



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DE ROSANA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANA CAROLINE FERNANDES BORGES

Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética

Rosana - SP

2022

ANA CAROLINE FERNANDES BORGES

Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Kleber Rocha de Oliveira

Rosana - SP
2022

B732h Borges, Ana Caroline Fernandes

Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética / Ana Caroline Fernandes Borges. -- Rosana, 2022

66 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientador: Kleber Rocha de Oliveira

1. Hidrogênio verde. 2. Matriz energética. 3. Descarbonização. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Dedico este trabalho à minha família, em especial
à minha mãe, que sempre me apoiou e fez o melhor
por mim.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por tudo que me deste.

À minha mãe Rosana, por toda dedicação, amor e compreensão. Aos meus irmãos, Ana Clara e Arthur, amo vocês.

À minha vó Ana Rosa, por todo carinho e confiança em mim, até quando eu mesma não acreditei.

A toda minha família, pai, avós (ôs), tias (os) e primos, obrigada por todo cuidado, carinho e por acreditarem no meu potencial.

Ao corpo docente da Unesp Rosana, em especial ao meu orientador Kleber Rocha de Oliveira. Obrigada por toda dedicação e ensinamentos.

Às amigas que conheci durante a graduação, Tiffany Rodrigues, Dayara Basso, Júlia Vilava, obrigada por todos os momentos e conversas que compartilhamos, vocês são incríveis! Guilherme Lopes e Luis Henrique, obrigada por estarem ao meu lado durante essa trajetória.

À minha amiga Raphaela Oliveira, obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos.

Às amigas que conheci durante o estágio, Thailise e Mariana, obrigada por todo companheirismo. Ygor Patrick, obrigada por todo carinho e incentivo.

“Você nunca alcança o sucesso verdadeiro a menos
que você goste do que está fazendo.”

Dale Carnegie

Resumo

No cenário atual, a matriz energética global é composta principalmente por combustíveis fósseis, como o gás natural, carvão mineral, petróleo e seus derivados, sendo os principais emissores de gases poluentes, entre eles, o gás carbônico (CO₂), principal gás de efeito estufa. É tendência mundial o incentivo à descarbonização e transição energética, neste contexto, o hidrogênio verde é uma alternativa viável e sustentável, pois a sua produção e combustão é isenta de emissão de CO₂, além disso, o hidrogênio é caracterizado por ser o combustível de maior densidade energética por massa (141,6 MJ.kg⁻¹). Apesar dessas significativas características, alguns pontos vinculados à produção e estocagem do gás hidrogênio em larga escala, devem ser otimizados a fim de tornar o combustível competitivo no mercado global. Este trabalho discute o processo de produção do hidrogênio verde mediante eletrólise, as fontes renováveis de energia utilizadas, como a energia eólica, solar e hidráulica, os processos de armazenamento em estado sólido, líquido e gasoso, e o transporte adequado para cada situação e estado físico do combustível, assim como as aplicações do combustível, cenário atual, incluindo os projetos de usinas em andamento e perspectivas para expansão e estabilidade do hidrogênio verde como “vetor energético” do futuro.

Palavras-chave: Hidrogênio verde. Matriz energética. Descarbonização. Emissão de CO₂.

Abstract

In the current scenario, the global energy matrix is mainly composed of fossil fuels, such as natural gas, mineral coal, oil and its derivatives, being the main emitters of polluting gases, including carbon dioxide (CO₂), the main greenhouse gas. It is a worldwide trend to encourage decarbonization and energy transition, in this context, green hydrogen is a viable and sustainable alternative, as its production and combustion is free of CO₂ emissions, in addition, hydrogen is characterized by being the fuel with the highest energy density per mass (141.6 MJ.kg⁻¹). Despite these significant characteristics, some points linked to the production and storage of hydrogen gas on a large scale must be optimized in order to make the fuel competitive in the global market. This paper discusses the green hydrogen production process through electrolysis, the renewable energy sources used, such as wind, solar and hydraulic energy, the storage processes in solid, liquid and gaseous states, and the appropriate transport for each situation and state physique of the fuel, as well as fuel applications, current scenario, including power plant projects in progress and perspectives for the expansion and stability of green hydrogen as the “energy vector” of the future.

Keywords: Green hydrogen. Energy matrix. Decarbonization. CO₂ emission.

Lista de ilustrações

Figuras

Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2019	13
Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2021	14
Figura 3 – Esquema de representação da eletrólise da água	19
Figura 4 – Configuração esquemática das células alcalinas unipolar (a) e bipolar (b) . .	21
Figura 5 – H ₂ : Aplicações	29
Figura 6 – Efeito Estufa	35
Figura 7 – Mapa-múndi: Austrália	45
Figura 8 – Asian Renewable Energy Hub	46
Figura 9 – Mapa-múndi: Holanda	47
Figura 10 – NorthH ₂	48
Figura 11 – Mapa-múndi: Alemanha	49
Figura 12 – Mapa-múndi: China	51
Figura 13 – Mapa-múndi: Arábia Saudita	52
Figura 14 – Mapa-múndi: Chile	53
Figura 15 – Mapa-múndi: Brasil	54
Figura 16 – Emissão de dióxido de carbono de diferentes combustíveis	57

Quadros

Quadro 1 – Utilização de energia no Brasil	14
Quadro 2 – Propriedades dos combustíveis	17
Quadro 3 – Tipos de células a combustível	31
Quadro 4 – Os maiores projetos de hidrogênio verde no mundo	37
Quadro 5 – Projetos e investimentos confirmados no Brasil de hidrogênio verde . .	55

Lista de tabelas

Tabela 1 – Produção diária de água da planta de dessalinização, demanda de água do eletrolisador e produção de H ₂	24
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

CSP	Energia Solar Concentrada
FV	Fotovoltaica
MED	Destilação de Efeitos Múltiplos
PTC	Coletor de Calha Parabólica
RO	Osmose Reversa
ST	Sistema Solar Térmico
TES	Armazenamento de Energia Térmica

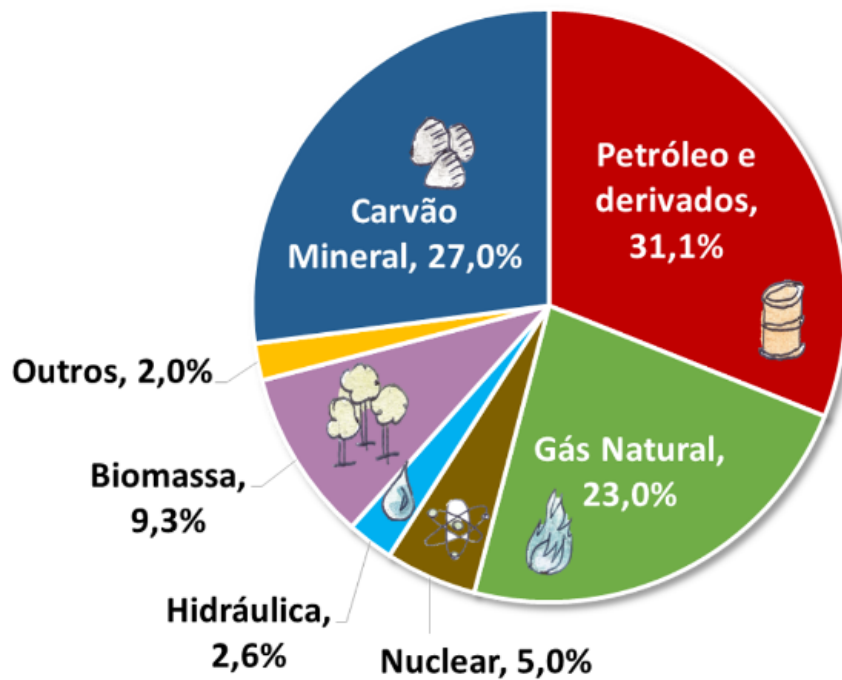
Sumário

1	Introdução	13
2	Objetivo	16
3	Revisão da literatura	17
3.1	Hidrogênio	17
3.2	Eletrólise da água	19
3.2.1	Unidades industriais de eletrólise	20
3.2.2	Eletrodos e eletrólitos utilizados na eletrólise alcalina	22
3.3	Fontes energéticas utilizadas na geração de hidrogênio verde	23
3.4	Armazenamento do hidrogênio	24
3.4.1	Tanques pressurizados	25
3.4.2	Armazenamento geológico	25
3.4.3	Armazenamento de hidrogênio líquido	26
3.4.4	Hidretos metálicos	26
3.4.5	Adsorção em nanomateriais	27
3.4.6	Transportadores de hidrogênio orgânicos líquidos	27
3.5	Transporte de hidrogênio	27
3.6	Aplicações do hidrogênio	28
3.6.1	Motores de combustão interna	29
3.6.2	Células de combustível	30
3.7	Emissão de gases do efeito estufa	34
4	Resultados e Discussão	37
4.1	Utilização de hidrogênio verde no mundo	37
4.1.1	Austrália	44
4.1.2	Holanda	47
4.1.3	Alemanha	49
4.1.4	China	50
4.1.5	Arábia Saudita	51
4.1.6	Chile	52
4.2	Hidrogênio verde no Brasil	53
4.3	Emissão de CO₂	56
5	Conclusão	58
	Referências	59

1 Introdução

A matriz energética mundial é constituída principalmente por fontes não renováveis, como o petróleo, carvão mineral e gás natural, representando mais de 80% da matriz energética (EPE, 2022b). Na Figura 1, é possível analisar a participação dos recursos na matriz mundial no ano de 2019 (IEA, 2022b).

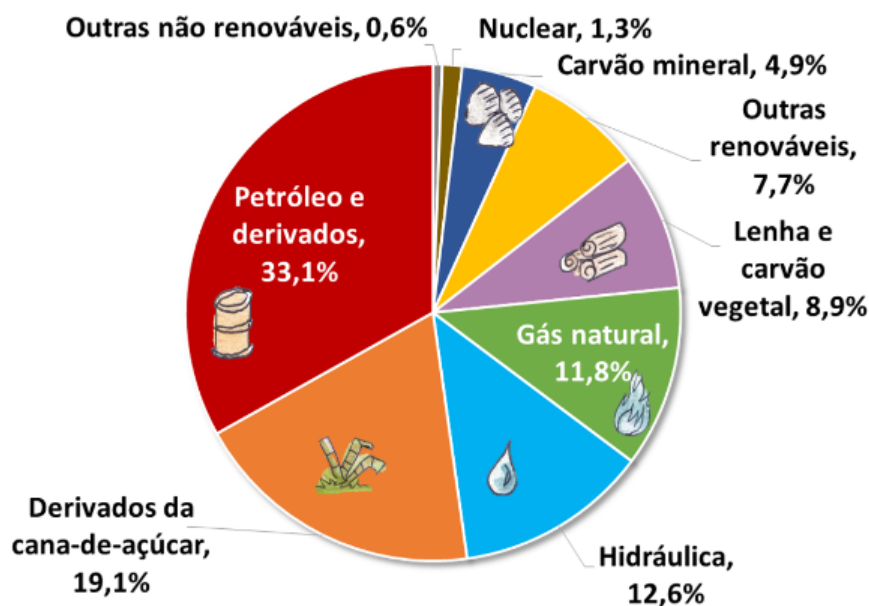
Figura 1 – Matriz Energética Mundial 2019



Fonte: IEA (2022)

No Brasil, a matriz energética é um pouco diferente, as fontes não renováveis continuam predominantes, no entanto, a utilização de fontes renováveis é mais significativa, correspondendo a cerca de 48% da matriz energética (EPE, 2022b). Na Figura 2 é possível analisar a matriz energética brasileira no ano de 2021.

