Projeto Refhyne - hidrogênio verde no processo de refino de petróleo na Alemanha**

O hidrogênio é indispensável em operações de refino de petróleo. Normalmente, é usado para reduzir o teor de enxofre de todo o querosene, gasolina e diesel. No entanto, esse hidrogênio é feito através da reformulação de metano a vapor (hidrogênio cinza) usando gás natural para a matéria-prima, resultando em altas emissões de carbono (ITM POWER, c2022).

Lançado em janeiro de 2018, o projeto *Pan-Europeu Refhyne* tem como objetivo fornecer hidrogênio limpo e verde para as refinarias. Funcionando até dezembro de 2022, e financiado pela *European Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (FCHEA)* recebe apoio do programa de pesquisa e inovação horizonte 2020 da União Europeia, *Hydrogen Europe* e *Hydrogen Europe Research*. Juntamente com a *ITM Power* (LSE: ITM.L), os parceiros do projeto incluem *Shell Deutschland Oil*, *Tankstelle*, *Sintef Energy Research*, *Element Energy* e *Sphera And Element Energy*. O projeto está localizado na refinaria de Rhineland em Wesseling, a maior refinaria da Alemanha e atende 15% da demanda de querosene, 11% de diesel e 11% de gasolina do país.

O projeto atingiu um marco fundamental em julho de 2021 com a operação do eletrolisador *Refhyne* tipo PEM com investimento em torno de 20 milhões de euros implementados pela *ITM Power* no *Shell Energy And Chemicals Park Rineland* em Wesseling, Alemanha. Usando energia renovável produz 1.300 toneladas de hidrogênio verde por ano. Até pouco tempo atrás era o maior eletrolisador tipo PEM da Europa.

Em outubro de 2021, o consórcio *Refyhne II* garantiu 32,4 milhões de euros da *CINEA - European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency* para desenvolver um eletrolisador de 100 MW no *Shell Energy and Chemicals Park*. O projeto é coordenado pela *Sintef Energy Research* e, assim como *Shell Energy* e *ITM Power*, a segunda fase, incluem os parceiros: *Linde Engineering*, *ITM Power* (lse: itm.l), *Tecnia Research & Innovation*, *Element Energy Ltd* e *Concawe*.

O projeto tinha como objetivo o de validar a tese de integração de uma planta de hidrogênio verde com os processos de uma refinaria de petróleo convencional, incluindo a dessulfuração de combustíveis convencionais, testar a tecnologia de eletrolisador PEM na maior escala alcançada até então e a sua exploração ao nível de P&D quanto a possibilidade de aplicações voltadas a indústria, geração de energia, aquecimento e mobilidade.

Figura 12 - Planta de produção de H<sub>2</sub>V para refino de petróleo em Wesseling.



Fonte: ITM POWER (c2022).

### 6.6.5 Aquaventus: geração de energia eólica e hidrogênio verde *offshore* na Alemanha

A empresa de energia alemã RWE está desenvolvendo um projeto inovador de geração de energia eólica e hidrogênio verde *offshore* na Alemanha, ou seja, todo o processo de geração da energia renovável, processo eletrólise da água para a extração do hidrogênio e feito no mar e depois transportado para o continente. O projeto *Aquaventus* é um complexo eólico *offshore* com eletrolisadores instalados junto dos aerogeradores ou nas suas imediações no mar do norte da Alemanha, tendo como região central a Ilha de Helgoland (AQUAVENTUS, c2022).

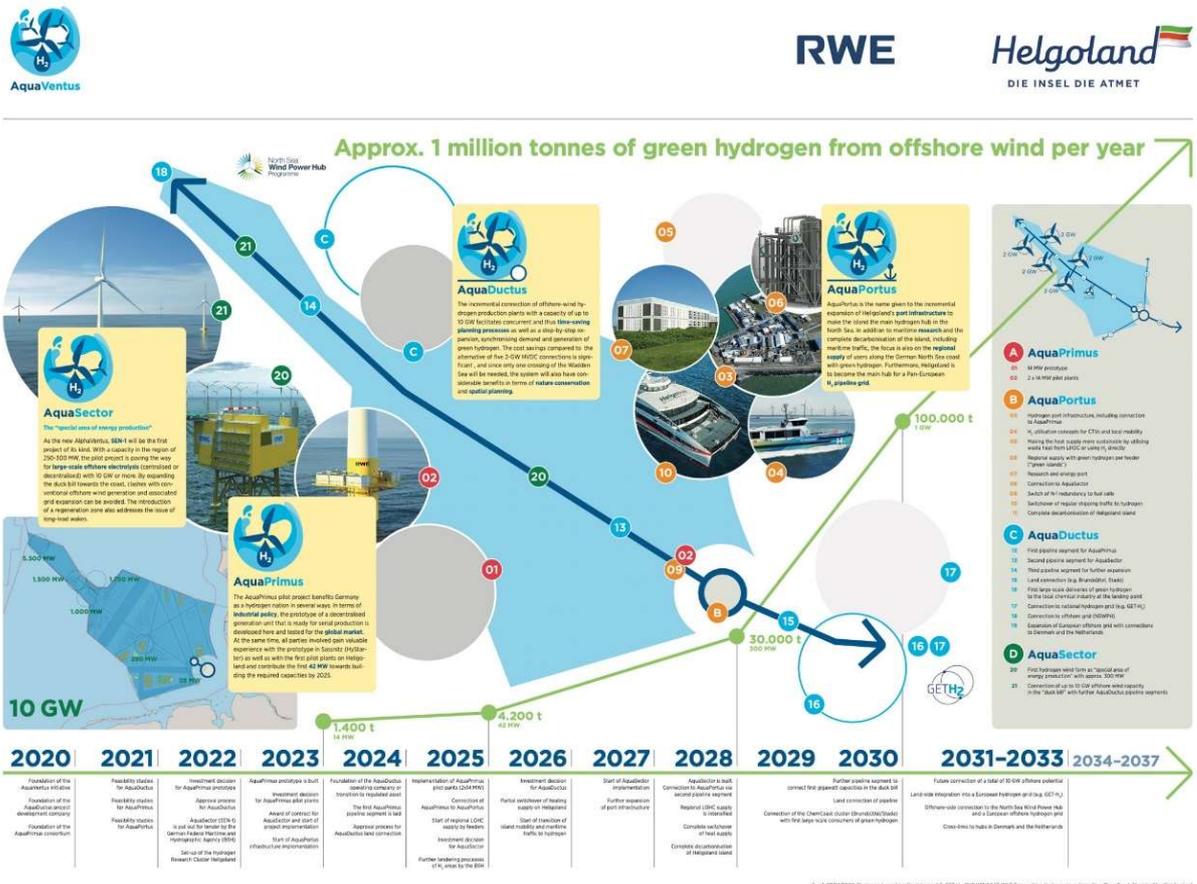
O projeto começará com um piloto de 2 eletrolisadores e aerogeradores de 14 MW cada. Existem outros projetos que orbitam o *Aquaventus* que são complementares a sua operação e que visam sua expansão no médio e longo prazo, sendo um deles o projeto *Aquaductus* que levará hidrogênio verde de Helgoland para o continente através de oleodutos e o *Aquasector* que será uma expansão de projeto-

piloto para 300 MW e produzirá 20.000 toneladas anuais de hidrogênio verde. Até 2035, a RWE espera implantar 10 GW de eletrolisadores no Mar do Norte, capazes de produzir 1 milhão de toneladas de hidrogênio verde anualmente.

Esses projetos serão um marco tanto na geração de energia eólica *offshore* quanto da produção de hidrogênio verde. A RWE e parceiros esperam que o resultado do projeto seja a validação da tese de que a produção de hidrogênio verde *offshore* será eficiente, econômica e sustentável.

São parceiros da RWE no projeto a Ilha de Heligoland, *Reuther, Vattenfall, Shell, Gasunie, Siemens, Parkwind, Mhi Vestas Offshore Wind.8*

Infográfico 4 - Projeto Aquaventus na Alemanha



Fonte: RWE (2022).

## 6.7 Políticas de fomento ao hidrogênio verde no mercado alemão

Em 2020, o governo alemão apresentou a sua estratégia nacional de hidrogênio no relatório *The National Hydrogen Strategy*. Anualmente são apresentados os reportes da implementação dos projetos. Dentre as medidas apresentadas, pode-se destacar:

1. Ajuste na estrutura tarifária para fomentar as renováveis para precificação do carbono, principalmente nos setores de combustíveis e aquecimento que possuem maior demanda por gás;
2. Exploração de novos modelos de negócio para cooperação de geração do H2V e os operadores do *grid* de forma a otimizar os custos e evitar distorções, sendo tratado pelo ministério da economia. Estão sendo implantados dois projetos pilotos pelo *Living Labs For The Energy Transition* do governo alemão;
3. Apoio do governo na transição do H2V para o setor industrial financiando eletrolisadores e a possibilidade de se criar licitações de H2V para descarbonizar o setor de indústria siderúrgica e química;
4. Plano do governo para expansão de sites para exploração de eólica *offshore* para a produção de H2V e PTX;
5. Criação de políticas para adoção de H2V no setor de transportes;
6. Financiamento adicional de 3,6 bilhões de euros do Fundo de Energia e Clima (ECF) para expansão do programa de inovação de tecnologias de H2 e células combustíveis com foco no setor de transportes, incluindo o fomento de projetos de P&D com foco na redução dos custos até 2023;
7. 1,1 bilhões de euros para plantas para a produção de PTX (combustíveis sintéticos) até 2023;
8. 3,4 bilhões de euros para infraestruturas de abastecimentos de veículos H2 até 2023;
9. Estruturação de arcabouço regulatório para que a união europeia facilite o transporte transfronteiriço por células combustíveis - atualmente em discussão no conselho da UE;
10. Apoio governamental para a uma indústria competitiva na produção de células combustíveis;

11. Políticas de incentivo para veículos com emissão zero com o intuito de fomentar frotas principalmente de ônibus públicos nos centros urbanos;
12. Políticas de subsídio a taxas de pedágio para caminhões com zero emissões (nível UE);
13. Padronização e normatização quanto aos padrões de abastecimento, qualidade do H2, homologação de veículos, etc. Atualmente sendo conduzido pelo Ministério de Transportes e Infraestrutura Digital;
14. Programa de financiamento de descarbonização do setor industrial e programas para uso de H2 na produção industrial até 2024;
15. Estruturação em 2022 dos CCFDS (Contratos de Carbono por Diferença) que um reembolso por investimento nos eletrolisadores para as indústrias da siderurgia e química. A Alemanha pretende coordenar esse projeto com a UE;
16. Criação de mecanismos para acelerar inserção do uso de produtos manufaturados com H2V através de certificações e definição de cotas de demanda;
17. Definir cotas de descarbonização de longo prazo para os setores de uso intensivo de energia (química, aço, logística e aviação);
18. 700 milhões de euros até 2024 para o financiamento de sistemas de aquecimento a células de combustível para novas construções não residenciais;
19. Financiamento do governo para projetos de cogeração qualificada para calor através de H2V;
20. Estruturação do plano de desenvolvimento da rede de gás em 2022, incluindo ações de curto de prazo (limites de inserção de H2 nas redes de GNL e a implantação das redes de gás dedicados a H2V);
21. Medidas para interligação das infraestruturas de eletricidade, calor e gás onde serão definidos orçamentos e arcabouços regulatórios para sua implantação adaptados para as necessidades da transição energética europeia;
22. Estruturação da geolocalização da expansão das redes de H2;

23. H2 *Compass* - definição das prioridades em P&D para o desenvolvimento do mercado de H2 em conjunto com a academia, empresas e sociedade civil - 4,2 milhões euros para conclusão em 2024;

24. Estruturação de projetos de pesquisa com parcerias internacionais visando uma cadeia de suprimento global - primeiros projetos em parceria com Austrália (*Hygate*);

25. *Hydrogen Technologies 2030* - campanha interministerial para o agrupamento das atividades de pesquisa de tecnologias que facilitam e aceleram a adoção do H2;

26. Apropriações dos projetos de P&D implantados serão base para a arcabouço regulatório nacional e europeu. Grupo de trabalho formado e atuando desde 2020;

27. 25 milhões de euros para projetos de H2 voltados para o setor da aviação até 2024;

28. 25 milhões de euros para o programa de investigação marítima até 2024 para o desenvolvimento de um navio de emissões zero;

29. Formação de estudantes nos diversos níveis acadêmicos para a especialização em H2. Programa iniciado em 2021;

30. Estruturação de padrões de sustentabilidade e qualidade na produção de H2 e PTX - regulamentos, códigos e normas europeias. A Alemanha intensificará o diálogo com outros países focando em uma universalização nas OIS;