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira 2021



Fonte: BEN (2022)

Os setores de transporte de cargas e passageiros e o setor industrial, representaram juntos 65% do consumo de energia nacional, como apresentado no Quadro 1 (BEN, 2022).

Quadro 1 – Utilização de Energia no Brasil

Setor	Consumo de Energia no País (%)
Transportes	32,5
Indústrias	32,3
Residências	10,9
Setor Energético	9,5
Agropecuária	5
Serviços	4,8
Uso Não Energético	5,1

Fonte: BEN (2022)

Em 2021, o total de emissões de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiram 445,4 milhões de toneladas de CO₂equivalente, sendo 197,8 Mt CO_{2-*eq*} referente ao setor de transportes (BEN, 2022).

Atualmente, a maior parte do consumo energético na Terra faz uso dos combustíveis fósseis, maior emissor de CO₂, substância prejudicial ao efeito estufa e incitador do aquecimento global. Nesta conjuntura, a emissão elevada de gases de efeito estufa como CO₂, CO e CH₄, relativos ao uso desses combustíveis, impulsionou diversos tratados internacionais para a mitigação de impactos ambientais, como o Acordo de Paris, assinado por 197 países em

2015, objetivando limitar o aumento da temperatura global em 1,5°C até o fim do século atual (BOLSON; ARAÚJO, 2022). Anterior ao Acordo de Paris, foi assinado o Protocolo de Kyoto (1997), primeiro acordo de planejamento internacional que objetiva reduzir e combater a emissão de poluentes na atmosfera e restringir os impactos climáticos e ambientais (CHIOCA, 2022).

Com o objetivo de reduzir a poluição ambiental e impossibilitar o esgotamento dos recursos naturais, o incentivo a fontes renováveis e ao desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia eficazes de baixo custo e que respeitem o meio ambiente tem recebido demasiada atenção. O hidrogênio pode ser considerado uma alternativa promissora para que as metas sejam atingidas, a combustão é livre da emissão de dióxido de carbono e outros poluentes, liberando apenas energia e água. No entanto, mesmo com muitas vantagens, o armazenamento e transporte de hidrogênio necessitam de melhorias e otimização para viabilizar ainda mais a sua utilização. Logo, são necessários esforços consideráveis para o desenvolvimento de novos materiais e métodos que otimizem o armazenamento de hidrogênio.

Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar e estudar o ciclo energético do hidrogênio verde.

A metodologia utilizada neste trabalho baseia-se na pesquisa descritiva e exploratória de forma quali-quantitativa, a fim de obter dados subjetivos e baseados em métodos matemáticos e estatísticos. Foram analisados diversos autores e fontes a fim de abranger todo o ciclo que envolve o hidrogênio verde, desde a sua produção, transporte, armazenamento, eletrificação, aplicação, participação no cenário nacional e mundial e os benefícios envolvidos na utilização do hidrogênio verde.

A inclusão do hidrogênio verde na matriz energética mundial envolve um setor ainda em desenvolvimento, implicando em pesquisas, testes e fatores a serem discutidos e estudados, como os processos de produção e estocagem do gás de forma a suprir a demanda adequadamente.

Dessa forma, a primeira parte do trabalho constitui uma revisão bibliográfica que contempla os principais conceitos abordados no tema e a segunda parte é destinada a atualidade, trazendo notícias e inovações voltadas ao desenvolvimento do setor do hidrogênio verde.

2 Objetivo

O presente trabalho tem o objetivo de estudar o ciclo energético do hidrogênio verde e a sua contribuição na redução da emissão de gases de efeito estufa e na transição energética. Para atingir o objetivo geral, o trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o processo de geração do hidrogênio verde;
- Estudar o processo de eletrificação do hidrogênio verde;
- Explorar e exemplificar as aplicações do hidrogênio verde;
- Analisar a participação do hidrogênio verde na matriz nacional e mundial e a perspectiva de utilização do combustível para o futuro.

3 Revisão da literatura

3.1 Hidrogênio

O hidrogênio (H_2), em seu estado natural e sob condições normais - $0^\circ C$ e 1 atm.- é um gás incolor, inodoro e insípido, capaz de armazenar grande quantidade de energia (FIGUEIREDO; CESAR, 2021). No estado líquido, o volume do hidrogênio é cerca de 700 vezes menor que o seu volume em estado gasoso, para atingir esse estado, o hidrogênio deve estar armazenado em temperaturas em torno de $-253^\circ C$, classificando um sistema criogênico¹ (BARBOSA, 2020).

O hidrogênio é um dos elementos químicos mais abundantes do universo, representando cerca de 75% dos átomos presentes, o hidrogênio está presente em incontáveis moléculas que constituem numerosas substâncias, como a água, compostos inorgânicos (ácidos e bases) e orgânicos (hidrocarbonetos, álcoois, hidratados e etc.) (GOMES, 2011; FIGUEIREDO; CESAR, 2021).

Analizando o ponto de vista energético, o hidrogênio é uma alternativa bastante promissora, devido a grande quantidade de energia de combustão (conteúdo de energia) por unidade de massa, sendo o elemento mais leve da tabela periódica. Podendo fornecer de duas a três vezes mais energia que os combustíveis convencionais ((FIGUEIREDO; CESAR, 2021; BARBOSA, 2020). No Quadro 2, encontram-se as principais propriedades do hidrogênio e dos combustíveis convencionais.

Quadro 2 – Propriedades dos combustíveis.

Propriedade	Gasolina	Diesel	Metanol	Etanol	GNC	Hidrogênio
Fórmula Química	$C_5 - C_{12}$	$C_5 - C_{12}$	CH_3OH	C_2H_5OH	CH_4	H_2
Estado Físico	Líquido	Líquido	Líquido	CG	CG	CG/Líquido
Peso Molecular	100 - 105	200 - 300	32	46	16	2
Temperatura de Ebulição ($^\circ C$)	27 - 225	190 - 345	68	78	-161	-253
Temperatura de Congelamento ($^\circ C$)	-40	-34	-97,5	-114	-183	-259

¹ A criogenia é uma área da físico-química que estuda tecnologias para a produção de temperaturas muito baixas ($-150^\circ C$) até a temperatura de ebulição de agentes criogênicos, como o nitrogênio líquido.

Propriedade	Gasolina	Diesel	Metanol	Etanol	GNC	Hidrogênio
PCI (MJ.Kg ⁻¹)	44,5	42,5	20,1	27	50	119,9
PCS (MJ.Kg ⁻¹)	47,3	44,8	22,9	29,8	55,5	141,6
Composição (% em massa)						
Carbono	85 - 88	84 - 87	37,5	52,2	75	0
Hidrogênio	12 - 15	13 - 16	12,5	13,1	25	100
Oxigênio	0	0	50	34,7	0	0

Fonte: Adaptado de Barbosa (2020)

O Poder Calorífico dos combustíveis é determinado como a quantidade de energia interna armazenada no combustível, quanto maior for o poder calorífico do combustível, maior será a energia armazenada no mesmo, nota-se que o PCI e o PCS do hidrogênio são superiores aos dos outros combustíveis (CRIZOL, 2020)(CRIZOL, 2020). Isso ocorre por se tratar do elemento mais leve e pela ausência de átomos pesados de carbono, tornando o hidrogênio um combustível vantajoso quando o peso é levado em consideração, como em programas espaciais, por exemplo. A quantidade de energia liberada durante a reação do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes do poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, gásóleo, metano, propano, etc.). Dessa forma, a massa de hidrogênio necessária para suprir o mesmo consumo energético de um hidrocarboneto é aproximadamente um terço da massa do hidrocarboneto (CRIZOL, 2020).

O hidrogênio não é encontrado de forma livre na atmosfera, é classificado como um veículo energético, uma fonte secundária de energia que depende de um processamento para que seja produzido, transportado e armazenado antes da sua utilização (ALMEIDA *et al.*, 2019). Dependendo da fonte e forma de obtenção do hidrogênio, ele pode ser classificado como hidrogênio cinza, azul ou verde.

O termo hidrogênio cinza refere-se ao hidrogênio produzido mediante a queima de combustíveis fósseis, principalmente gás natural, através de processos intensivos em carbono, como a reforma a vapor², a oxidação parcial e reforma auto térmica do metano e de petróleo de baixo peso molecular como a nafta, pirólise de petróleo ou gaseificação de carbono (CAMARGO, 2021).

O hidrogênio pode ser classificado como hidrogênio azul quando produzido a partir de gás natural e na captura e armazenamento de carbono (FIGUEIREDO; CESAR, 2021).

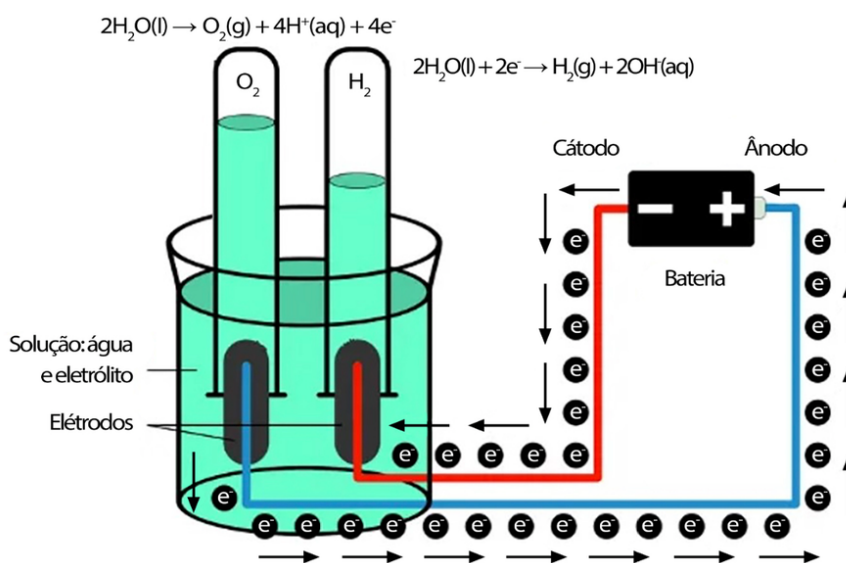
O hidrogênio verde é produzido a partir da eletrólise, mas para que o combustível se encaixe nessa categoria é necessário que o processo seja realizado por meio de fontes renováveis de geração de energia, resultando em um processo livre de emissão de carbono (ENGIE: ALÉM DA ENERGIA, 19 de out. de 2020; FIGUEIREDO; CESAR, 2021). Visando a importância da neutralização de emissão de carbono, o hidrogênio verde é o objeto de estudo desse trabalho.

² Reforma a vapor é a conversão de gás natural em hidrogênio, *Steam Methane Reforming* (SMR) em inglês. A reforma a vapor libera grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera, responsável por intensificar o aquecimento global e as mudanças climáticas.