31. Cooptação dos outros estados-membros da UE para investimento, pesquisa, desenvolvimento e demonstração do H2V. Atualmente 24 signatários no IPCEI (*Important Projects of Common European Interest*);

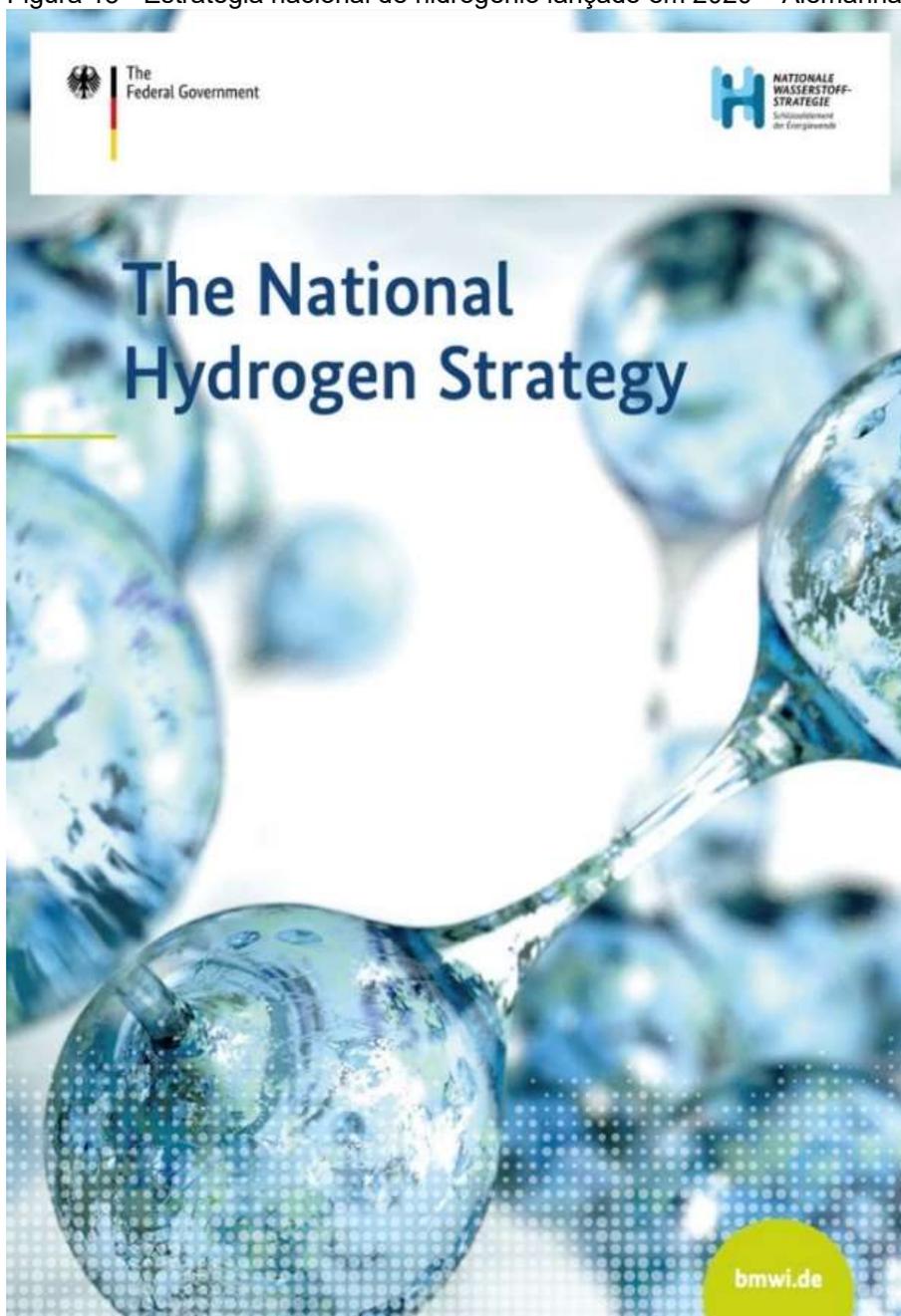
32. Compromissos da Alemanha de elaborar um livro verde para UE apresentando os prospectos da estratégia do H2V;

33. Criação de uma empresa europeia de H2 para promover e desenvolver capacidades de produção e infraestruturas internacionais conjuntas se houver apoio europeu suficiente.

34. Fomentar parcerias com países estratégicos no tema H2;

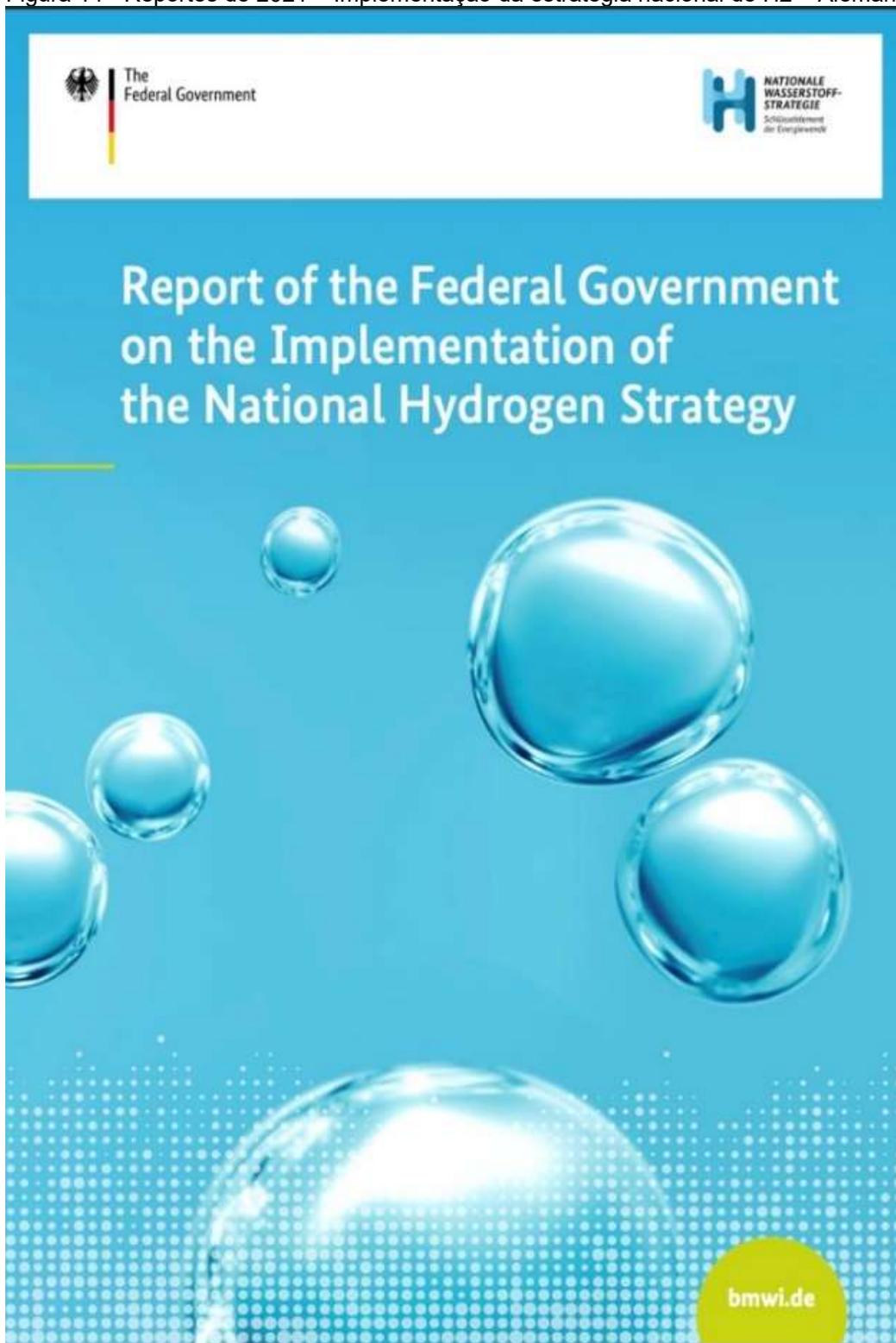
35. Será criada uma plataforma para as empresas alemãs se posicionarem no mercado externo;
36. Reforço nas parcerias internacionais (IPHE, IRENA, IEA);
37. Projetos-piloto em países parceiros apresentando indicadores de que o H2V e seus derivados são competitivos e sustentáveis (no Brasil o programa H2 Brasil - 40 milhões de euros em financiamento);
38. Transição energética gradual onde o governo alemão intensificará o diálogo com os países fornecedores de combustíveis fósseis.

Figura 13 - Estratégia nacional de hidrogênio lançado em 2020 – Alemanha



Fonte: THE FEDERAL GOVERNMENT (2022).

Figura 14 - Reportes de 2021 – Implementação da estratégia nacional de H2 – Alemanha



Fonte: THE FEDERAL GOVERNMENT (2021).

## 7 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA REGIONAL

### 7.1 Planos de integração energética do hidrogênio no contexto da União Europeia

#### 7.1.1 RepowerEU: plano de aceleração da transição energética europeia

A Comissão Europeia apresentou no dia 18 de maio de 2022 o programa *REPowerEU* que visa reduzir rapidamente a dependência da UE dos combustíveis fósseis russos e acelerar a transição energética para uma matriz mais limpa (EUROPEAN COMMISSION, 2022).

O hidrogênio verde terá papel fundamental na substituição do gás natural, carvão e petróleo nas indústrias e transportes e apresenta uma estratégia dedicada a acelerar a sua inserção no mercado europeu. Para isso, foram estabelecidas metas a serem alcançadas até 2030, que constam no REPowerEU Plan, e pode-se resumilas em:

1. Produção doméstica de hidrogênio verde em 10 milhões de toneladas anuais;
2. Importação de hidrogênio verde em 10 milhões de toneladas anuais.

Para facilitar a importação de até 10 milhões de toneladas de hidrogênio renovável, a comissão apoiará o desenvolvimento de três grandes corredores de importação de hidrogênio através do mediterrâneo, da zona do Mar do Norte e, logo que as condições o permitam, com a Ucrânia.

Para alcançar essas metas, Investimentos necessários na ordem

1. Entre 28 a 38 bilhões de euros para gasodutos internos da UE;
2. Entre 6 e 11 bilhões para infraestrutura de armazenamento de hidrogênio.

Conjunto de ações do plano:

1. Economizar energia;
2. Diversificar a oferta;
3. Substituir rapidamente os combustíveis fósseis acelerando a transição para as energias limpas na Europa;

#### 4. Combinar investimentos e reformas de forma inteligente.

O *RepowerEU* baseia-se na implementação total das propostas *Fit For 55* apresentadas no ano passado sem modificar a ambição de alcançar pelo menos -55% de emissões líquidas de GEE até 2030 e neutralidade climática até 2050, em conformidade com o pacto verde europeu. Serão investidos mais de 200 euros milhões para dobrar o número de HUBS de hidrogênio na Europa.

Há uma dupla urgência para reduzir a dependência energética da Europa: a crise climática, severamente agravada pelo conflito entre a Rússia e a Ucrânia e a dependência da UE dos combustíveis fósseis, que a Rússia usa como arma econômica e política.

A comissão europeia encerra o comunicado apelando aos dirigentes, estados-membros, autoridades regionais e locais, e de fato todos os cidadãos e empresas, para que reduzam a dependência energética da Europa da Rússia através da implementação do plano *RepowerEU*.

Figura 15 - Logo Euro – RepowerEU



Fonte: EUROPEAN COMMISSION (c2022).

### 7.1.2 Panorama do mercado de hidrogênio verde na América Latina e Caribe

O H2LAC, plataforma colaborativa que fomenta o desenvolvimento do mercado do hidrogênio na América Latina, a Hiniçio, programa Euroclima, *The World Bank*, *Eclac* e o *Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GMBH* apresentaram em agosto de 2022 o infográfico "*Estado del Desarrollo del Hidrógeno Verde en America Latina y el Caribe: Hojas de Ruta y Perspectiva Regional*" (H2 LAC, 2022).

Além de apresentar algumas premissas básicas sobre o mercado do hidrogênio verde, *Power-To-X* e *insights* técnicos, traz um panorama sobre o *status* atual do *framework* regulatório, projeção de custos (USD/kg H2) para 2050 nos países da América Latina e *Roamap* de projetos:

- 1) H2 aplicados em refinarias, produção de amônia verde e metanol;
- 2) H2 aplicados ao transporte (trens, navios, caminhões, etc.)
- 3) Projetos de infraestrutura para a distribuição, conversão e armazenamentos de H2;
- 4) Mega plantas de H2 > 1 GW.