3.2 Eletrólise da água

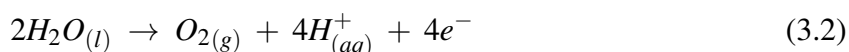
A eletrólise é um processo eletroquímico de dissociação da água que consiste na decomposição das moléculas de água (H_2O) em moléculas de oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) (BARROSO *et al.*, 2022). A eletrólise da água é uma reação de oxirredução³ ocasionada pela passagem de corrente elétrica contínua, a água utilizada no processo contém sais e minerais responsáveis por conduzir a eletricidade (BARROSO *et al.*, 2022; GOMES, 2022). O processo da eletrólise é exemplificado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de representação da eletrólise da água

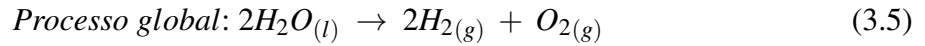
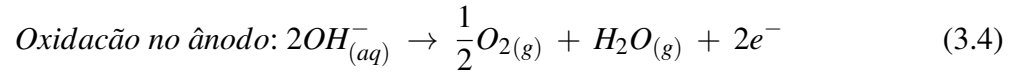
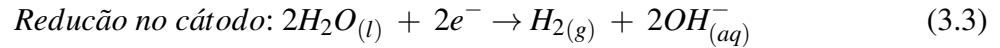


Fonte: Gomes (2022)

Dois eletrodos, um carregado positivamente e outro carregado negativamente, ânodo e cátodo, respectivamente, são imersos no recipiente com água, quando o sistema é conectado a uma fonte de eletricidade, ocorrem duas reações, uma semirreação de redução e uma semirreação de oxidação. A água depositada no recipiente é formada pelos íons H^+ (cátion) e OH^- (ânion). Os íons positivos são atraídos pelo eletrodo cátodo gerando hidrogênio (H_2), já os íons negativos são atraídos pelo eletrodo ânodo gerando oxigênio (O_2) e água (H_2O) (KNOB, 2013; GOMES, 2022). As reações de redução são apresentadas nas Equações 3.1 e 3.3 e as reações de oxidação são apresentadas nas equações 3.2 e 3.4, as reações de redução e oxidação juntas resultam no processo global apresentado na equação 3.5.



³ As reações de oxirredução ocorrem quando há transferência de elétrons de um elemento para outro, o átomo ou íon que recebe elétrons e tem seu número de oxidação (Nox) diminuído e o átomo ou íon que perde elétrons tem o seu número de oxidação (Nox) aumentado)



3.2.1 Unidades industriais de eletrólise

Existem três tipos de unidades industriais de eletrólise atualmente: alcalino unipolar, alcalino bipolar, SOE - Eletrolisadores de óxido sólido (*Solid Oxide Electrolysers*) e por membrana polimérica condutora de prótons (PEM) (*Proton Exchange Membrane*).

- Eletrólise alcalina

A eletrólise alcalina fundamenta-se na dissociação da molécula de água mediante aplicação de uma corrente elétrica, na presença de um eletrólito composto por uma base forte (ROSSI *et al.*, 2022). O eletrolisador alcalino é a opção mais utilizada em larga escala, por se tratar de uma tecnologia madura e com custo de investimento reduzido quando comparado à outras tecnologias, no entanto, devido a necessidade de eletrólitos maiores, ocasionada pela necessidade de regeneração do eletrólito líquido, os custos associados e de manutenção podem ser elevados (BARBOSA, 2020).

Os sistemas mais utilizados comercialmente possuem capacidade que vão de 1,8 kW a 5.300 kW, com taxas de produção que iniciam em 0,25 Nm³/h e que podem atingir 760 Nm³/h e com pressão de saída variando entre 0,05 e 30 bar (BERTUCCIOLI *et al.*, 2014). As soluções alcalinas apresentam concentrações entre 25% e 30% em base mássica com temperaturas entre 65°C e 100°C, constantemente são utilizadas soluções aquosas alcalinas, como o KOH, a fim de potencializar a condutividade iônica (URSUA; GANDIA; SANCHIS, 2012).

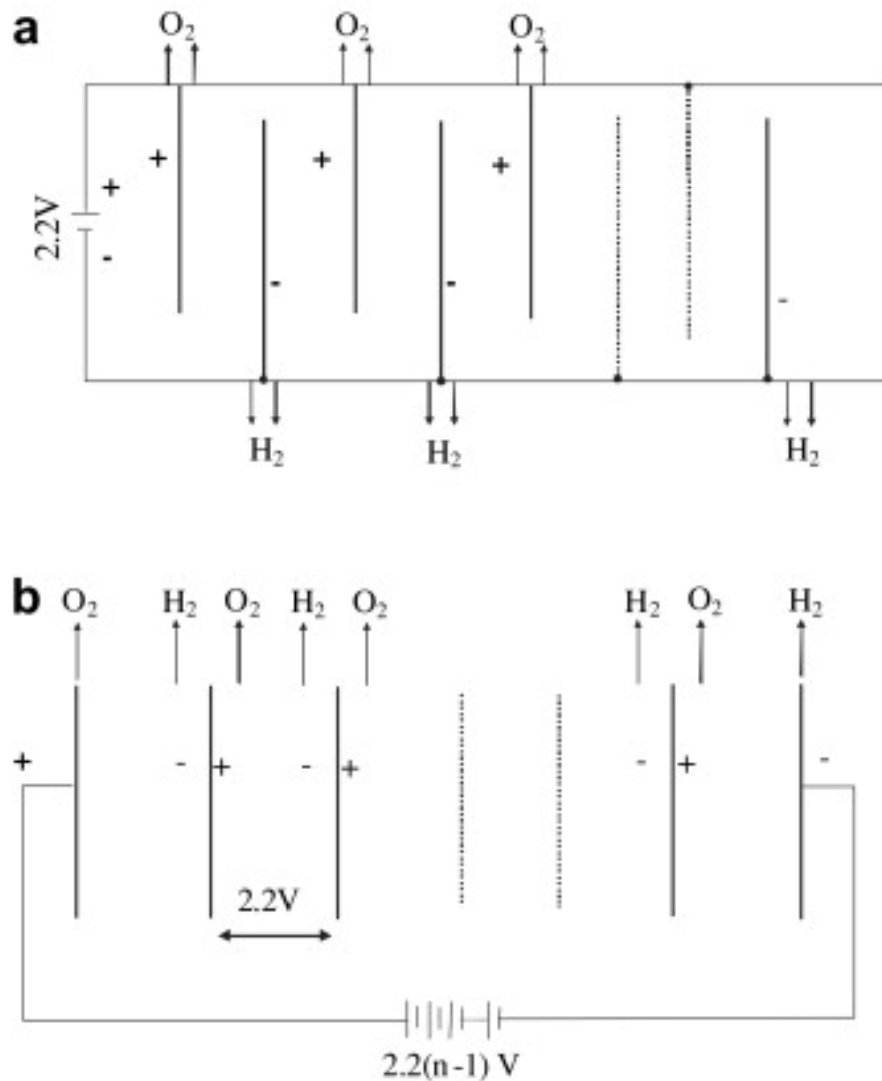
Os eletrolisadores alcalinos podem ser classificados como unipolar ou bipolar.

No sistema unipolar, os eletrodos possuem a mesma polaridade nas duas superfícies e executam apenas um processo eletródico: a reação de redução no cátodo ou a reação de oxidação no ânodo, nessa configuração, a tensão total aplicada à célula é a mesma aplicada aos pares individuais de eletrodos (ZENG; ZHANG, 2010). Nessa configuração, os eletrodos de mesma polaridade devem ser dispostos em paralelo, a configuração unipolar é vantajosa por necessitar de poucos componentes e ser simples de fabricar e reparar, podendo manter uma célula *offline* enquanto o restante atua, no entanto, o sistema unipolar opera com densidade de corrente e temperaturas inferiores (CUNHA, 2021).

No sistema bipolar, os eletrodos são dispostos em arranjos compactos que, em uma extremidade funcionam como cátodos e na outra como ânodos. Os eletrodos são isolados

eletricamente uns dos outros. Um par de eletrodo e um diafragma de separação formam uma célula unitária. As células são conectadas em série, resultando em tensões mais elevadas, a tensão total da célula é a soma da tensão das células unitárias ((ZENG; ZHANG, 2010). As vantagens da configuração bipolar são as maiores densidades de corrente e a capacidade de produzir gás a maiores pressões. A desvantagem é que não pode ser reparada sem manutenção de todo o equipamento (CUNHA, 2021). O esquema de configuração dos sistemas unipolar e bipolar é exemplificado na Figura 4.

Figura 4 – Configuração esquemática das células alcalinas unipolar (a) e bipolar (b)



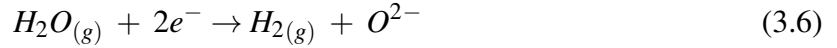
Fonte: Zeng e Zhang (2010)

- SOE - Eletrolisadores de óxido sólido

Nos eletrolisadores SOE, a eletrólise do vapor de água ocorre em temperaturas elevadas, entre 600 e 900°C, resultando num maior grau de eficiência, superior à eficiência dos eletrolisadores alcalinos e PEM, isso ocorre porque as altas temperaturas ocasionam a redução das tensões nas células, potencializando as taxas das reações eletroquímicas (PALHARES, 2016).

O vapor é alimentado no cátodo, onde será produzido o gás hidrogênio. Os íons de óxido gerados passam pelo eletrólito sólido até o ânodo para formarem o gás oxigênio, liberando os elétrons e fechando o circuito (PALHARES, 2016; ZENG; ZHANG, 2010).

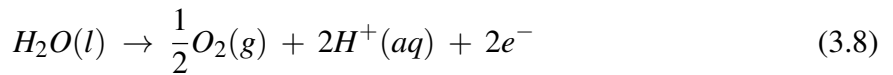
As semirreações no cátodo e no ânodo são apresentadas nas Equações 3.6 e 3.7.



- Eletrolisadores de membrana polimérica

Os eletrolisadores de membrana polimérica (*PEM - Proton Exchange Membrane*), também chamados de membrana de troca de prótons ou polímero de eletrólito sólido (*SPE - Solid Polymer Electrolyte*) são caracterizados por ter um eletrólito sólido. O eletrólito é feito de uma fina membrana polimérica (de espessura inferior a 0,2 mm) à prova de gás e com forte caráter ácido resultante da presença de grupos de ácido sulfônico (HSO_3^-). Esses ácidos são causadores da condução dos íons H^+ mediante um mecanismo de troca iônica. A membrana é comumente feita de Nafion, um polímero sulfonado similar ao politetrafluoreto (Teflon) e os eletrodos são frequentemente feitos de metais nobres como a platina e o irídio (URSÚA; GANDIA; SANCHIS, 2012; GAMBETTA, 2010; PALHARES, 2016).

As semirreações no ânodo e no cátodo são apresentadas nas Equações 3.8 e 3.9.



Em comparação aos eletrolisadores alcalinos, os eletrolisadores PEM apresentam maiores eficiências energéticas e maiores taxas de produção, além de serem mais compactos. No entanto apresentam elevados custos de investimento, se tratando principalmente dos tipos de membrana e de eletrodos e também apresentam menores tempos de vida (URSÚA; GANDIA; SANCHIS, 2012; GAMBETTA, 2010; PALHARES, 2016).

3.2.2 Eletrodos e eletrólitos utilizados na eletrólise alcalina

Os eletrolisadores alcalinos são formados por eletrodos, uma membrana de separação entre eles e uma solução alcalina. Para a produção de hidrogênio mediante eletrólise alcalina, os tipos de eletrólitos e materiais de eletrodos podem ser utilizados em diversas configurações de células eletrolíticas (PALHARES, 2016). O eletrólito comumente utilizado em eletrolisadores convencionais é o hidróxido de potássio (KOH), com concentrações entre 25 e 30% (ZENG; ZHANG, 2010), outro eletrólito que pode ser utilizado é o cloreto de sódio (NaCl), platina, ouro, níquel, cobalto, entre outros.

3.3 Fontes energéticas utilizadas na geração de hidrogênio verde

O Hidrogênio Verde é o hidrogênio produzido com eletricidade proveniente de fontes de energia limpas e renováveis, como as de matriz hidrelétrica, eólica, solar e provenientes de biomassa e biogás, ou seja, não ocorre emissão de CO₂ no ciclo da energia elétrica utilizada (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2021).

A energia solar é uma fonte alternativa, renovável, abundante e sustentável de energia derivada da radiação eletromagnética (luz e calor), a energia solar pode ser utilizada em diferentes tecnologias, como aquecedores solares, painéis fotovoltaicos e usinas heliotérmicas (ou termossolares) (PORTAL SOLAR, 2021). A energia solar é caracterizada pela capacidade de operar na ausência de uma supervisão constante, longa vida útil, elevada confiabilidade, baixo custo de manutenção e é definida como energia descentralizada, o que reduz a dificuldade da distribuição de energia por uso de fios (SINGH, 2013). A energia eólica é a energia do vento, essa energia é transformada em energia elétrica mediante um equipamento chamado turbina eólica (ou aerogerador), as hélices do gerador são movimentadas devido ao deslocamento do fluxo de ar, é considerada uma fonte de energia limpa e inesgotável (PORTAL ENERGIA, 2019).

Estas alternativas produzem energia significativa em determinados períodos de tempo, sendo dependentes das condições climáticas. A relação da energia solar com a intensidade da irradiação solar ao longo do dia, ocasiona a necessidade de armazenar energia a fim de tornar a fonte de eletricidade eficiente e estável, dessa forma, tem-se intensificado o uso e estudo de baterias convencionais e baterias fluxo redox como medida para solucionar essa inconstância. O mesmo é observado na energia eólica, tornando o uso de dispositivos de armazenamento importante no cenário em que a produção de energia é superior à demanda. Considerando que as baterias possuem uma vida útil curta e necessitam ser trocadas após um período, uma estratégia viável e benéfica para esse cenário é o armazenamento por meio da produção de hidrogênio, pois este é capaz de reter grandes quantidades de energia por longos períodos (PAIVA, 2022).

Martins Neto (2022) estudou a geração de hidrogênio verde via água dessalinizada combinada com plantas de energia solar fotovoltaica e eólica, para a dessalinização da água, os processos mais utilizados são “*destilação*” e “*membrana*”, o processo “*destilação*” demanda calor e eletricidade, tal processo consiste na evaporação da água salgada em vários tanques organizados em série, a água destilada (vapor) é resfriada, retornando para o estado líquido. Um dos processos do tipo “*membrana*” mais utilizado é o “*osmose reversa*” (RO), que consiste na recuperação da água de uma solução salina sendo esta pressurizada numa pressão superior à pressão osmótica da solução. (MARTINS NETO, 2022) analisou quatro sistemas: Sistema CSP (PTC + TES)+ MED + H_{2,verde}, Sistema CSP (PTC + TES)+ RO + H_{2,verde}, Sistema CSP (PTC + TES)+ FV + RO+ H_{2,verde} e Sistema térmico ST + TES + FV + EÓLICA (EO) + MED + H_{2,verde} e obteve os seguintes resultados:

Tabela 1 – Produção diária de água da planta de dessalinização, demanda de água do eletrolisador e produção de H₂

Descrição do Sistema	Produção de H ₂ O (ton/dia)	Produção de H ₂ (ton/dia)
MED + CSP + TES	548	41
RO + CSP + TES	548	41
RO + FV	183	14
RO + EO	274	21
RO + 50% FV + 50% CSP + TES	274	21
RO + 50% EO + 50% CSP + TES	274	21
MED + PTC + TES + 50% FV + 50% EO	229	17
RO + 50% FV + 50% EO	229	17

Fonte: Martins Neto (2022)

Rossi et al. (2022) estudou a produção de hidrogênio via eletrólise alcalina utilizando painel fotovoltaico como fonte de energia, os experimentos foram realizados alterando a concentração da solução de KOH e a irradiação fornecida, a fim de verificar a produção de hidrogênio. Ao fim do experimento, concluíram que a irradiação apresenta grande influência na vazão de H₂ produzido, a maior vazão produzida foi de 79,02 mL/min, a uma irradiação solar de 1012 W/m².

3.4 Armazenamento do hidrogênio

O armazenamento e transporte do hidrogênio é um grande desafio, a economia do hidrogênio necessita de sistemas de armazenamento móveis e estacionários, fator importante para atender o setor de mobilidade e garantir a autonomia dos veículos. O hidrogênio possui elevada quantidade de energia por peso de H₂, mas, devido sua reduzida densidade (0,089 kg m⁻³ ou 11,1 m³ kg⁻¹) no estado gasoso e ponto de ebulição em temperaturas baixíssimas (-253°C), encontram-se dificuldades para viabilizar o armazenamento nos estados líquido e gasoso. Para armazenar o hidrogênio em estado gasoso, é necessário um sistema de armazenamento de grande volume e pressão e para armazená-lo em estado líquido, é necessário um sistema criogênico (OLIVEIRA, 2021; AMBIENTE BRASIL, 2021).

O armazenamento do hidrogênio apresenta alguns riscos, ocasionados por fatores como defeitos de material, corrosão e escavação. Comumente, os incidentes nos dutos de distribuição ocorrem devido vazamentos, pois quanto maior a concentração de hidrogênio no ponto de liberação, maior é o perigo (CPG, 2022). Sendo necessário que os seguradores compreendam os riscos da produção de hidrogênio, e sobretudo dos perigos de um mau armazenamento e distribuição. Logo, para que tudo ocorra tranquilamente, é necessário desenvolver a economia e fortalecer a experiência com o combustível (CPG, 2022).

3.4.1 Tanques pressurizados

Os tanques pressurizados são utilizados para armazenar o hidrogênio em seu estado gasoso, o gás encontra-se comprimido em tanques cilíndricos de aço com alta pressão, acima de 20 MPa (~ 200 atm) ou em tanques produzidos com materiais ultraleves, como polímeros e compósitos de fibra de carbono, capazes de suportar pressões de trabalho entre 35 e 70 MPa. O uso de tanques pressurizados é o método mais utilizado para aplicações comerciais (POVEDA, 2007; BARBOSA, 2020).

A classificação dos cilindros de pressurização para hidrogênio segue a mesma classificação existente para os cilindros de gás natural comprimido. Assim, segundo a EIHP (European Integrated Hydrogen Project), existem cinco tipos de recipientes para o armazenamento do hidrogênio comprimido, classificados como (POVEDA, 2007; BARBOSA, 2020):

Tipo I : Cilindro metálico, composto por aço inoxidável e com pressurização entre 175 e 200 bar.

Tipo II: Fina camada de alumínio ou aço reforçado circunferencialmente com outros materiais, geralmente fibras de carbono.

Tipo III: Totalmente reforçado. Cilindro interno metálico, revestido na direção circunferencial e longitudinal com outros compostos, como fibras de carbono.

Tipo IV: Não metálico. Cilindro interno não metálico, revestido na direção circunferencial e longitudinal com fibras contínuas, são os tanques mais atuais, são compostos por fibra de carbono e a compressão máxima é em torno de 800 bar.

Tipo V: Outros.

A escolha do tipo de cilindro a ser utilizado é definida conforme a aplicação, a tecnologia mais avançada e pressão mais elevada está diretamente relacionada à capacidade de armazenamento e custos investidos. Os reservatórios utilizados em condição estacionária requerem pressões de até 200 bar, as aplicações em veículos à pilha a combustível requerem pressões entre 350-700 bar e os módulos de armazenamento industrial costumam utilizar de 3 a 18 cilindros do tipo I podendo armazenar até 700 kg à 160 bar (BARBOSA, 2020).

3.4.2 Armazenamento geológico

O armazenamento geológico de H_2 tem sido avaliado em três diferentes tipos de estrutura: cavernas de sal, aquíferos e reservatórios depletados de hidrocarbonetos. Para a viabilidade do armazenamento geológico, é necessário um montante mínimo de gás na estrutura responsável pela manutenção da pressão do reservatório. Devido a limitação da retirada de gás, o armazenamento geológico se destaca em aplicações de armazenamento de grande volume de hidrogênio em longos períodos de tempo. O armazenamento geológico é caracterizado por apresentar baixos custos operacionais e exigir níveis de compressão que variam de 20 a 180 bar (PINHO, 2017).

A Petrobras tem exercido importante papel quanto ao estudo do armazenamento geológico,

com projetos vinculados ao CCS - Carbono Capture And Storage, como o projeto de CCS do Campo de Petróleo Offshore de Lula, atuando na área de reinjeção de CO₂ do campo de Lula e o projeto Petrobras Miranga Injeção de CO₂. O projeto do campo de Lula é baseado na reinjeção de CO₂ por meio de uma plataforma de extração de gás offshore, o projeto iniciou em 2013. O CO₂ é proveniente de reservatórios naturais situados dentro do Campo de Lula e o gás é apreendido durante a extração de gás e inserido novamente para intensificar a extração de gás natural (PETROBRAS, 2022).

O Projeto de Miranga estudou cenários de armazenamento de CO₂ no município de Pojuca, no Recôncavo Baiano com o objetivo de desenvolver tecnologias aptas a serem utilizadas no futuro no pré-sal, a fim de mitigar as emissões da bacia de Santos (ZEROCO2.NO, 2017).

3.4.3 Armazenamento de hidrogênio líquido

O armazenamento do hidrogênio em estado líquido (LH₂) é vantajoso por possibilitar armazenar uma grande quantidade de hidrogênio, em reservatórios criogênicos, o hidrogênio possui uma massa volúmica de 0,07 kg.L⁻¹, enquanto em estado gasoso, a massa volúmica fica em torno de 0,03 kg.L⁻¹. No entanto, a desvantagem do armazenamento do hidrogênio em estado líquido se encontra na quantidade de energia consumida e no custo associado ao processo de liquefação, que ocorre em temperaturas baixíssimas, em torno de 20K (-253,15°C), a energia necessária para o processo de liquefação equivale a cerca de 40% da energia contida no hidrogênio (FERREIRA, 2022; LEITE, 2021).

3.4.4 Hidretos metálicos

Os hidretos metálicos são compostos químicos utilizados para o armazenamento de hidrogênio em estado sólido, esse tipo de armazenamento consiste no fenômeno de absorção e dessorção do hidrogênio na estrutura de cristais metálicos (OLIVEIRA, 2018; BARBOSA, 2020). Esse armazenamento se baseia na capacidade de alguns metais absorverem o hidrogênio gasoso sob condições de alta pressão e temperatura moderada resultando na formação de hidretos metálicos, a liberação do gás hidrogênio ocorre quando o composto é submetido ao estado de baixa pressão e temperaturas elevadas (AMBIENTE BRASIL, 2021).

A vantagem dos hidretos metálicos está em não necessitar de altíssimas pressões ou se encontrar no estado criogênico, isso devido ao hidrogênio fazer parte da estrutura química do metal, como o hidrogênio é liberado em baixas pressões, o método de armazenamento passa a ser considerado um dos mais seguros. A maior desvantagem do armazenamento em hidretos metálicos é relacionada a sua baixa densidade de energia, os melhores hidretos metálicos apresentam cerca de 8% de hidrogênio em relação a sua massa, tornando-os maiores e mais pesados que outros meios de armazenamento (OLIVEIRA, 2018; AMBIENTE BRASIL, 2021).

3.4.5 Adsorção em nanomateriais

A adsorção em nanomateriais é classificada como uma adsorção física, pois resume-se ao aprisionamento de moléculas de hidrogênio em meio poroso sem ocasionar alterações na estrutura química. Nesse meio de armazenamento são utilizadas nanoestruturas de carbono, metais de transição ou vidro, que pode ser utilizado em forma de capilares ou microesferas. Em relação ao custo, estabilidade química, superfície específica e peso, o melhor candidato para adsorvente é o carbono (NIAZ; MANZOOR; PANDITH, 2015; BARBOSA, 2020).

O carbono pode ser utilizado em forma de fulerenos, aerogéis, nanotubos, zeólitas e redes organometálicas, no entanto, a adição de espécies químicas complementares faz-se necessário em função de intensificar a interação do composto com as moléculas de hidrogênio e aumentar a capacidade de estocagem através do efeito spillover, normalmente são utilizados metais de transição como a platina e o titânio. O efeito spillover é formado por três etapas principais: dissociação da molécula de hidrogênio e ligação às partículas de metal, migração da espécie para a superfície em carbono e formação de uma ligação C-H estável (NIAZ; MANZOOR; PANDITH, 2015; BARBOSA, 2020).