O infográfico apresenta também as dinâmicas do mercado de H2 apresentando os países que estão posicionados para a exportação (Austrália, Latam, África e Oriente Médio) e as regiões importadores (América do Norte, Europa e Ásia).

Infográfico 5 - Projeção de custos e panorama da estrutura regulatória – H2 Latam



Lado esquerdo: Projeção de Custos de H<sub>2</sub>V na América Latina em 2050 / Lado direito: Parâmetro da estrutura regulatória para o desenvolvimento do mercado de H<sub>2</sub>V na América Latina

Fonte: H2LAC (2022).

## 7.2 Regras da União Europeia para o P2X (Power to X)

Em julho de 2022, os especialistas da plataforma de inteligência de mercado para o hidrogênio *Power-To-X Hub* apresentaram uma análise dos atos delegados nos art. 27 e 28 do RED II (diretiva para energias renováveis) (PTX HUB, 2022).

Na análise realizada em conjunto com a *Hinicio, Dii Desert Energy / Desertec 3.0* são exploradas as formas como os artigos influenciam na aceleração do mercado de *Power-To-X* incluindo os combustíveis sintéticos.

O Artigo 27 estabelece os requisitos para o fornecimento de energia renovável para a produção de RFNBOS (*Renewable Fuels of Non-Biological Origin*) incluindo o H<sub>2</sub>. São explorados nesse artigo a qualificação da energia levando em consideração a forma de conexão para o suprimento (conexão direta a planta de H<sub>2</sub>, mix de energias providas do *grid* e PPAS por geração renovável remota), a participação de renováveis na matriz produtora, critérios de adicionalidade, sincronicidade e correlação geográfica.

No Artigo 28 são tratados a metodologia para avaliação das reduções de GEE dos RFNBOS e definição da quantidade de emissões para qualificação e validação da produção.



- 1) A possibilidade de aumentar a escala de fabricação das plantas de amônia e hidrogênio no curto prazo;
- 2) Padronização dos equipamentos das plantas de amônia e eletrolisadores nessa fase preliminar terá grande contribuição para a redução dos custos;
- 3) Incentivos tributários para acelerar a equiparação entre os preços do hidrogênio verde e o cinza;
- 4) Os investidores do mercado de infraestrutura dispostos a assumir riscos terão papel fundamental para escalar a indústria e reduzir os custos;
- 5) Arcabouço regulatório que permita o desenvolvimento e a operação dos meios de transporte de hidrogênio e amônia (dutos terrestres e navios) nos portos para o armazenamento e escoamento para a Europa;
- 6) Articulação política para inserção do hidrogênio e amônia verde na matriz energética e de suprimento ao mercado agroindustrial do país produtor através de cotas de consumo interno;
- 7) Aproveitamento do corredor australiano-alemão como uma solução pragmática para a descarbonização em 80% e a partir dessa experiência se tornar a referência para a União Europeia;
- 8) Ações voltadas a comunicação para que o público conheça a cadeia de valor do hidrogênio;
- 9) Considerando o contexto crítico da guerra entre a Ucrânia e a Rússia, e necessário avançar com as ações para a resolução de 80% da demanda alemã até que se desenvolva uma solução para 100%;
- 10) O desenvolvimento da economia verde do hidrogênio reforçaria a segurança econômica e energética no contexto do acordo germano-australiano ao mesmo tempo, em que estabeleceria uma tendência para o resto do mundo.

Figura 17 - White Paper – força tarefa Austrália e Alemanha – Cadeia produtiva

# GREEN HYDROGEN TASK FORCE

## WHITE PAPER AND 10 POINT ACTION PLAN

### JUNE 2022



Fonte: FFI (2022).

#### 7.2.2 Mapa das dinâmicas de importações e exportações de H2 de baixo carbono em 2040

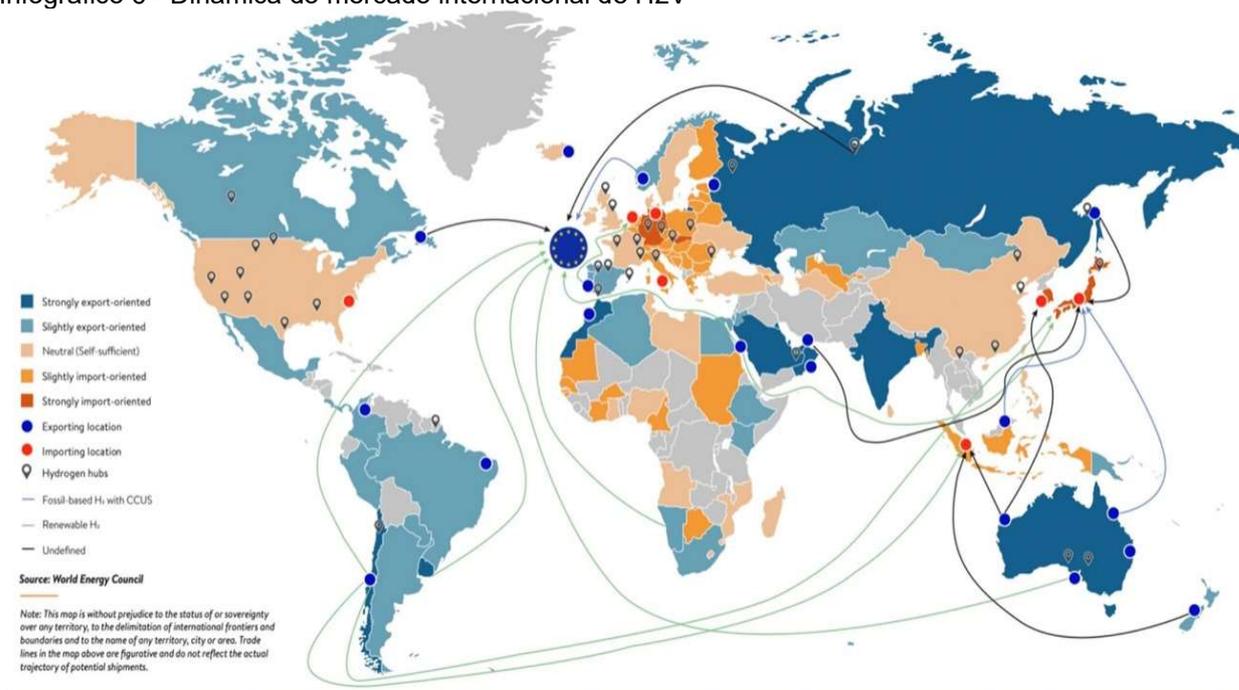
Em abril de 2022, a PWC e a *electric Power Research Institute* (EPRI) através do *low-Carbon Resources Initiative* (LCRI) apresenta no relatório *Regional Insights Into Low-Carbon Hydrogen Scale-Up* um mapa das dinâmicas do mercado de

hidrogênio para 2040. Os países são classificados de acordo com o seu posicionamento no tabuleiro da geopolítica energética para o mercado de hidrogênio de baixo carbono (WORLD ENERGY COUNCIL, 2022).

A PWC identificou 80 especialistas de diferentes regiões que contribuíram com a análise para a classificação dos atores como aqueles que estariam orientados a produção e exportação, autossuficiência e importação do H2.

As rotas estão baseadas nos projetos e memorandos de entendimento anunciados, políticas de planejamento energético, parcerias e cooperações bilaterais de acordo com referências do *World Energy Council*, *International Energy Agency (IEA) - Global Hydrogen Review 2021* e *International Renewable Energy Agency (IRENA) - Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor 2022*.

Infográfico 6 - Dinâmica do mercado internacional de H2V



Fonte: WORLD ENERGY COUNCIL (2022).

### 7.2.3 Port of Rotterdam - Hub de importação de hidrogênio para Europa.

Atualmente quase três vezes do consumo total de energia da Holanda e entregue é Rotterdam anualmente através do porto. Isso equivale a 13% da demanda energética total da União Europeia. Trata-se principalmente de petróleo bruto. A maioria é transportada para a Alemanha e para o resto da Europa. O restante é processado pela

indústria em Rotterdam, principalmente matéria-prima para a indústria química e combustíveis para os mercados holandês e internacional.

Isso significa que Rotterdam é o porto de energia do noroeste da Europa. Esta função continuará no futuro, mas o fluxo de energia mudará. Ele consiste principalmente de hidrogênio, considerando que a demanda para esse combustível aumentará consideravelmente.

A autoridade portuária de Rotterdam espera que, até 2050, 18 milhões de toneladas de hidrogênio entrarão no noroeste da Europa através do porto, enquanto simultaneamente 2 milhões de toneladas serão produzidas localmente. Várias empresas do porto preparam-se para importar hidrogênio a partir de 2025 (PORT OF ROTTERDAM 2022).

A intenção é conectar o porto de Rotterdam com uma rede nacional em desenvolvimento (*hytransport.rtm*). Enquanto isso, os preparativos para a construção do corredor delta estão em andamento em uma série de novos oleodutos entre Rotterdam, Chemelot e a indústria em Nordrhein-westfalen (PORT OF ROTTERDAM 2022).

O porto de Rotterdam concluiu recentemente um estudo antecipando até sete terminais de importação de hidrogênio utilizando diferentes tecnologias de transporte:

1) Amônia terminal verde - terminal *Europoort Construction B.V.* Existente operado pela *oci N.V.*. Novos terminais de amônia verde dedicados até 2025;

2) Iniciado o estudo de viabilidade do terminal de hidrogênio líquido com a *Kawasaki Heavy Industries, Ltd.*. Previsão de entrar em operação após 2030;

3) Terminais LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*) piloto com terminal para hidrogênio líquido em 2023. Outros pilotos também estão sendo planejados para operação antes de 2030;

4) Terminais de metanol verdes. O metanol não foi considerado um transportador de hidrogênio devido aos altos custos de desidrogenação. No entanto, o metanol verde pode ser um dos futuros derivados do hidrogênio para o qual também haverá mercado na Europa.

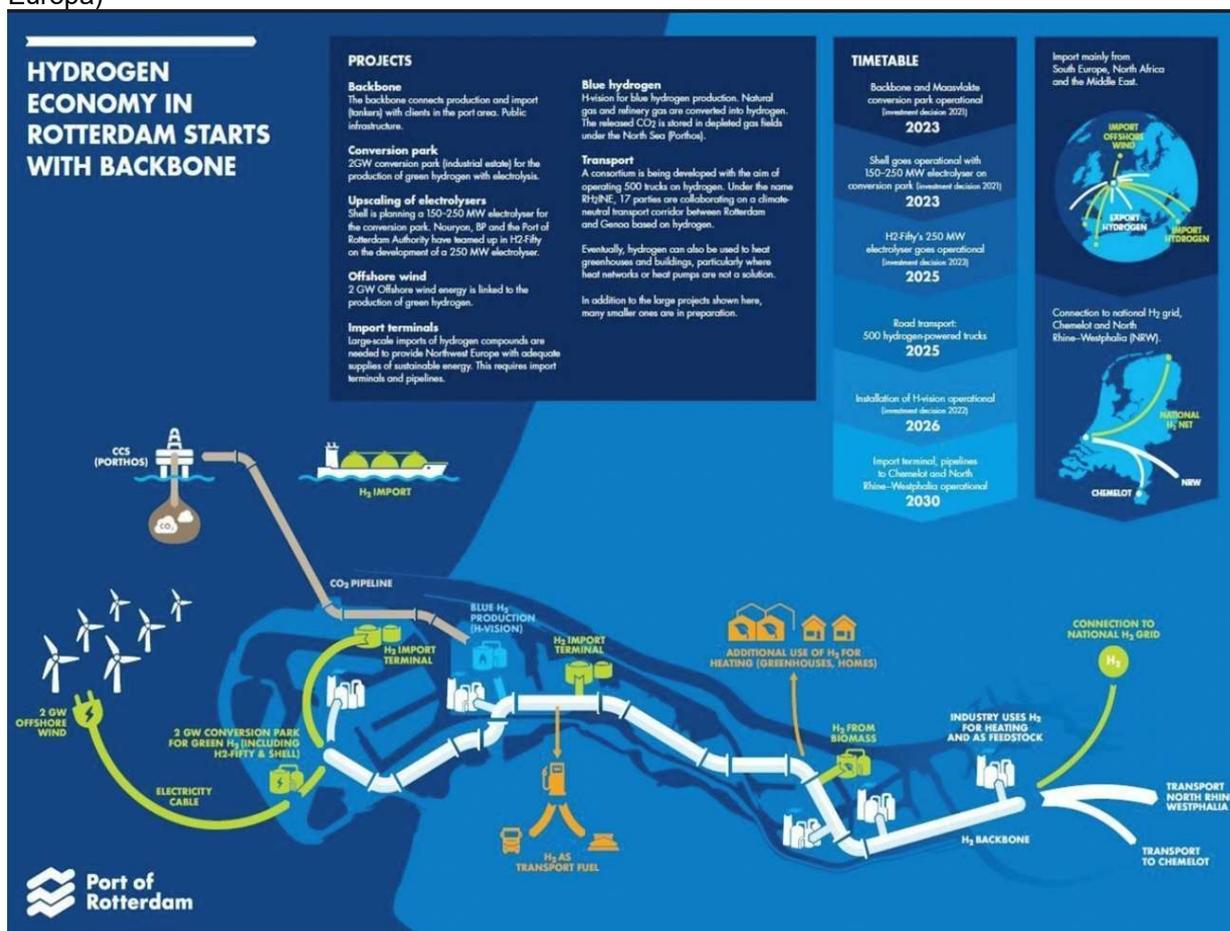
Marcos para a implantação do HUB de hidrogênio:

2023: Conclusão do *Hytransport.Rtm* - malha de hidrogênio no porto interligando os diversos terminais de importação;

2030: Conclusão do delta *Corridor European* conectando a malha de hidrogênio com os países vizinhos;

2035: Expansão da malha e conexão com a *European Hydrogen Backbone* interligando mais de 20 países na União Europeia.