3.4.6 Transportadores de hidrogênio orgânicos líquidos

Orgânicos líquidos, como o ácido fórmico (FA), metanol (CH_3OH) e metil ciclohexano podem ser utilizados para o armazenamento de hidrogênio, o uso de tais materiais pode ser considerado mais benéfico em relação aos materiais sólidos devido a maior facilidade em manuseio e transporte do composto. O FA, importante produto do tratamento da biomassa e o metil ciclohexano são materiais promissores quanto ao armazenamento de hidrogênio, pois apresentam grande quantidade do elemento em sua composição, 4,4% e 12,6% respectivamente. Para a remoção do hidrogênio, é necessário sintetizar o composto químico para que seja possível a liberação de H_2 (ONISHI *et al.*, 2018).

O transporte e armazenamento ocorre em duas etapas principais: (1) carregamento/estocagem (hidrogenação) na molécula do transportador e (2) descarregamento/liberação (desidrogenação). O processo consiste na hidrogenação e desidrogenação reversível de duplas ligações do carbono, presentes no transportador. No processo de hidrogenação, as duplas ligações são saturadas em hidrogênio em pressões e temperaturas elevadas, caracterizando um processo exotérmico. De maneira antagônica, o hidrogênio pode ser liberado mediante uma reação de desidrogenação catalítica endotérmica que ocorre em condições de pressão atmosférica e temperaturas elevadas (NIERMANN *et al.*, 2019).

3.5 Transporte de hidrogênio

O transporte de hidrogênio está diretamente relacionado ao seu armazenamento, o transporte é considerado o maior desafio do ciclo do hidrogênio, devido às características do combus-

tível, como a baixa densidade de energia por volume. O transporte do hidrogênio necessita de uma infraestrutura apta a fornecer e transportar o hidrogênio do local em que é produzido ao local em que será consumido (FERREIRA, 2022; AMARAL, 2021; LINS, 2013).

O transporte do hidrogênio nos estados gasoso e líquido ocorre de 3 formas principais: caminhões de gás comprimido, caminhões de líquido criogênico e gasodutos. Para a determinação da melhor opção para o transporte, é avaliado a quantidade do material a ser transportado (AMARAL, 2021; LINS, 2013; FERREIRA, 2022).

- Caminhões de gás comprimido

Mais adequado para o transporte de pequenas quantidades e curtas distâncias. Os principais custos envolvidos são os de capital para caminhões e reboques, de O&M (operação & manutenção, considerando os custos de mão de obra), e os custos com combustível. Os caminhões de gás comprimido possuem baixo investimento de capital para pequenas quantidades de H_2 . Os caminhões de gás comprimido são mais utilizados e adequados para o momento de introdução do combustível no mercado, devido a necessidade relativamente pequena (LINS, 2013).

- Caminhões de líquido criogênico

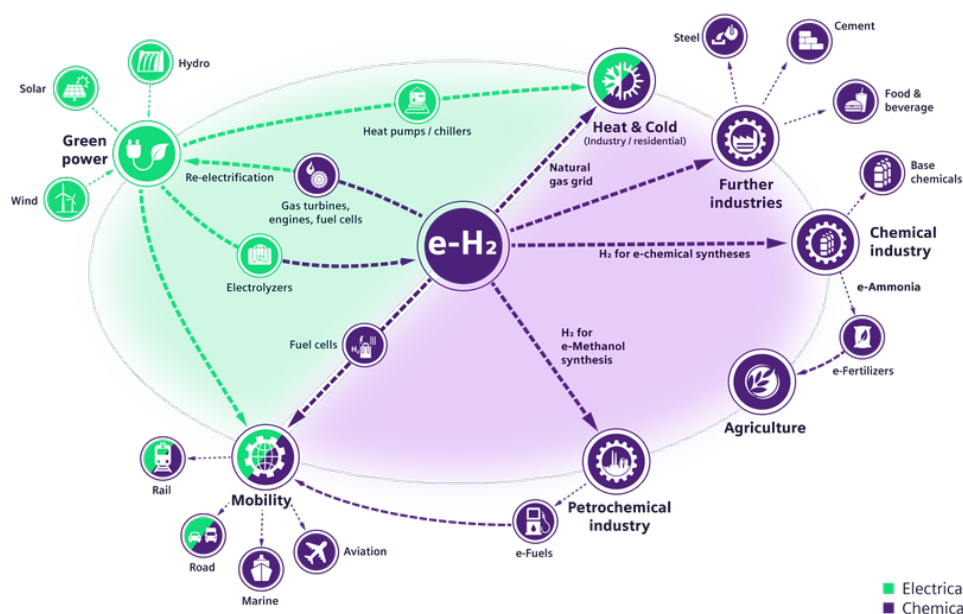
São utilizados para quantidades medianas de hidrogênio e longas distâncias. Os custos são proporcionais ao preço da energia elétrica, devido ao capital investido no processo de liquefação. Os custos operacionais são pequenos, não ocasionando aumento significativo de preço mediante o aumento da distância (LINS, 2013).

- Gasodutos

Opção mais adequada para o transporte de um grande volume de hidrogênio. O custo de capital do gasoduto é o fator principal, nesse caso, os custos de operação são relativamente baixos. As economias de escala são alcançadas mediante o progresso do fluxo de transporte e distância a percorrida. Atualmente já existem mais de 16.000 km de gasodutos de hidrogênio em todo o mundo, sendo o maior deles de aproximadamente 400 km, entre a França e Bélgica (LINS, 2013).

3.6 Aplicações do hidrogênio

O hidrogênio verde é um combustível de aplicabilidade versátil, podendo ser utilizado em diversos setores, na Figura 5, é apresentado as principais aplicações do H_2 (SIEMENS ENERGY, 2022).

Figura 5 – H₂: Aplicações

Fonte: Siemens Energy (2022)

3.6.1 Motores de combustão interna

Motores de combustão interna são máquinas térmicas que convertem energia oriunda de reações químicas em energia mecânica. O processo de conversão consiste em ciclos termodinâmicos que compreendem a compressão e expansão de gases resultando numa mudança de temperatura entre eles. São considerados motores de combustão interna aqueles que utilizam os próprios gases resultantes da combustão de forma que estes executem o trabalho no sistema mediante os processos de compressão, queima, expansão e exaustão, ou seja, utilizam a energia liberada da queima da mistura de ar e combustível para a geração de movimento. Os motores podem ser divididos em motores de 2 e 4 tempos (UFRGS, 2009b).

Os tempos do motor são divididos em admissão (primeiro tempo), compressão (segundo tempo), combustão ou explosão (terceiro tempo) e exaustão ou escape (quarto tempo) (WEBMOTORS, 2020).

- Admissão (primeiro tempo)

O sistema de injeção, através de bicos injetores, envia o combustível às câmaras de combustão. As válvulas de admissão se abrem e liberam a entrada de ar medida pelo coletor. Com as válvulas de admissão abertas e as de escape fechadas, o pistão passa do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI), e absorve a mistura de ar e vapor de combustível para dentro da câmara de combustão através do movimento de descida, devido à pressão atmosférica.

As válvulas de admissão se fecham, completando o primeiro tempo do motor (WEBMOTORS, 2020).

- Compressão (segundo tempo)

As válvulas de admissão encontram-se fechadas, o pistão atinge o ponto morto superior (PMS), comprime a mistura de ar e combustível e finaliza o segundo tempo do motor (WEBMOTORS, 2020).

- Combustão ou explosão (terceiro tempo)

Para iniciar a combustão, a fagulha resultante da descarga elétrica na vela de ignição atinge a mistura de ar e combustível, gera uma pressão que desloca o pistão para baixo, atingindo o ponto morto inferior (PMI) (WEBMOTORS, 2020).

- Exaustão ou escape (quarto tempo)

Os resíduos da queima da mistura de ar e combustível precisam ser retirados de dentro do motor. Isso ocorre quando o pistão sobe novamente, a válvula de escape se abre e os gases são expelidos da câmara através do escapamento (WEBMOTORS, 2020).

Os motores de 2 tempos possuem basicamente 2 ciclos, no primeiro, o pistão sobe admitindo a mistura de ar e combustível na câmara de pré-admissão e fecha as janelas de admissão e exaustão, criando um vácuo no cárter que força a entrada de ar atmosférico no interior do mesmo. No segundo tempo acontece a ignição da mistura e sua respectiva explosão, os gases expandem forçando o pistão a descer produzindo assim trabalho. O pistão desce descomprimindo a mistura e liberando a janela de escape dos gases, que são emanados quando empurrados pela nova mistura de ar e combustível (UFRGS, 2009a).

3.6.2 Células de combustível

As células de combustível são dispositivos eletroquímicos capazes de converter combustíveis variados em eletricidade na ausência de combustão, são tecnologias elementares para a estruturação de uma economia de energia limpa competitiva, segura e sustentável. Entre as vantagens das células de combustível, inclui-se a redução de emissões de gases de efeito estufa, redução do consumo de petróleo, ampliação do uso de energia renovável, conversão de energia altamente eficiente, flexibilidade de combustível (viável a utilização de diversos combustíveis, como o hidrogênio, gás natural, biogás e metanol) e redução da poluição do ar, além de operarem silenciosamente, apresentarem necessidade de manutenção reduzida e serem altamente confiáveis. Devido à sua vasta aplicabilidade, as células de combustível podem ser utilizadas em todos os setores de energia: comercial, residencial, industrial e de transporte (RODRIGUES; SOUZA; TAMBOR, 2019a).

Existem variadas tecnologias de células de combustível presentes no mercado, sendo caracterizadas conforme faixa de temperatura operativa, tipo de combustível que pode ser utilizado, tipo de catalisador e a relação de eficiência do combustível com a conversão de energia (WENDT; GÖTZ; LINARDI, 2000; RODRIGUES; SOUZA; TAMBOR, 2019b). Essas tecnologias estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Tipos de células a combustível.

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de temperatura (°C)	Características	Aplicações
Células de Combustível Alcalina (AFC)	KOH (OH^-)	60 - 100	Alta eficiência (83% teórica) Sensível a CO_2 Gases ultra puros, sem reforma do combustível	Espaçonaves Aplicações militares
Células a Combustível de Membrana Polimérica de Eletrólito (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H_3O^+)	80 - 90	Operação flexível Utilização de catalisadores de platina, mais eficientes e sensíveis à contaminação por CO	Utilização estacionária de pequena potência Veículos automotores Espaçonaves Mobilidade

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de temperatura (°C)	Características	Aplicações
Célula Combustível de Ácido Fosfórico(PAFC)	H_3PO_3 (H_3O^+)	160 - 200	Rendimento de 40 a 80% Desenvolvimento em potências da ordem de 200 kW Maior desenvolvimento tecnológico Necessidade de controle da porosidade do eletrodo Sensibilidade a CO Eficiência limitada pela corrosão	Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) Cogeração eletricidade/ calor

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de temperatura (°C)	Características	Aplicações
Célula Combustível de Carbonato Fundido(MCFC)	Carbonatos fundidos (CO_3^{2-}) (de sódio ou magnésio)	650 - 700	Rendimento de 60 a 80% Tolerância a CO/CO Eletrodos à base de Ni Problemas de materiais Necessidade de reciclagem de CO Interface trifásica de difícil controle	Desenvolvimento em potências da ordem de 200 kW a 2 MW Cogeração eletricidade/ calor

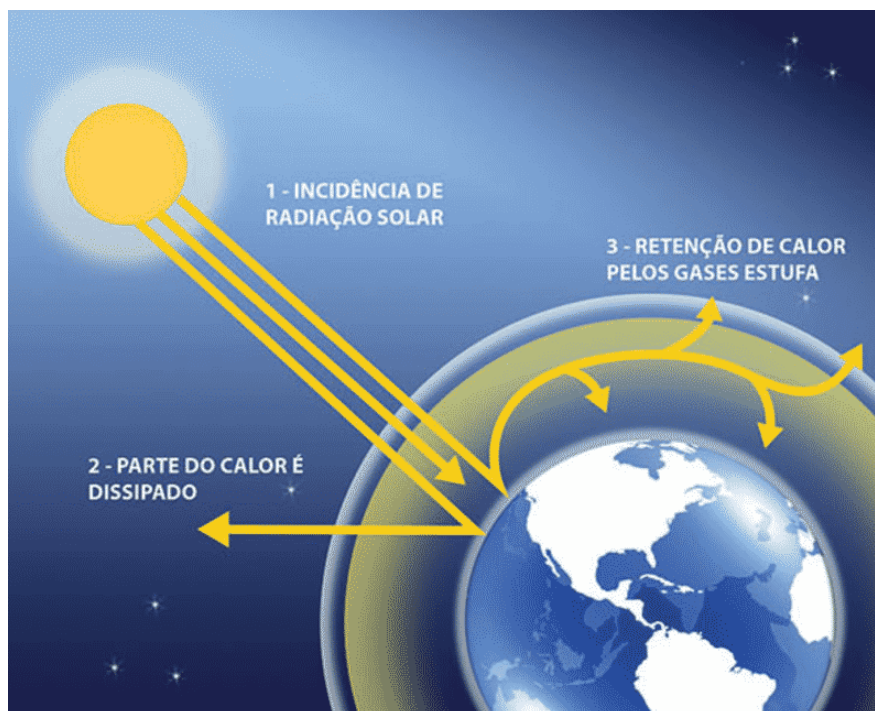
Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de temperatura (°C)	Características	Aplicações
Célula de Combustível de Óxido Sólido(SOFC)	$\text{ZrO}_2(\text{O}^{2-})$	800 – 900	Alta eficiência(cinética favorável) A reforma do combustível pode ser feita na célula Problemas de materiais Expansão térmica Necessidade de pré-reforma	Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW Cogeração eletricidade/ calor
Célula de Combustível Metanol (DMFC)	CH_3OH	50 - 90, pode operar em temperatura ambiente	Mais simples, não necessita de um estágio reformador, tendo a capacidade de extrair hidrogênio diretamente do metanol	Equipamentos portáteis

Fonte: Adaptado de Robson Pereira Rodrigues et al. (2019) e Hartmut Wendt et al. (2000)

3.7 Emissão de gases do efeito estufa

Os gases do efeito estufa (GEE) são gases que absorvem uma parcela dos raios solares e os dissipam na atmosfera em forma de radiação, ocasionando um aquecimento que recebe o nome de efeito estufa, esse termo faz analogia ao aquecimento ocasionado pelas estufas, o vidro das estufas permite a passagem da luz solar, sendo parte absorvida e parte refletida, a parte absorvida não consegue passar novamente pelo vidro e é irradiada para o interior da estufa, aquecendo-a (ECYCLE, 2021).

O efeito estufa é um fenômeno natural e necessário para a vida na Terra, pois é responsável pela manutenção da temperatura do planeta. A superfície terrestre absorve cerca de 51% da radiação solar, o restante é convertido e emitido em forma de radiação infravermelha, essa radiação segue para a atmosfera e é absorvida pelos gases de efeito estufa, responsáveis por absorver a radiação e impossibilitar o retorno da mesma para o espaço (APROBIO, 2019).

Figura 6 – Efeito Estufa

Fonte: Aprobio (2019)

O efeito estufa é natural e essencial, mas torna-se um problema quando é intensificado, devido principalmente às atividades humanas, como o desmatamento, queimadas, queima de combustíveis fósseis e uso de fertilizantes. Os principais gases de efeito estufa presentes na atmosfera são CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , halocarbonetos e vapor d'água. A intensificação da emissão desses gases resulta na formação de uma barreira que acentua a retenção da radiação infravermelha, resultando no aquecimento global (APROBIO, 2019; ECYCLE, 2021).

O aquecimento global é caracterizado pelo aumento das temperaturas médias da Terra, as consequências do aquecimento global incluem a elevação das temperaturas do oceano e derretimento das calotas polares, inundações em áreas costeiras decorrentes do aumento do nível dos oceanos, aumento da insolação e radiação solar, intensificação de catástrofes climáticas, como furacões e tornados, secas e chuvas irregulares, extinção de espécies devido à alteração das condições climáticas e ambientais, influência na produção agrícola, pecuarista e de siveicultura (IFB, 2020).

Algumas medidas podem ser tomadas para combater o aquecimento global:

- Reflorestamento, o plantio de árvores colabora com a redução do calor nas cidades, ajuda a evitar enchentes e a preservar o curso das águas, além de fornecer sombra, tornando os ambientes mais bonitos e agradáveis (IFB, 2020).
- Escolha de fontes renováveis e não poluentes, como o hidrogênio verde, a fim de reduzir a emissão de GEE (IFB, 2020).

- Diminuição na produção de lixo, de forma a reduzir a poluição e a emissão de gás metano, muito presente em aterros sanitários (IFB, 2020).

4 Resultados e Discussão

4.1 Utilização de hidrogênio verde no mundo

O hidrogênio verde é uma tecnologia nova, um combustível que está gradualmente sendo inserido no mercado. Diariamente surgem notícias e propostas vinculadas à novos projetos de usinas e produção do hidrogênio verde. O mercado está ativo e volátil, no Quadro 4 é possível analisar os principais projetos envolvendo hidrogênio verde ao redor do mundo, assim como a potência esperada, local de instalação e perspectivas para a produção (DS NEW ENERGY, 2022).

Quadro 4 – Os maiores projetos de hidrogênio verde no mundo

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Ambição HyDeal 67 GW	Europa Ocidental: Espanha, França e Alemanha	95 GW de energia solar	30 players de energia: distribuidoras de gás Snam, Enagás e OGE; fabricante de eletrolisadores McPhy; Fornecedor de EPC Vinci Construction; e desenvolvedores de energia solar Falck Renewables e Qair	Fornecimento de hidrogênio verde para toda a Europa a € 1,50/kg antes de 2030	3,6 milhões de toneladas por ano	Antes de 2030

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Cazaquistão 30 GW	Cazaquistão	45 GW de energia eólica e solar	Svevind Energy (Alemanha) e agência de promoção de investimentos do Cazaquistão	Exportação e uso local	Em torno de três milhões de toneladas por ano	Não declarado, investimento estimado até 2027
Centro de Energia Verde Ocidental 28 GW	Sudeste da Austrália Ocidental	50 GW de energia eólica e solar	InterContinental Energy e CWP Global	Mercado interno e externo	Até 3,5 milhões de toneladas por ano (ou 20 milhões de toneladas de amônia verde)	Não declarado, investimento até 2028
Aman 16 - 20 GW	Norte da Mauritânia	30 GW de energia eólica e solar	CWP Global	Aço verde, transporte, fertilizante de amônia, mercado interno e externo	Não declarado	Não declarado
Omã 14 GW	Omã	25 GW de energia eólica e solar	InterContinental Energy, Omani oil & company OQ e a empresa de tecnologia estatal do Kuwait EnerTech	Mercado internacional	Não declarado	2038, um terço da capacidade total em funcionamento em 2028

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Centro Asiático de Energia Renovável 14 GW	Pilbara, Austrália Ocidental	16 GW de energia eólica onshore e 10 GW de energia solar	InterContinental Energy, CWP Energy Asia, Vestas, Macquarie	Hidrogênio verde e amônia verde para exportação para a Ásia	1,75 milhão de toneladas por ano (9,9 milhões de toneladas de amônia verde)	Entre 2027 e 2028
NorthH2 10 GW	Eemshaven, norte da Holanda	Energia eólica offshore	Shell, Equinor, RWE, Gasunie, Groningen Seaports	Estimular a indústria pesada na Holanda e na Alemanha	Um milhão de toneladas por ano	2040 (1 GW até 2027, 4 GW até 2030)
AquaVentus 10 GW	Heligoland, Alemanha	Energia eólica offshore	Consórcio de 47 empresas, instituições de pesquisa e organizações, incluindo RWE, Vattenfall, Shell, E.ON, Siemens Energy, Siemens Gamesa, Vestas, Northland Power, Gasunie e Parkwind	Mercado interno e externo	Um milhão de toneladas por ano	2035 (30MW até 2025, 5GW até 2030)
HyEnergy Zero Carbono Hidrogênio 8 GW	Gascoyne, Austrália Ocidental	Energia eólica e solar	Province Resources	Transporte pesado e indústria, mistura em gasoduto local de gás natural e exportação para mercados asiáticos	Não declarado	2030

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Projeto de Hidrogênio Renovável Murchison 5 GW	Austrália Ocidental	Eólica onshore e solar	Hydrogen Renewables Australia e Copenhagen Infrastructure Partners	Transporte, mistura em gasoduto local de gás natural e exportação para a Ásia, com foco no Japão e na Coreia do Sul	Não declarado	2028
Pequim Jingneng Interior da Mongólia 5 GW	Eqianqi, Mongólia Interior, China	eólica onshore e solar	utilitário chinês Beijing Jingneng	Não declarado	400 - 500 mil toneladas por ano	2021 (prorrogado)
Projeto Helios Green Fuels 4 GW	Arábia Saudita	eólica onshore e solar	Air Products, ACWA Power, Neom	Produção de amônia verde (NH ₄) para exportação e H ₂ para uso como combustível de transporte	Cerca de 240 mil toneladas por ano de H ₂ , 1,2 milhão de toneladas de amônia verde	Não declarado, início da produção de amônia prevista para 2025

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Hidrogênio Solar do Pacífico 3,6 GW	Callide, Queensland, Austrália	Solar	Austrom Hydrogen (start-up)	Exportação para Japão e Coreia do Sul	Mais de 200 mil toneladas por ano	Não declarado
Base Um 3,4 GW	Pecém, CE/Brasil	Energia solar e eólica	Energix Energy, em conjunto com a fabricante italiana de turbinas eólicas Enerwind, a fornecedora de EPC Black & Veatch e o governo do estado do Ceará	Mercado internacional	600 mil toneladas por ano	2025
Sudoeste da Irlanda 3,2 GW	Bantry Bay, sudoeste da Irlanda	Eólica offshore	El-H2 com sede em cortiça e empresa de petróleo e gás dos EUA Zenith Energy	Não declarado	Produção de H ₂ não declarada, instalação de amônia verde de 500 MW está planejada	2028
H2-Hub Gladstone 3 GW	Gladstone, Queensland, Austrália	Não declarado	The Hydrogen Utility (H2U)	amônia verde para exportação para o Japão e outros países	Estimado em até 5 mil de toneladas de amônia verde por dia	Início das operações em 2025