Infográfico 7- Integração do porto de Rotterdam com o Backbone (malha de distribuição de H2V na Europa)



Fonte: PORT OF ROTTERDAM (2022).

### 7.2.3 Estratégia para o hidrogênio do Reino Unido

O Reino Unido através da publicação *UK Hydrogen Strategy* de agosto de 2021, apresenta sua meta de produzir 5 GW de hidrogênio de baixo carbono até 2030.

O hidrogênio de baixo carbono será essencial para alcançar sua meta do CB6 e reduzir as emissões para os níveis de 1990 até 2035. O CB6 (*Sixth Carbon Budget*)

exigido pela Lei de Mudanças Climáticas define o volume de gases de efeito estufa que o Reino Unido pode emitir durante o período de 2033-2037.

Os princípios da estratégia são:

1. Reduzir os custos de produção de hidrogênio de baixo carbono no longo prazo;
2. Crescimento econômico enquanto reduz as emissões de CO2 aproveitando a oportunidade para criar novos empregos de alta qualidade;
3. Garantir as vantagens estratégicas do Reino Unido no mercado do hidrogênio de baixo carbono, principalmente quanto a capacidade industrial;
4. Garantir a segurança energética.

Assim como a maioria dos países que possuem uma estratégia para o desenvolvimento do seu mercado de hidrogênio, a Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte apresentam suas metas de curto, médio e longo prazo.

Principais marcos para cada fase:

Fase 1 (2022 -2024): Produção de hidrogênio através de eletrólise em pequena escala, testes na indústria de transportes, estruturação do arcabouço regulatório e modelos de negócios;

Fase 2 (2025-2027): Produção de hidrogênio azul com CCS e de hidrogênio verde em grande escala, implantação das primeiras redes de hidrogênio, armazenamento em pequena escala, modelos de negócios, estrutura regulatória consolidada;

Fase 3 (2028 -2030): Implantação de uma malha de rede de distribuição regional, grande inserção de hidrogênio nos diferentes tipos de usos finais (calor industrial, produção de fertilizantes, gás residencial, transportes, energético, etc.), armazenamento em grande escala e projetos de produção de hidrogênio offshore;

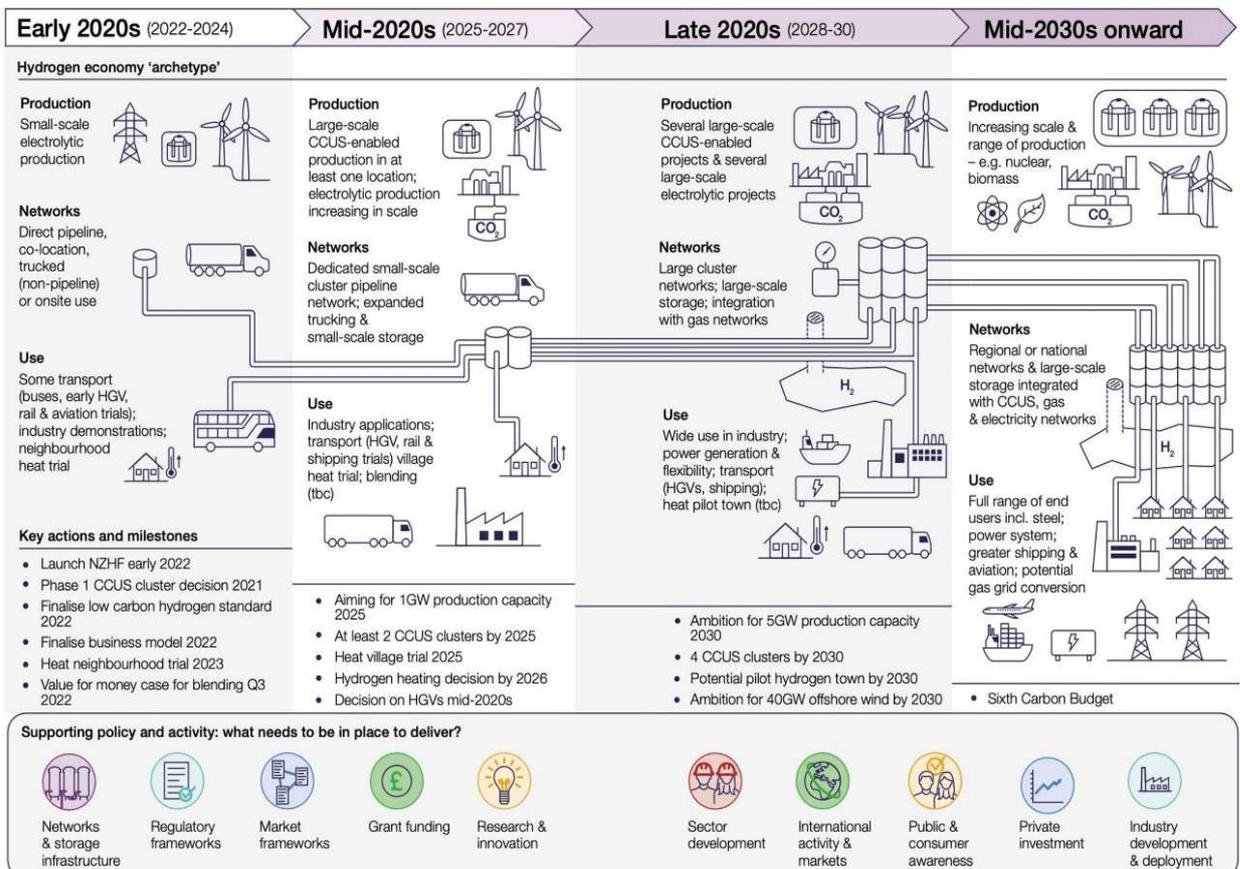
Fase 4 (de 2030 em diante): Aplicações em escala para produção de cimento, aço e aviação.

## Case da indústria britânica:

Com sede em Sheffield, a *ITM Power* (Ise: itm.I) é uma fabricante líder mundial de eletrolisadores PEM (membrana de troca de prótons), uma tecnologia para produção de hidrogênio a partir de água e energia elétrica. A nova *Gigafactory* da empresa é a maior fábrica de eletrolisadores do mundo, com capacidade de 1 GW por ano para produzir hidrogênio renovável para transporte, calor e produtos químicos. Em maio de 2020, a *ITM Power* anunciou planos para estabelecer uma subsidiária - a *ITM Motive* - para construir e operar oito estações de reabastecimento de H2 acessíveis ao público no modelo *As A Service*.

Vários projetos da ITM são apoiados pelo governo. O projeto *Gigastack* estruturado com as empresas *Ørsted*, *Phillips 66* e *Element Energy* desenvolve tecnologia de eletrolisadores para produzir hidrogênio verde em escala industrial.

Infográfico 8- Estratégia de curto, médio e longo prazo para o H2V no Reino Unido



Fonte: UK HYDROGEN STRATEGY (2021).

## 8.1 A competitividade na produção de hidrogênio

### 8.1.1 O mercado de eólica offshore e hidrogênio na Colômbia

Em julho de 2022, a Colômbia lançou uma legislação que regulamenta o mercado de eólica *offshore*.

A legislação estabelece os processos para o licenciamento e concessão dos prismas para o desenvolvimento dos projetos. O sistema de concessão é similar às já consolidadas concessões de uso de áreas para o desenvolvimento *Greenfield* de projetos eólicos e solares *onshore* no Brasil.

A primeira rodada de leilão para concessão de prismas se dará em 2023 nos Mares do Caribe. O país possui potencial de 50 GW na Bacia do Atlântico Oeste e prevê a instalação de 1 GW até 2030.

O órgão competente para gerir as permissões é o DIMAR (*Dirección General Marítima Colombiana*). As licenças nessa primeira rodada permitirão que os investidores façam suas análises e avancem no processo de viabilidade técnica e econômica.

O mercado de eólica *offshore* avança em paralelo com a consolidação da legislação para o hidrogênio lançada no dia 3 de agosto pelo Ministério de Minas e Energia da Colômbia.

No final do ano passado o país apresentou o seu *Green Hydrogen Roadmap*, que propunha a implantação de 1 a 3 GW em plantas de hidrogênio verde nos próximos 10 anos.

A nova legislação define as premissas para o lastro da pegada de carbono da produção de hidrogênio. Para qualificação as plantas de H2V podem ser conectadas a rede com certificação da geração de energia renovável como o *I-REC*.

Para os projetos de hidrogênio azul são necessários mecanismos para a captura de carbono (CCS).

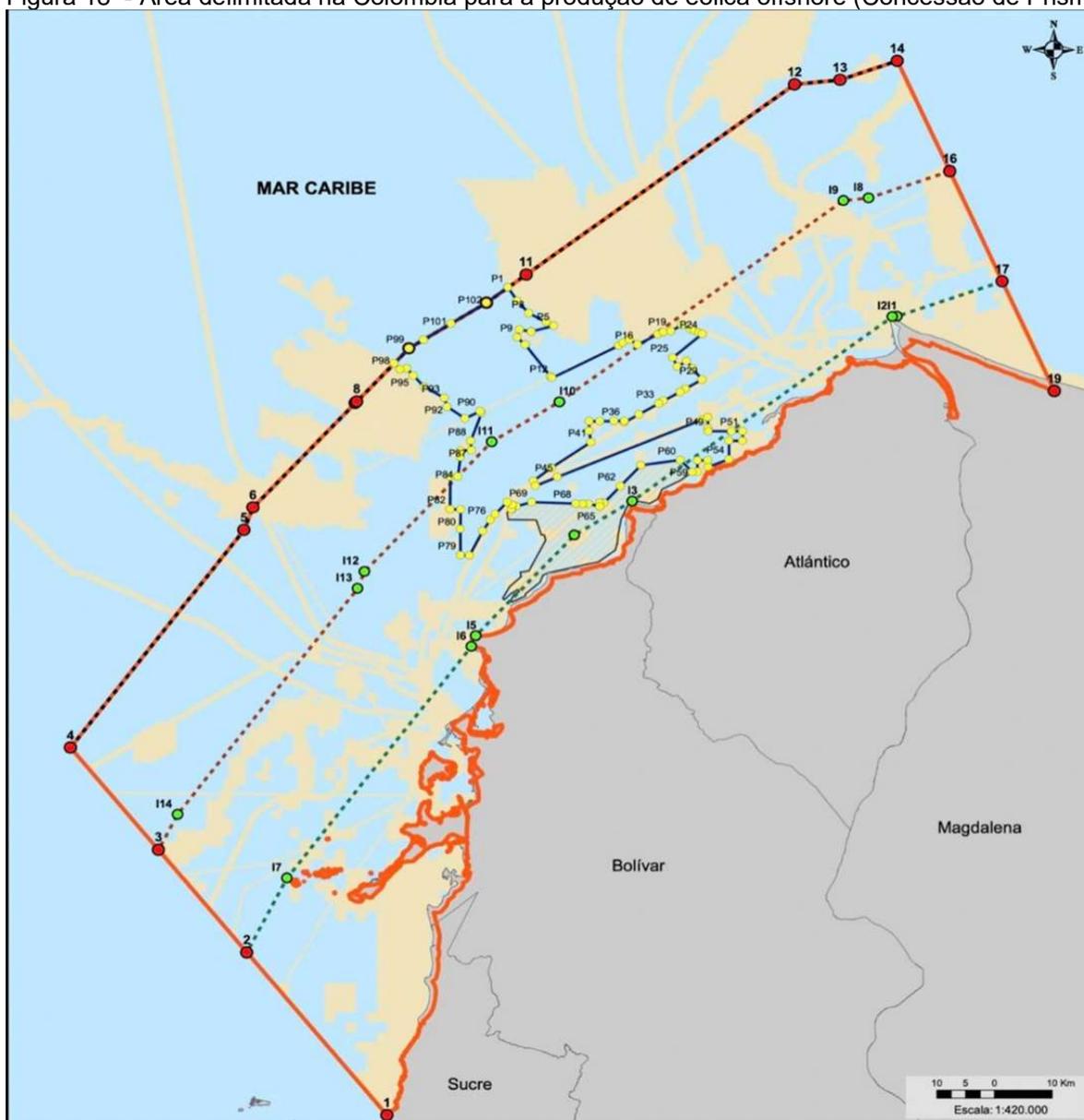
A comissão reguladora de energia e gás (CREG) definirá as condições para a injeção de hidrogênio nas redes de gás natural.