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H ₂	Conclusão prevista
Mar Amarelo 2 GW	Qingdao, província de Shandong, China	Energia eólica	Zona de Desenvolvimento Industrial de Qingdao Blue Valley, Shandong Zhongneng Integration Offshore Wind Turbine Manufacturing Corp e Instituto de Engenharia do Noroeste da PowerChina	Não declarado	Não declarado	Não declarado
Green Hydrogen & Chemicals 2 GW	Porto de Duqm, Omã	Cerca de 3,5 GW de energia eólica e solar	Grupo ACME da Índia	Produção de amônia verde	Cerca de 146 mil toneladas por ano	Até o quarto trimestre de 2024. 300 toneladas de amônia verde por dia até Q4 2022.
HyEx 1,6 GW	Antofagasta, Chile	Energia Solar	Engie e Enaex	Amônia verde, mercados de combustível, fertilizante verde e exportação	124 mil toneladas de H ₂ por ano, 700 mil toneladas de amônia verde	2030 (piloto de 26MW até 2024)
Dragão Branco 1,5 GW	Região da Macedônia Ocidental, norte da Grécia	Energia Solar	Empresas gregas de eletricidade controlada pelo governo Public Power Corporation, empresa de rede de gás DESFA, empresa petrolífera Hellenic Petroleum, refinador e comerciante de petróleo Motor Oil, tubo de aço fabricante Corinth Pipeworks, operadora de gasodutos de longa distância TAP, desenvolvedora de energias renováveis Terna Energy, fabricante de células de	Geração de energia de carga de base através de células de combustível, aquecimento urbano ou pela indústria pesada, construção prevista de um gasoduto de hidrogênio para entregar H ₂ ao setor de transporte, indústria	Cerca de 250 mil toneladas por ano para geração de energia, com 58 a 71 mil toneladas para outros setores	2029

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H₂	Conclusão prevista
Geraldton 1,5 GW	Geraldton, Austrália Ocidental	Eólica onshore e solar	BP/BP Lightsource	Produção de amônia verde para os mercados interno e externo	Não declarado, estimado um milhão de toneladas de amônia verde por ano	Não declarado
HNH 1,4 GW	Sul do Chile	2 GW de energia eólica	AustriaEnergy e Ökowind EE	Amônia verde para exportação	De 850 mil a um milhão de toneladas de amônia verde por ano	2026
Grande Copenhague 1,3 GW	Área da Grande Copenhague, Dinamarca	Eólica offshore	Orsted, Maersk, DSV Panalpina, DFDS, SAS	Hidrogênio para ônibus e caminhões, e-combustível (derivado do hidrogênio verde e CO ₂ capturado) para transporte e aviação	Não declarado, estimado 250 mil toneladas de combustível sustentável por ano.	2030 (piloto de 10MW em 2023, 250MW em 2027)
Mar H2Terra 1 GW	Mar do Norte na Holanda e na Bélgica	Parque eólico offshore de 2 GW no Mar do Norte holandês	Orsted, em conjunto com ArcelorMittal, Yara, Dow Benelux e Zeeland Refinery	Produção de aço, amônia, etileno e combustível de transporte	Não declarado	2030

Projeto	Local	Fonte de energia	Desenvolvedores	Uso planejado	Produção H ₂	Conclusão prevista
Esbjerg 1 GW	Esbjerg, Dinamarca	Energia eólica offshore	Copenhagen Infrastructure Partners, em conjunto com os gigantes marítimos Moller-Maersk e DFDS, e as empresas alimentícias Arla, Danish Crown e DLG	Amônia verde, produção de fertilizantes e combustível de transporte.	Não declarado	Entre 2025 e 2027
Senos H2 1 GW	Sines, sudoeste de Portugal	Energia eólica e solar	EDP, Galp, Martifer, REN, Vestas	Consumo interno e exportação	Não declarado	2030
Rostock 1 GW	Rostock, Alemanha	Eólica offshore e outras fontes renováveis	Consórcio liderado pela RWE	Expectativa de atender todos os setores (mobilidade, indústria e energia)	Não declarado	Não declarado

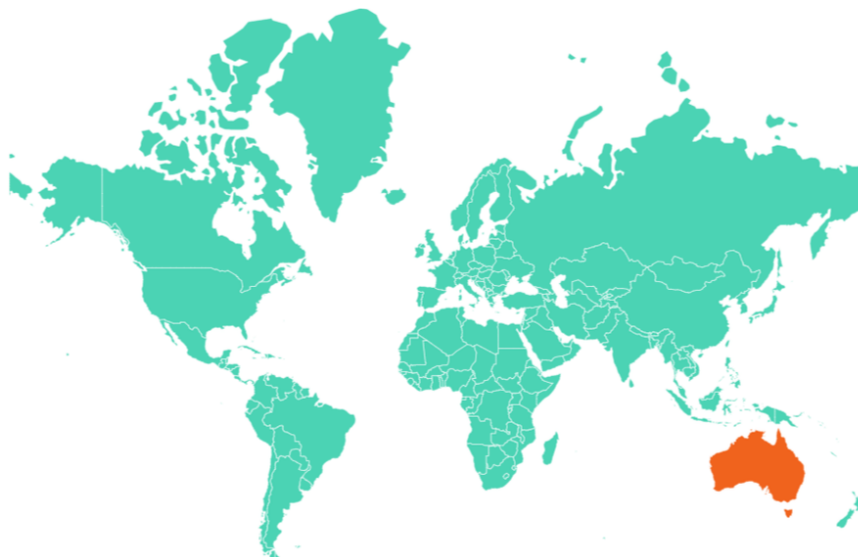
Fonte: Adaptado de DS New Energy (2022)

Para o desenvolvimento e consolidação do hidrogênio verde, se destacam os países que possuem abundância em recursos de energia renovável, ambiente político e risco-país¹ favoráveis (BNAMERICAS, 2022). Decorrente desses fatores e aliado aos megaprojetos em desenvolvimento, seis países se destacam no cenário de expansão do mercado de hidrogênio verde, são eles: Austrália, Holanda, Alemanha, China, Arábia Saudita e Chile (BBC, 2021).

4.1.1 Austrália

O maior país da Oceania e sexto maior país do mundo, com mais de 7,6 mil km² em extensão territorial, a Austrália lidera os projetos de produção do hidrogênio verde, mediante a construção de 5 megaprojetos em seu território. O incentivo à economia do hidrogênio está vinculado principalmente à ampla variedade de recursos energéticos renováveis, principalmente energia eólica e solar (BBC, 2021). Na Figura 7 é apresentado a localização da Austrália.

¹ (CNN BRASIL, 2021) Risco-país ou risco-soberano é a ferramenta de medida utilizada para avaliar a capacidade dos países emergentes de pagarem suas dívidas e ter subsídios para fazer ou não investimentos na região.

Figura 7 – Mapa-múndi: Austrália

Fonte: Figura do autor (2022)

A geração e utilização de energia renovável na Austrália segue em expansão, em 2021, a geração de energia renovável representou 29,1% da geração total anual, sendo 11,7% e 10% da geração total composta pela energia solar e eólica, respectivamente (IBERDROLA, 2021).

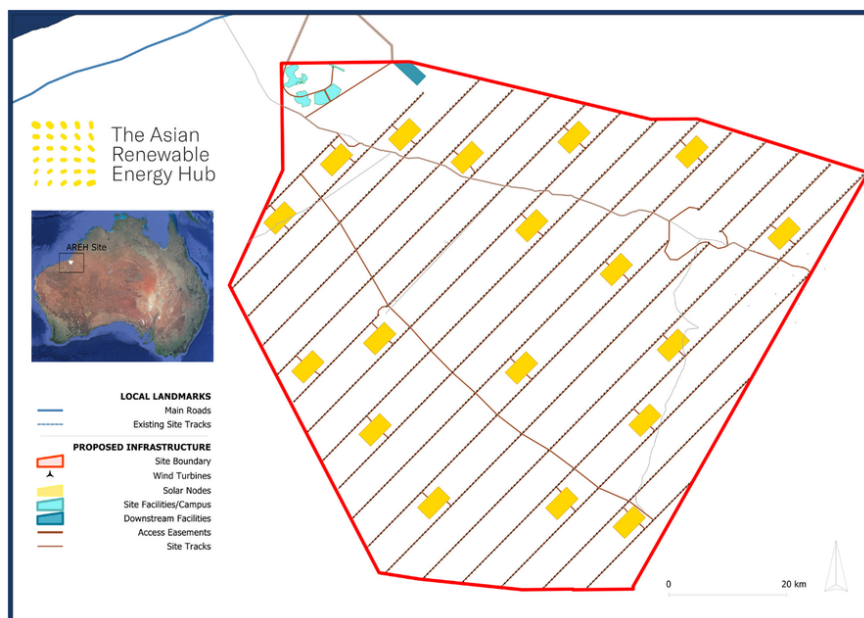
A Estratégia Nacional de Hidrogênio da Austrália designa uma visão de indústria de hidrogênio limpa, inovadora, segura, competitiva e benéfica a todos os australianos, almejando tornar-se player global até 2030. A estratégia visa explorar o potencial de hidrogênio limpo do país, visando cenários futuros com vastas oportunidades de expansão, abordagem adaptativa que viabilize um rápido avanço, projetos espalhados por todo o território e intensa participação do governo, indústria e comunidades (AUSTRALIAN GOVERNMENT, 2022). Entre as diversas ações estratégicas, pode-se citar (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019):

- Ações que promovem a remoção de barreiras de mercado, criação de oferta e demanda de forma eficiente, aceleração do crescimento global e incentivo à competitividade de custo de hidrogênio da indústria de hidrogênio da Austrália (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019).
- Ações iniciais concentradas no desenvolvimento de cadeias de abastecimento de hidrogênio limpo para atender novos e atuais utilizações do hidrogênio (como para produção de amônia) e capacidade de desenvolvimento para o crescimento e aceleração da indústria (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019).
- Apoiar o modelo de hub como uma abordagem prospectiva em estágio inicial para atingir a escala necessária para um indústria competitiva (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019).

- Apoiar pilotos contínuos, testes e demonstrações de hidrogênio em redes de distribuição de gás (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019).
- Apoiar uma abordagem adaptativa para aumentar a demanda por hidrogênio como combustível de transporte. Iniciando por tarefas de transporte que não requerem uma extensa rede de postos de abastecimento e ofereça vantagens de desempenho e desenvolvimento da indústria (COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP, 2019).

O Asian Renewable Energy Hub, localizado na Austrália Ocidental, em Pilbara, é o projeto de hidrogênio verde mais avançado em escala, compreendendo 26 GW de energia eólica e solar upstream, capaz de produzir aproximadamente 1,6 milhão de toneladas de hidrogênio verde ou 9 milhões de toneladas de amônia verde por ano. A construção prevê eletrolisadores com capacidade total de 14 GW. Este projeto promete construir, em fases, uma instalação de energia renovável híbrida em larga escala que viabilize a eletrificação de minas em grande escala, substituição de combustíveis diesel por hidrogênio, abastecimento de combustíveis de transporte de amônia em Pilbara e região. A previsão é de que o projeto esteja pronto até 2027-28 (BP AUSTRALIA, ; HYRESOURCE, 2022a; INTERCONTINENTAL ENERGY, 2022; BBC, 2021). Na Figura 8 é apresentado a planta do projeto Asian Renewable Energy Hub.

Figura 8 – Asian Renewable Energy Hub



Fonte: InterContinental Energy (2022)

Outros projetos encontram-se em fase de planejamento inicial, o Western Green Energy Hub e o Arrowsmith, do Infinite Blue Energy Group são dois exemplos.