A legislação também define as diretrizes, requisitos e metodologias para o uso de formações geológicas para armazenamento de hidrogênio, como no caso do projeto de P&D da *Hycavmobil* na Alemanha já citado anteriormente.

A Colômbia é mais um dos países da América Latina que está movendo suas peças no tabuleiro da nova geopolítica energética. A transição para uma matriz de baixo carbono aliada a segurança energética global traz grandes oportunidades para os países latinos considerando:

1. Disponibilidade de recursos energéticos renováveis,
2. Facilidade de escoamento do gás para a Europa;
3. Produção de amônia verde para a fabricação de fertilizantes através de síntese *Haber-Bosch*;
4. Descarbonização do processo de fabricação de *commodities*.

Figura 18 - Área delimitada na Colômbia para a produção de eólica offshore (Concessão de Prismas)



Fonte: RENEWS.BIZ (2022).

### 8.1.2 A geopolítica energética dos mercados emergentes para o hidrogênio verde

A publicação *Hydrogen Business Guide - Bilateral Energy Partnerships in Developing Countries and Emerging Economies* abrange uma análise de sete países emergentes que possuem diálogos e parcerias com a Alemanha através do *Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH* em nome do *Bundesministerium Für Wirtschaft Und Klimaschutz (PTX HUB, 2022)*.

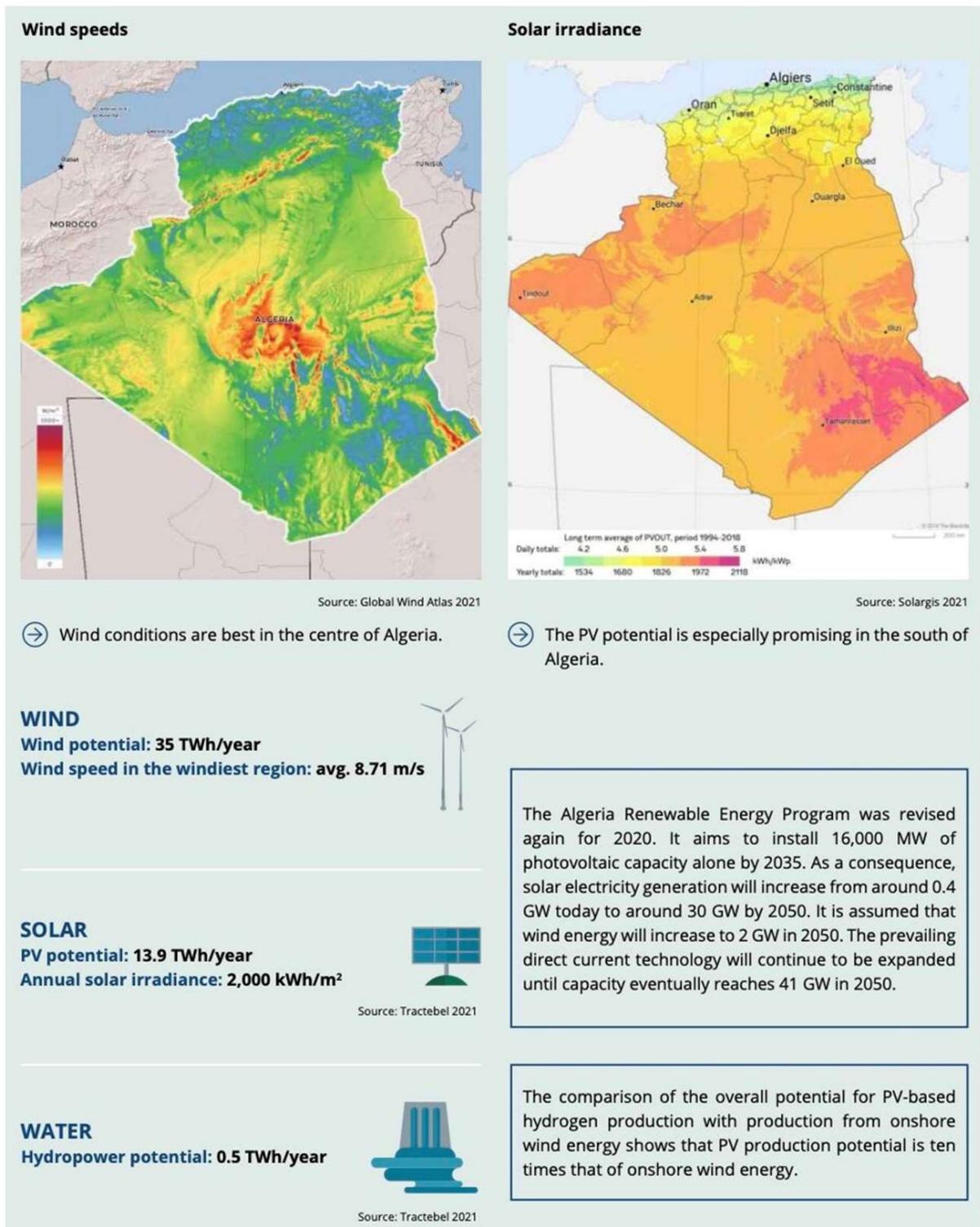
O estudo apresenta vantagens comparativas do potencial de energias renováveis como eólica (velocidade dos ventos m/s), solar (radiação média anual kWh/m<sup>2</sup>), custo de produção de hidrogênio (LCOH) além de uma análise quanto ao potencial de demanda interna e *know-how* nas atividades que orbitam a economia do hidrogênio.

Os países indicados para produzir hidrogênio verde são Argélia, Brasil, Chile, Marrocos, México, África do Sul e Tunísia. É interessante perceber como esses estudos refletem bem o retrato de um momento da dinâmica da geopolítica do hidrogênio. Os cenários mudam com grande velocidade em função da consolidação do *roadmap* da estratégia e desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio, assim como a entrada de novos atores.

Os *roadmaps* de cadeia de valor são roteiros ou planejamentos em que os Estados definem sua estratégia de curto, médio e longo prazo para a exploração do hidrogênio, levando em consideração principalmente a regulamentação, vantagens comparativas para a exploração dos recursos, o *timing* de oportunidades e políticas públicas necessárias.

A competitividade da produção de hidrogênio dependerá do potencial dos recursos energéticos renováveis de cada país, o domínio sobre a cadeia de produção que abrangem a capacidade de geração de energia renovável incluindo T&D (Transmission and Distribution), do processo de produção de hidrogênio (tecnologias de eletrólise alcalina, PEM, etc.) E seus derivados como amônia e metanol, armazenamento, logística e políticas públicas que fomentem o seu desenvolvimento.

Figura 19 - Atlas de recursos energéticos renováveis na Argélia



Fonte: TRACTEBEL (2021).

### 8.1.3 Roadmap do mercado de hidrogênio verde no Uruguai

Em julho de 2022, o Ministério da Indústria, Energia e Mineração do Uruguai emitiu o *Roadmap* para o hidrogênio verde.

O Uruguai possui algumas similaridades com o mercado brasileiro, como uma matriz elétrica com grande participação de renováveis, tendo como fontes principais hidrelétricas (44%), eólica (32%), biomassa (18%) e um mercado de energia solar em desenvolvimento, sendo esse último com pequena participação na matriz tal qual o Brasil (3%). Outros fatores de similaridade são a disponibilidade abundante de água doce, possibilidade de escoamento do hidrogênio pelo Atlântico e cooperação com o porto de Roterdã.

O país pretende alcançar o LCOH (*Levelised Cost of Hydrogen*) entre 1.2 e 1.4 USD/kgH<sub>2</sub> até 2030, se posicionando de maneira competitiva com Brasil, Chile, Arábia Saudita e Austrália como grande produtor e exportador.

Alguns dos pontos-chave do material:

1) O Uruguai considerou o desenvolvimento do mercado de H<sub>2</sub>V em 3 fases, sendo a primeira fase (2022-2026) para a criação do arcabouço regulatório, projetos-pilotos e ações para atração de investidores para os primeiros projetos em escala de exportação.

Para a fase 1 o Uruguai espera ter 50 MW em pequenas plantas de H<sub>2</sub> e 100 a 300 MW em desenvolvimento *Greenfield*;

2) Para as fases 2 (2026-2030) e 3 (a partir de 2030) considera a consolidação do seu papel como exportador e o desenvolvimento de um mercado nacional de H<sub>2</sub>V para a produção de amônia verde (*haber-bosch*) e a produção de combustíveis sintéticos (*fischer-tropsch*);

3) Previsão do crescimento gradual da capacidade instalada de H<sub>2</sub>V até alcançar 10 GW na fase 3;

4) Cronograma de metas para inserção do H<sub>2</sub>V no mercado nacional e de exportação com definição de marcos para projetos-pilotos, substituição de importações (NH<sub>3</sub> para fertilizantes) e renovação das frotas de caminhões a diesel;

5) Projeção de aumento de 2 pontos percentuais no PIB do país em função do volume de negócios que orbitam o H<sub>2</sub>V até 2040;

6) Criação de 34 mil empregos qualificados entre técnicos, engenheiros e operadores de plantas de H<sub>2</sub>V até 2040;

7) Redução de emissões de 7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anuais em 2040.

O *Roadmap* esteve disponível até agosto de 2022 para análise crítica e contribuições.

Figura 20 - Roadmap de H2V no Uruguai



Fonte: FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION (BMWK) (2022).

#### **8.1.4 Cooperação Arábia Saudita e Alemanha para a produção de hidrogênio**

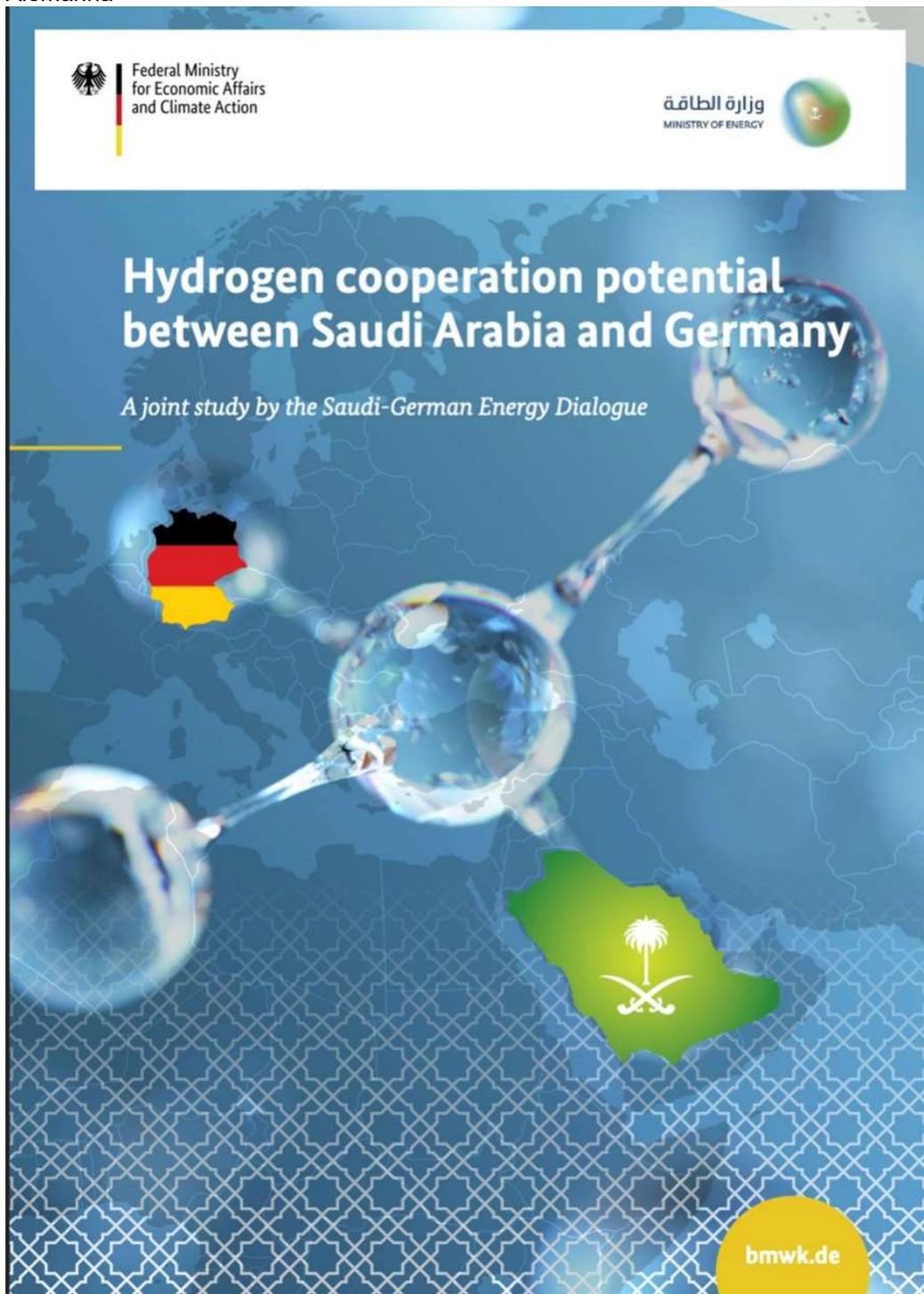
Em 11 de março de 2021, o ministro de energia da Arábia Saudita, Abdulaziz Bin Salman Al Saud, e Peter Altmaier, o então ministro alemão de assuntos econômicos e energia, assinaram um memorando de entendimento (MOU) para promover a cooperação bilateral na produção, processamento, aplicação e transporte de hidrogênio renovável e de baixo carbono.

O memorando de entendimento foi assinado no contexto do diálogo alemão de energia saudita e destaca o compromisso de ambos os países em alcançar as metas do Acordo de Paris, promovendo o hidrogênio limpo como parte da transição energética.

Em julho de 2022 foi apresentado o estudo *Hydrogen Cooperation Potential Between Saudi Arabia and Germany*. O estudo apresenta as vantagens relativas para a produção de hidrogênio na Arábia Saudita tendo como parceiro tecnológico e potencial mercado importador a Alemanha (GERMAN FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION, 2022).

O estudo também explora a cadeia de valor do hidrogênio na Arábia Saudita, ressaltando inclusive a demanda interna para a fabricação de amônia para fertilizantes e o hidrogênio para o refino de petróleo.

Figura 21 - Estudo de cooperação para a exploração do potencial do H2V entre Arábia Saudita e Alemanha



Fonte: FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION (BMWK) (2022).

### 8.1.5 Cooperação entre Brasil e Alemanha para a produção de hidrogênio

Em outubro de 2021, a aliança Brasil-Alemanha lançou o mapeamento do setor de hidrogênio brasileiro apresentando o panorama naquele momento o mapeamento dos potenciais para a inserção do Brasil no mercado global de hidrogênio.

O Brasil possui alguns projetos de HUBS de hidrogênio no porto de Açu no Rio de Janeiro, Sauípe em Pernambuco e Pecém no Ceará. Grandes empresas mundiais com *know-how* no mercado de hidrogênio já atuam no Brasil e atualmente o país conta com o trabalho institucional da Associação Brasileira de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Hidrogênio (ABH2) e vários grupos de trabalho voltados para o desenvolvimento desse setor no Instituto Nacional de Energia Limpa (INEL), Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA), Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD) e na Câmara de Comércio Brasil-Alemanha (AHK-RIO).

Atualmente o Brasil ainda não possui uma regulamentação para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio, assim como os *roadmaps* de cadeia de valor ainda são desenvolvidos de forma descentralizada pelos estados. No momento da elaboração deste trabalho, o Brasil possui dois projetos de Lei para a regulamentação do hidrogênio, sendo o primeiro o PL 725/2022 do senador Jean Paul Prates (PT-RN) que visa incluir o hidrogênio no setor energético nacional e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável (MATTOS FILHO, 2022) e o PL 1.878/2022 da Comissão de Meio Ambiente do Senado para a regulamentação da produção e usos para fins energéticos do hidrogênio verde.

Em agosto de 2021, foi lançado o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) que trouxe um diagnóstico de riscos e oportunidades para o mercado de hidrogênio, explorando seis eixos de atuação: fortalecimento das bases tecnológicas, capacitação e recursos humanos, planejamento energético, arcabouço regulatório, crescimento do mercado e competitividade e cooperação internacional. Em setembro de 2022 o Ministério de Minas e Energia (MME) está criando um grupo de trabalho e uma consulta pública que visa consolidar o PNH2 até dezembro de 2022.

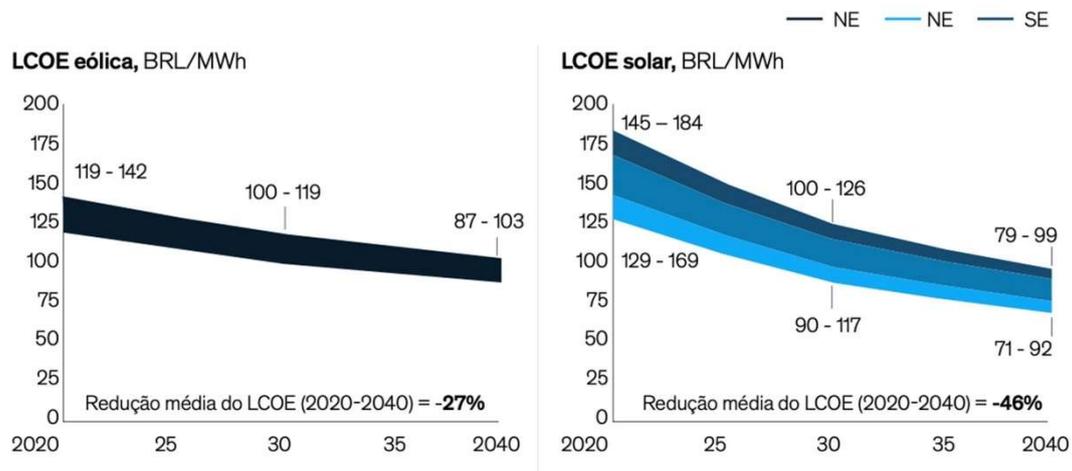
De acordo com a análise de competitividade para produção de hidrogênio elaborado pelo McKinsey (2021), o país tem grande potencial de tornar um dos mercados mais competitivos para a produção e exportação do hidrogênio verde,

considerando o potencial para geração de energias renováveis como eólica e solar, portos com infraestrutura para a exportação do hidrogênio além de vantagem relativa quanto a distância em milhas marítimas visando o mercado europeu se comparado a outros países com estratégias voltadas para a exportação de hidrogênio como o Chile e a Austrália (MCKINSEY, 2021).

O estudo projeta um LCOE (*Levelized Cost Of Energy*) eólico entre R\$87 a R\$103/MWh em 2040 e LCOE solar entre R\$71 e R\$ 99/MWh para o mesmo período.

Gráfico 11 - Competitividade para a produção de H<sub>2</sub>V no Brasil

**Previsão de LCOE de Solar e Eólica em grande escala no Brasil**

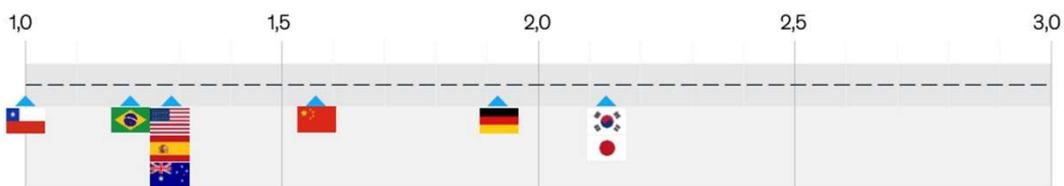


Fonte: linha de serviço de hidrogênio da McKinsey

Quadro 4

**O Brasil está entre os players globais mais competitivos de exportação de H<sub>2</sub> verde**

Benchmark de LCOH, 2030 USD/kg de H<sub>2</sub>



Fonte: linha de serviço de hidrogênio da McKinsey

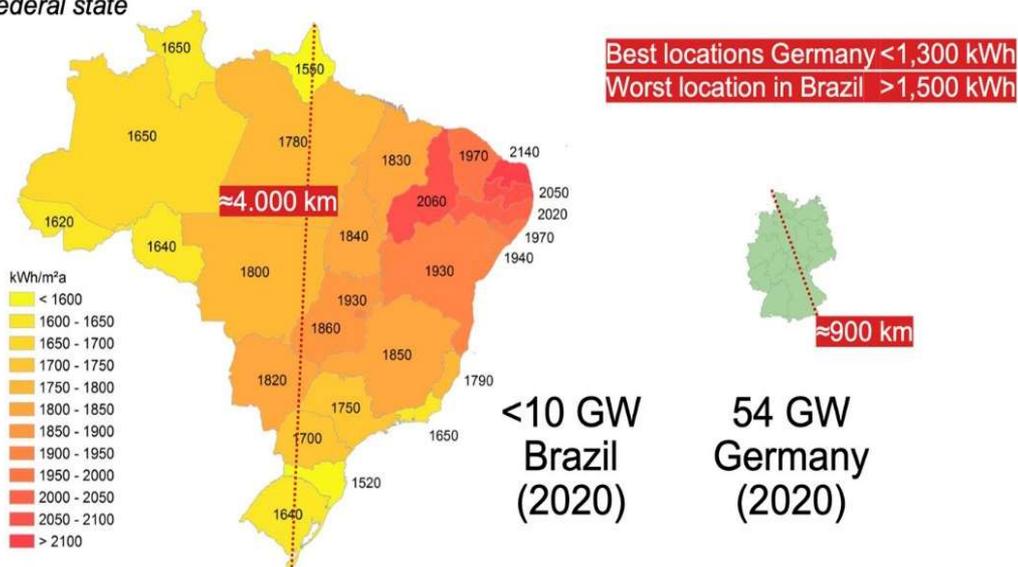
Análise de Competitividade para a Produção de Hidrogênio Verde no Brasil - McKinsey 2021

Fonte: MCKINSEY (2021).

Infográfico 9 - Área necessária para a produção e exportação de H2V no Brasil

## Solar radiation

per federal state



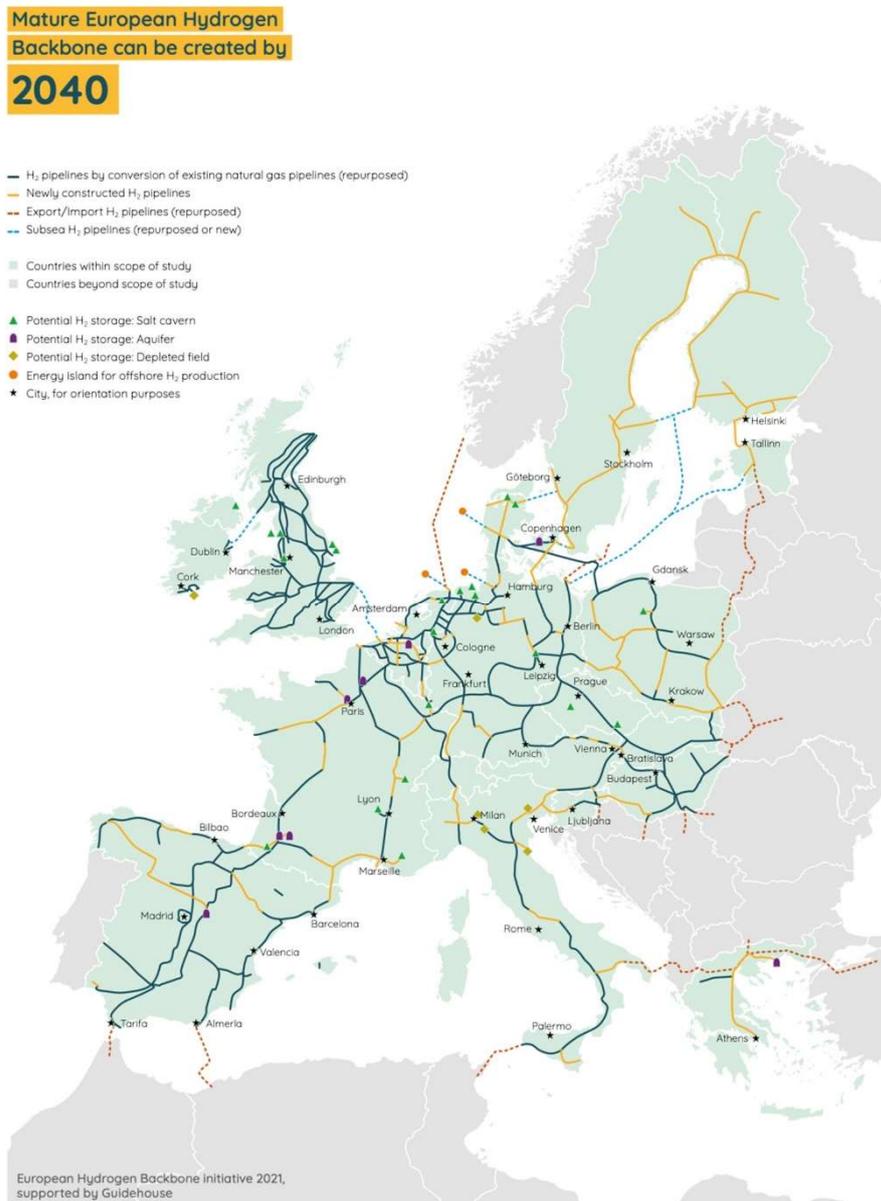
Fonte: BAVARIAN MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS REGIONAL DEVELOPMENT AND ENERGY (2022).

### 8.1.6 Projeto European Hydrogen Backbone

Em seu *Road Map* para o hidrogênio, a Europa estabeleceu a necessidade de no mínimo 24 bilhões de euros para ampliar a produção industrial de eletrólise, 220 bilhões para ampliar a capacidade de produção de energia solar e eólica para garantir a produção de hidrogênio verde e 65 bilhões no transporte, distribuição, armazenamento e postos de reabastecimento de hidrogênio até 2050 (GOÉS, 2021).

Com o intuito de garantir a segurança energética da Europa, o projeto de integração de infraestrutura para o transporte de hidrogênio poderá atingir 39.700 km de extensão até 2040, integrando 21 países. No estudo de 2021 *Extending the European Hydrogen Backbone* elaborado pela *Guidehouse* são apresentados a evolução gradual de expansão da malha até 2040 além identificar a redes existentes de gás natural que poderiam ser convertidas para o hidrogênio e hubs para o armazenamento de hidrogênio (EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE, 2021).

Figura 22 - Mapa para o armazenamento e integração de redes de transportes de H2 na Europa em 2040 (European Hydrogen Backbone)



Fonte: EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE (2021).

### 8.1.7 Programa alemão H2 global

Com o objetivo de viabilizar uma demanda de até 110 TWh de hidrogênio verde até 2030, o país lidera os movimentos para a consolidação desse mercado ao nível global. A Alemanha estruturou um mecanismo de fomento, a fundação H2global composta por mais de 20 empresas do setor energético e industrial.

O H2global, através da sua empresa *Hydrogen Intermediary Company* (hint.co), celebrará contratos de compra de longo prazo (*Hydrogen Purchase Agreement* - HPA) de 10 anos para hidrogênio e derivados como amônia verde e e-metanol através de leilões regulados.

O governo alemão realizou um aporte de EUR 900 milhões para compensar a diferença entre os preços de oferta e os preços de demanda dos contratos vencedores mediante mecanismo de *Contracts For Difference* (CfD). Os primeiros leilões acontecerão em 2022 com entregas a partir de 2024.

Para qualificação dos projetos será necessário a certificação do hidrogênio gerado, garantindo parâmetros de qualidade e de lastro com a geração de energia renovável, proximidade entre a geração de energia e as plantas de produção de hidrogênio (máximo de 50 km com exceção de países com sistemas de conexão elétrica interligados como é o caso do Brasil), sincronicidade entre a produção de energia e a planta de eletrólise além da adicionalidade, ou seja, as plantas de produção de energia renovável podem ter no máximo 36 meses de operação antes do *Commercial Operation Date* (COD) da planta de hidrogênio (H2 GLOBAL, 2022).

Infográfico 10 - Estrutura operacional H2global para o leilão de H2V na Alemanha



Procedimento de Leilão para compra de hidrogênio verde pela Alemanha - Programa H2Global

Fonte: H2 GLOBAL (2022).

## CONCLUSÃO

A transição energética global será fundamental para limitarmos o aquecimento global em 1,5 °C. Essa transição considera maior inserção de energias renováveis para a descarbonização da forma como garantimos nosso modo de subsistência, produção industrial e bem-estar, dessa forma, haverá grande movimentação nas dinâmicas do mercado de energia para as próximas décadas em função das necessidades de importação de tecnologias para a produção de energia limpa, o impacto do mercado de carbono nas cadeias produtivas, a exploração de matérias-primas, principalmente para os sistemas de armazenamento em baterias para veículos elétricos e infraestrutura de suporte para as fontes renováveis intermitentes como a energia solar e a eólica.

No caso do mercado europeu, a aceleração da transição energética se dá em função da segurança energética e autonomia do gás natural russo e o hidrogênio verde tornou-se a melhor opção como um gás com alta densidade energética e de baixa pegada de carbono. Verificamos que existem vários projetos operacionais de hidrogênio, assim como tecnologias consolidadas e outras em fase de desenvolvimento, mas que todas elas apresentam um horizonte promissor de redução de custos no médio e longo prazo a partir do ganho de escala na produção industrial de eletrolisadores e do fomento de políticas públicas.

A Alemanha se tornou o país protagonista no fomento ao desenvolvimento das tecnologias para a produção do hidrogênio de baixo carbono, assim como, teve o mesmo papel para o desenvolvimento dos mercados de energia renovável. As políticas internas para a criação de um mercado de hidrogênio, assim com o incentivo a projetos de pesquisa e inovação e desenvolvimento industrial, tem sido referência para o *Roadmap* de todos os países que estão estruturando suas estratégias para o hidrogênio verde.

No contexto da geopolítica energética, em função das limitações de produção de energia renovável como solar e eólica em escala, a Alemanha adota uma política internacional para a cooperação com os mercados promissores que, ao mesmo tempo são voltados para a exportação do gás, também são parceiros para a aplicação de tecnologia alemã para a produção de energia renovável e produção de hidrogênio, principalmente no que se refere as fabricantes de eletrolisadores.

O *KFW Bankengrupp*, banco de fomento alemão, tem fomentado projetos de produção de hidrogênio em diversos países, assim como o apoio técnico e institucional na consolidação das estratégias voltadas para a produção de hidrogênio para exportação. O programa alemão H2global também terá papel fundamental como mecanismo de transação de hidrogênio e derivados como e-metanol e amônia verde com subsídios do governo alemão.

O programa alemão H2global terá o papel fundamental de ser uma referência para o mercado de hidrogênio europeu. A segurança energética se dará através de um mecanismo de qualificação do hidrogênio produzido nos diversos países e, ao mesmo tempo cria um ciclo sustentável de adicionalidade de energia renovável, também diversifica os provedores do gás através de países com matrizes energéticas distintas e complementares com o Brasil, Austrália, países africanos e do oriente médio. Com a consolidação do projeto *Hydrogen Backbone* em 2040, a Europa terá uma malha de redes para o transporte, armazenamento e compartilhamento de hidrogênio, aumentando consideravelmente a sua autonomia energética e descarbonização.

O objetivo deste trabalho foi identificar e analisar as questões relacionadas à transição energética através do hidrogênio verde, com foco na Europa e especialmente na Alemanha, partindo do ponto de vista da geopolítica e geoestratégia energética alemã. O mercado de hidrogênio verde está no seu início e espero que esse estudo seja útil como um ponto de partida para análises futuras de rota tecnológica, *Roadmap* da cadeia de valor e estratégias técnicas, políticas, econômicas e regulatórias para a geopolítica energética e o mercado de energia.

## REFERÊNCIAS

AMELANG, Sören. Renewables cover about 100% of German power use for first time ever. **Clean Energy Wire – CLEW**, 05 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org/news/renewables-cover-about-100-german-power-use-first-time-ever>> Acesso em: 1 out. 2021.

ARCELORMITTAL. **Hydrogen-based steelmaking to begin in Hamburg**. Disponível em: <<https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

AQUAVENTUS. Disponível em: <<https://aquaventus.org/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

APPUNN, Kerstine.; HAAS, Yannick.; WETTENGEL, Julian. Germany's energy consumption and power mix in charts. **Clean Energy Wire – CLEW**, 03 ago. 2022 Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>> Acesso em: 1 jul. 2022.

BASU, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 3. ed. Canada: **Academic Press**, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780128129920/biomass-gasification-pyrolysis-and-torrefaction>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

BATAGLIOTTI, J. ABC do Hidrogênio Verde. **Revista Brasil Alemanha**, São Paulo: Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha de São Paulo, ano 29, p. 19-20, 1 out. 2021.

BOSTON METAL. **Transforming Metal Production**. Disponível em: <<https://www.bostonmetal.com/transforming-metal-production/>>. Acesso em: 21 maio. 2022.

BOUSSIDAN, N.; SANDSTROM, J.; STARK, M. Action on clean hydrogen is needed to deliver net-zero by 2050. Here's how. *In*: World Economic Forum. **Weforum.org**. Davos, 23 mai. 2022. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2022/05/action-clean-hydrogen-net-zero-2050/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

CARMONA, R. G. **Geopolítica & Energia**. Rio de Janeiro: Synergia, 2020.

CASTRO, N. D. Transição Energética. **GESEL**: Grupo de Estudos do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, 2 jan. 2019 Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/artigo-gesel-transicao-energetica/>. Acesso em: 20 nov. 2021.

CASTRO, N. D.; BRANDÃO, R.; SANTOS, V. Guerra da Ucrânia e os novos desenhos do mercado elétrico. **GESEL**: Grupo de Estudos do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, 8 set. 2022 Disponível em: <[https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/10/TDSE-109\\_Europa-Crise-energetica-e-aco-es-de-mitigacao.pdf](https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/10/TDSE-109_Europa-Crise-energetica-e-aco-es-de-mitigacao.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2022.

Clean powers is shaking up the global geopolitics of energy. **The Economist**, 15 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.economist.com/special-report/2018/03/15/clean-power-is-shaking-up-the-global-geopolitics-of-energy>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

CNI. **Hidrogênio Sustentável** (Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade - GEMAS, Ed.). **Portal da Indústria**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2022/8/hidrogenio-sustentavel-perspectivas-e-potencial-para-industria-brasileira/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

Colombia maps first offshore wind tender: Government plans to award temporary occupation permits off Bolivar and Atlántico in 2023. **ReNews.BIZ**, 8 ago. 2022. Disponível em: <<https://renews.biz/79679/colombia-maps-first-offshore-wind-tender/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ECONOMICS OF ENERGY INNOVATION SYSTEMS TRANSITIONS (EEIST) Ten Principles for Policy Making in the Energy Transition. **Lessons form Experience**, Reino Unido, p. 12-13, set. 2022 Disponível em: <<https://eeist.co.uk/wp-content/uploads/EEIST-Project-Summary-in-Portuguese-Aug-212.pdf>> Acesso em: 20 set. 2022.

ELECTRIC HYDROGEN. **Engineering the end of fossil fuel dependency**. Disponível em: <<https://eh2.com/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

EMERGING TECHNOLOGIES NEWS (ETN). DEWA, Siemens Energy commissions Middle East's first solar-powered green hydrogen project. **BUZZ**, 21 mai. 2022.

EUROPEAN HYDROGEN BACKBONE. The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative. [s.l.] **Guidehouse**, abr. 2021. Disponível em: <<https://ehb.eu/>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. EUROPEAN PARLIAMENT. REPowerEU Plan 18 de maio de 2022. **An official website of the European Union**. Ano 2022. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>>. Acesso em: 20 jul. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Large-scale calls**. Disponível em: <[https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund/large-scale-calls\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund/large-scale-calls_en)>. Acesso em: 15 jun. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe**. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en)>. Acesso em: 15 jun. 2022.

EWE. **HyCAV mobil research project – hydrogen storage**. Disponível em: <<https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/storing-hydrogen>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION (BMWK). **Hydrogen cooperation potential between Saudi Arabia and Germany**: A joint study by the Saudi-German Energy Dialogue. Disponível em: <[https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/J/joint-study-saudi-german-energy-dialogue.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/J/joint-study-saudi-german-energy-dialogue.pdf?__blob=publicationFile&v=4)>. Acesso em: 25 set. 2022.

FORTESCUE FUTURE INDUSTRIES (FFI). **Green Hydrogen Task Force - White Paper And 10 Point Action Plan**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ffi.com.au/wp-content/uploads/2022/07/Report.pdf>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

FUKUSHIMA HYDROGEN ENERGY RESEARCH FIELD (FH2R). **New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)**. Disponível em: <<https://www.bdi.fr/wp-content/uploads/2020/03/Fukushima-Hydrogen-Energy-Research-FieldFH2R.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2022.

GATES, B. **Como Evitar um Desastre Climático**: as soluções que temos e as inovações necessárias. Companhia das Letras, 1 ed, 2021.

GERMAN FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION. **Hydrogen cooperation potential between Saudi Arabia and Germany**. European and International Energy Policy: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/J/joint-study-saudi-german-energy-dialogue.html>>. Acesso em: 5 set. 2022.

GERMANY'S POWER MIX 2020 – DATA, CHARTS & KEY FINDINGS. **Strom-Report Zahlen**. Daten. Fakten. Disponível em: <<https://strom-report.de/germany-power-generation-2020/>> Acesso em:

GÓES, G. S. **A Geopolítica da Energia no Século XXI**. Rio de Janeiro: Synergia, 2021. p. 40-41.

GREEN HYDROGEN SOLUTIONS. **Production Solutions**. Disponível em: <<https://greenh2s.com/what-we-do-1>>. Acesso em: 15 set. 2022.

H2 GLOBAL STIFTUNG. **The H2Global Mechanism**. Disponível em: <<https://www.h2global-stiftung.com/project/h2g-mechanism>>. Acesso em: 20 set. 2022.

H2 GREEN STEEL. **H2 Green Steel and Iberdrola announce €2.3 billion Green hydrogen venture**. Disponível em: <<https://www.h2greensteel.com/latestnews/h2-green-steel-and-iberdrola-announce-23-billion-green-hydrogen-venture>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

H2 MOBILITY. **Filling up with H2**. Disponível em: <<https://h2.live>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

HIF GLOBAL. **Haru Oni Demonstration Plant**. Disponível em: <<https://www.hifglobal.com/haru-oni>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

HINICIO. Estado del hidrógeno verde en América Latina y el Caribe. [s.l.] **H2 LAC**, ago. 2022. Disponível em: <<https://h2lac.org/publicaciones/infografia-sobre-el-estado-del-hidrogeno-verde-en-america-latina-y-el-caribe/>>. Acesso em: 1 set. 2022.

IBERDROLA. **Como É Obtido O Hidrogênio Verde?** Disponível em: <[https://www.iberdrola.com/documents/20125/42229/Infografico\\_Hidrogenio\\_Verde.pdf/faf929a2-5626-c5be-a9eb-0a8399c4e725?t=1630993086922](https://www.iberdrola.com/documents/20125/42229/Infografico_Hidrogenio_Verde.pdf/faf929a2-5626-c5be-a9eb-0a8399c4e725?t=1630993086922)>. Acesso em: 15 jun. 2022.

IBERDROLA. **Iberdrola comissiona a maior usina de hidrogênio verde para uso industrial da Europa.** Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/linhas-negocio/projetos-emblematicos/usina-hidrogenio-verde-puertollano>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

Innovation Fund: EU invests €1.8 billion in clean tech projects\*. **European Commission**, 12 jul. 2022. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_22\\_4402](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_4402)>. Acesso em: 1 set. 2022.

ITM POWER. **REFHYNE At the forefront of efforts to supply clean refinery hydrogen for Europe.** Disponível em: <<https://itm-power.com/projects/refhyne>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

HYDROGEN EUROPE. **Steel from Solar Energy A Techno-Economic Assessment of Green Steel Manufacturing.** Disponível em:<<https://pr.euractiv.com/pr/steel-solar-energy-techno-economic-assessment-green-steel-manufacturing-233199#:~:text=The%20%E2%80%9CSteel%20from%20Solar%20Energy,from%20renewable%20energy%20is%20possible.>>>. Acesso em: 11 jun. 2022.

Hydrogen – data telling a story. **Global Energy Infrastructure**, 30 mar. 2021. Disponível em: <<https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

HydrogenOne Capital Growth plc invests £8.4m (EUR 10m) in Netherlands-based hydrogen pipeline company Strohm. **Strohm**, 12 Ago 2022. Disponível em:<<https://strohm.eu/news/hydrogenone-capital-growth-plc-invests-84m-eur-10m-in-netherlands-based-hydrogen-pipeline-company-strohm>>. Acesso em: 1 set. 2022.

KNAUBER, S. AquaSector: Study investigates potential for first large-scale offshore hydrogen park in the German North Sea: RWE, Shell, Gasunie and Equinor signed declaration of intent. **RWE**, 23 jul. 2021. Disponível em:<<https://www.rwe.com/en/press/rwe-renewables/2021-07-23-aquasector-partnership-on-first-large-scale-offshore-park-for-green-hydrogen-in-germany>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

KNIGHT, B. The history of Nord Stream. **Deutsche Welle**, 23 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.dw.com/en/the-history-of-nord-stream/a-58618313>> Acesso em: 15 jun. 2022.

LAHOUD, G. Una Aproximación Teórica a La Soberanía Energética e Integración Regional Sudamericana, Buenos Aires: **Instituto de Investigación en Ciencias Sociales** (IDICSO) de la Universidad del Salvador, p.7, 2005.

LONDON STOCK EXCHANGE. **HydrogenOne Capital Growth plc invests £8.4m (EUR 10m) in Netherlands-based hydrogen pipeline company Strohm.**

Disponível em: <<https://www.londonstockexchange.com/news-article/HGEN/ps8-4m-investment-in-strohm-holding-b-v/15582384>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

MCKINSEY & COMPANY. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

NEW ENERGY AND INDUSTRIAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT ORGANIZATION. The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima. **NEDO**, 7 mar. 2020.

OLIVEIRA, L. K. D. Energia como Recurso de Poder na Política Internacional: Geopolítica, Estratégia e o Papel do Centro de Decisão Energética. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência Política, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/76222#:~:text=Considera%2Dse%20que%20a%20Energia,de%20um%20Estado.%20....> >. Acesso em: 20 set. 2022.

OOMMEN, A. How the five phases of the MBR Solar Park are aiding Dubai's push towards 100 percent clean energy. **ARABIAN BUSINESS**, 5 Mai. 2022. Disponível em: <<https://www.arabianbusiness.com/industries/energy/how-the-five-phases-of-the-mbr-solar-park-are-aiding-dubais-push-towards-100-percent-clean-energy>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

PEIXOTO, Adriana. A Alemanha suspendeu o gasoduto Nord Stream 2. Qual o impacto na Europa e na Rússia? **ZAP.AEIYOU**, 23 fev. 2022. Disponível em: <<https://zap.aeiou.pt/alemanha-suspendeu-nord-stream-2-464021>>. Acesso em: 17 mai. 2022.

PTX HUB; SCHEYL, J. H. **Delegated Acts on Art. 27 and 28 explained: How they will shape the PtX market ramp upInternational PtX Hub.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ptx-hub.org/delegated-acts-on-art-27-and-28-explained/>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

Hydrogen in Rotterdam. [s.l.: s.n.]. **Port of Rotterdam**. Disponível em: <<https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition/ongoing-projects/hydrogen-rotterdam>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

H2 Business Guide: Algeria, Brazil, Chile, Morocco, Mexico, South Africa, and Tunisia. **PTX HUB**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, fev. 2022. Disponível em: <<https://ptx-hub.org/h2-business-guide/>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

KNIGHT, B. The history of Nord Stream. **Deutsche Welle**, Acesso em: 15 jun. 2022.

MACHADO, N. Geração distribuída alcança 12 GW no Brasil: Minas Gerais lidera o ranking dos estados, com quase 2 GW de potência instalada. **EPBR**, 5 ago. 2022.

Disponível em: <https://epbr.com.br/geracao-distribuida-alcanca-12-gw-no-brasil/>. Acesso em: 25 set. 2022.

Revista BrasilAlemanha. **Especial Hidrogênio Verde** - Sonderausgabe: Grüner Wasserstoff. a.29, n.1, outubro 2021.

ROLAND BERGER. **Hydrogen transportation is key to unlocking the clean hydrogen economy** (Roland Berger Gmbh, Ed.) **Roland Berger**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Transporting-the-fuel-of-the-future.html>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

RYZE HYDROGEN. **Unlocking The Uk's Hydrogen Economy**. Disponível em: <<https://ryzehydrogen.com/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

RWE RENEWABLES GMBH. **AquaSector: Study investigates potential for first large-scale offshore hydrogen park in the German North Sea**. Disponível em: <<https://www.rwe.com/en/press/rwe-renewables/2021-07-23-aquasector-partnership-on-first-large-scale-offshore-park-for-green-hydrogen-in-germany>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

SECRETARY OF STATE FOR BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY. HM Government United Kingdom. UK Hydrogen Strategy **Policy Paper**. ano 2021, n. CP 475, 17 ago. 2021. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/uk-hydrogen-strategy>>. Acesso em: 22 ago. 2022.

SCHEYL, Jan-Hendrik. Delegated Acts on Art. 27 and 28 explained: How they will shape the PtX market ramp up. **International PtX Hub**, [s/d]. Disponível em: <<https://ptx-hub.org/delegated-acts-on-art-27-and-28-explained/>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

SULLIVAN, Mzi; SANDALOW, D. The Geopolitics of Renewable Energy: Faculty - Research Working Paper Series. Working Paper. **HARVARD Kennedy School**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Indra-Overland/publication/317954274\\_The\\_Geopolitics\\_of\\_Renewable\\_Energy/links/5953523a458515a207016054/The-Geopolitics-of-Renewable-Energy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Indra-Overland/publication/317954274_The_Geopolitics_of_Renewable_Energy/links/5953523a458515a207016054/The-Geopolitics-of-Renewable-Energy.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2022.

THE FEDERAL GOVERNMENT. **The National Hydrogen Strategy**. Disponível em: <[www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)>. Acesso em: 1 jul. 2022.

THE FEDERAL GOVERNMENT. **Report of the Federal Government on the Implementation of the National Hydrogen Strategy**. Disponível em: <[www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)>. Acesso em: 1 jul. 2022.

THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. Falling Like Dominoes: The Impact of Nord Stream on Russian Gas flows in Europe. **Energy Insight**, United Kingdom, v. 120, ago. 2022 Disponível em: <https://a9w7k6q9.stackpathcdn.com/wpcms/wp-content/uploads/2022/08/Insight-120-The-Impact-of-Nord-Stream-on-Russian-Gas-flows-in-Europe.pdf>. Acesso em: 2 out. 2022.

URUGUAY GREEN HYDROGEN COUNTRY STRATEGY; MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGIA Y MINERÍA. **Green Hydrogen Roadmap in Uruguay**, 19 jul.

2022. Disponível em: <<https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/green-hydrogen-roadmap-in-uruguay>>. Acesso em: 25 jul. 2022.

**VERSOGEN. Introducing a revolutionary new class of electrolyzer to produce low-cost green hydrogen.** Disponível em: <<https://www.versogen.com/new-aem-electrolyzer-produces-low-cost-green-hydrogen/>>. Acesso em: 20 set. 2022.

**WORLD ENERGY COUNCIL. Regional Insights Into Low-Carbon Hydrogen Scale Up.** United Kingdom: PwC, abr. 2022. Disponível em: <<https://www.worldenergy.org/publications/entry/regional-insights-low-carbon-hydrogen-scale-up-world-energy-council>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

**IRENA. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5° C Climate Goal: Part I - Trade Outlook for 2050 and way forward.** Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. Disponível em: <[www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)>. Acesso em: 1 ago. 2022.

**MATTOS FILHO. PL para inclusão do hidrogênio como fonte de energia é apresentado no Senado.** 2022. Disponível em: <<https://www.mattosfilho.com.br/unico/hidrogenio-matriz-energetica/>>. Acesso em: 24 nov. 2022.