O Western Green Energy Hub propõe um grande desenvolvimento híbrido eólico e solar capaz de produzir até 50 gigawatts (GW) de energia renovável em 15.000 quilômetros quadrados no sudeste da Austrália Ocidental e, em plena operação, poderá produzir mais de 3 milhões de

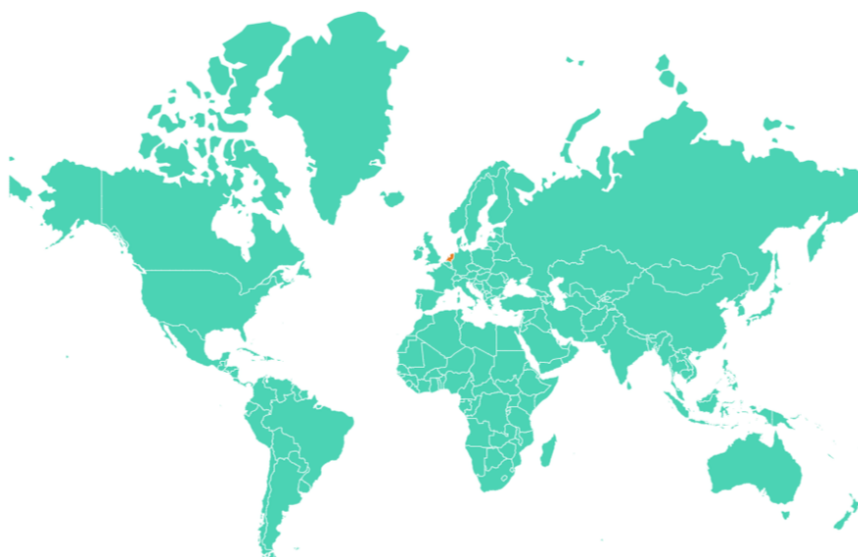
toneladas de hidrogênio de base renovável ou cerca de 20 milhões de toneladas de amônia (de base renovável). Notícias de imprensa indicam que o início do projeto ocorrerá em 2030 (com a opção de construir uma instalação offshore para transferir combustíveis para navios) e em plena capacidade poderia custar cerca de AUD\$ 100 bilhões. Em dezembro de 2021, o governo da Austrália Ocidental anunciou que o projeto receberia serviços de agência líder do Departamento de Empregos, Turismo, Ciência e Inovação (HYRESOURCE, 2022b).

O Arrowsmith, planta de hidrogênio da Infinite Blue Energy Group (IBE), promete a geração de 70MW de energia solar FV e 96MW de energia eólica, resultando em 25 toneladas de hidrogênio verde por dia, com essa geração, estima-se a redução de emissão de CO₂ em 118.000 de toneladas por ano (PETROFAC, 2022).

4.1.2 Holanda

A Holanda tem investido cada vez mais em fontes renováveis de geração de energia, em 2021, o país gerou cerca de 118 bilhões de kWh de energia, resultando numa redução de mais de 2 bilhões de kWh em relação a 2020. As cinco principais fontes de energia utilizadas foram: gás natural (47%), eólica (15%), carvão (14%), solar (10%) e biomassa (8%), a porcentagem restante foi composta por energia nuclear, derivados de petróleo e energia hidrelétrica (INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION, 2022b). Na Figura 9 é apresentado a localização da Holanda.

Figura 9 – Mapa-múndi: Holanda



Fonte: Figura do autor (2022)

Em 2019, o Acordo Climático Holandês determinou uma meta de produção de 4 gigawatts de energia de hidrogênio verde até 2030, atualmente, a meta de produção é de 8 gigawatts, o dobro do planejado em 2019. Essa medida é consequência dos preços cada vez mais altos da energia, do fechamento dos campos de gás de Groningen e do interesse na redução de importação de gás russo. Tais acontecimentos influenciaram nas ações dos partidos governantes holandeses

VVD (Partido Popular para a Liberdade e Democracia) e D66 (Democratas 66), que solicitaram ao gabinete holandês que intensificassem o investimento e dobrassem as metas de produção de hidrogênio verde, atuando também como oportunidade para as empresas e fornecedores locais (INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION, 2022a).

O governo holandês reservou €15 milhões no Acordo de Coalizão de 2022, a fim de garantir uma transição energética mais sustentável e estimular a produção e o uso do hidrogênio verde. A perspectiva é que o combustível seja inicialmente utilizado pela indústria pesada (siderúrgico, metalúrgico, petroquímico e de cimento) e no setor de transportes, como a navegação interior (INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION, 2022a). A NorthH₂ é um projeto comandado pelo consórcio de Groningen Seaports, Eneco, RWE, Equinor, Shell e Gasunie, com o apoio da província de Groningen que tem como meta tornar a indústria mais verde, atuando mediante um suprimento grande e estável de hidrogênio verde. O projeto prevê abordar, simultaneamente toda a cadeia energética, formando um sistema composto por parques eólicos offshore, eletrolisadores, instalações de armazenamento de gás e gasodutos que viabilizem a conversão de eletricidade eólica offshore em hidrogênio verde, que é depois armazenado e transportado para centros industriais no noroeste da Europa (RWE, ; NORTH2, 2020). O propósito é fornecer à indústria 4 GW de hidrogênio verde até 2030 e 10 GW por volta de 2040, o que representa cerca de 1.000.000 de toneladas de hidrogênio verde por ano. Essa produção é equivalente à emissão de oito a dez megatoneladas de CO por ano. A eletrólise ocorrerá inicialmente em Eemshaven e, posteriormente, possivelmente também no mar (RWE, ; NORTH2, 2020). O projeto NorthH₂ está situado no Porto do Ems, no norte da Holanda. Inicialmente, hidrogênio gerado será utilizado para abastecer a indústria pesada tanto na Holanda quanto na Alemanha (RWE, ; NORTH2, 2020). Na Figura 10 é esquematizado o projeto NorthH₂.

Figura 10 – NorthH₂



Fonte: Gasunie (2020)

4.1.3 Alemanha

No primeiro semestre de 2022, a Alemanha, principal consumidora de energia da Europa, teve sua matriz energética composta por 46,4% de fontes renováveis, 19,2% de lignito, 14,6% de gás natural, 10,2% de carvão (antracito), 5,6% de recurso nuclear, 0,9% de óleo mineral e 3,2% de outros. Das fontes renováveis, 19,5% é composto por eólica onshore, 4,1% de eólica offshore, 3% de energia hidráulica, 7,9% de biomassa, 10,9% de energia solar 1% de outros. Devido ao elevado investimento em fontes renováveis para geração de energia, o cenário da Alemanha se faz favorável para a geração de hidrogênio verde (CLEAN ENERGY WIRE, 2022). Na Figura 11 é apresentado a localização da Alemanha.

Figura 11 – Mapa-múndi: Alemanha



Fonte: Figura do autor (2022)

Em junho de 2020, Governo Federal adotou a Estratégia Nacional do Hidrogênio, um documento de 28 páginas com medidas que objetivam fortalecer o cenário econômico e industrial do país. A Estratégia Nacional de Hidrogênio da Alemanha se dedica a introduzir o hidrogênio verde na indústria, no setor de transporte e no sistema de energia, com o intuito de garantir a competitividade, atingir as metas climáticas e desenvolver novos mercados (FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, 2022). Além da Estratégia Nacional do Hidrogênio, a Alemanha criou o Programa Nacional de Inovação em Tecnologia de Hidrogênio e Células Combustíveis (NIP), que prevê um financiamento de €1,4 bilhão entre os anos 2016 e 2026 (GÓES, 2021).

A Estratégia Nacional do Hidrogênio integra as políticas de clima, energia, indústria e inovação. O objetivo é tornar a Alemanha pioneira global no mercado e tecnologia de hidrogênio verde (FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, 2022).

Como medida de avançar com o mercado e tecnologia de hidrogênio verde, a Alemanha tem desenvolvido projetos em território nacional, um deles é o AquaVentus, com a finalidade de

promover a transformação do sistema econômico e energético europeu, a AquaVentus se propõe a atingir 10 gigawatts de geração de hidrogênio verde a partir da energia eólica offshore até 2035, o projeto está sendo desenvolvido na ilha de Heligoland, no Mar do Norte (AQUAVENTUS, 2020). O projeto está sendo promovido por um consórcio de 27 empresas, instituições de pesquisa e organização, entre eles, a Shell (BBC, 2021).

Projetos menores também estão em desenvolvimento, um consórcio liderado pela empresa de energia local RWE pretende construir mais 1 GW de energia verde em Rostock, na costa norte da Alemanha (BBC, 2021).

Além de projetos em território nacional, a Alemanha possui projetos em desenvolvimento em outros países, um dos motivos para expansão é devido à limitação do país para geração em seu território, pois as fontes eólica e solar são insuficientes para atender a demanda (UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

4.1.4 China

A China, terceiro maior país do mundo, é o maior consumidor de energia elétrica do mundo, é responsável por 26,1% do consumo mundial de energia primária. O país asiático, é também o maior gerador de eletricidade, contribuindo com 29% de geração mundial. Como consequência, a China é também o maior de emissor de CO₂ do mundo, retendo 30,7% da emissão global de CO₂ oriundo do consumo de derivados de petróleo, gás natural e carvão em atividades relacionadas a combustão (REVISTA FORUM, 2022).

Tais fatores, alinhado ao desejo mundial em reduzir a emissão de gases de efeito estufa, desencadearam na China o interesse e necessidade em contribuir com a transição energética. A energia solar fotovoltaica e a energia eólica são duas fontes que possuem importante participação na matriz energética chinesa, a China é líder mundial em geração e capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, detendo 35,9% da capacidade instalada mundial. Entre os anos 2009 e 2019, crescimento foi de 85,9% ao ano, já entre 2019 e 2020, houve um aumento de 23,7% (REVISTA FORUM, 2022). Na Figura 12 é apresentado a localização da China.

Figura 12 – Mapa-múndi: China

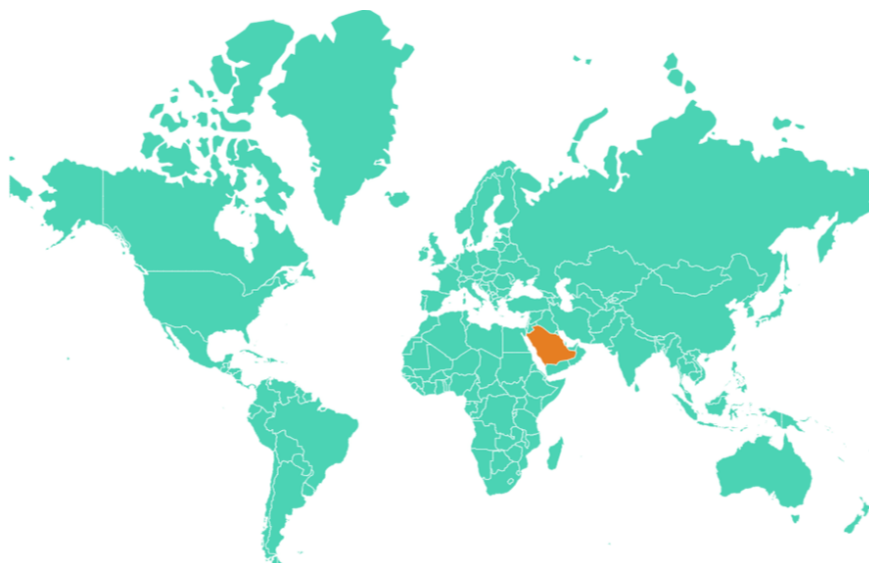
Fonte: Figura do autor (2022)

A forte presença de energia solar e eólica impulsiona a geração de hidrogênio verde no país. A China tem avançado no mercado do hidrogênio verde com projetos no território da Mongólia, Xinjiang e Fujian. O projeto da Mongólia Interior utilizará 1,85 gigawatts de energia solar e 370 megawatts de energia eólica para a produção de 66,9 mil toneladas de hidrogênio verde por ano, afirma a Associação de Promoção da Indústria de Energia de Hidrogênio(UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2021).

A construção da usina de hidrogênio de Xinjiang, administrado pela estatal Sinopec, iniciou em dezembro de 2021. O projeto contempla a geração de energia fotovoltaica, transmissão e conversão energética, produção de hidrogênio mediante um sistema de eletrólise da água, armazenamento e transmissão de hidrogênio. O projeto conta com uma central fotovoltaica de capacidade instalada de 300MW e geração de energia anual média de 618 milhões de kWh, uma usina de hidrogênio para eletrólise de água com uma produção anual de 20.000 toneladas, tanques de armazenamento de hidrogênio com uma capacidade total de cerca de 210.000 metros cúbicos padrão e uma rede de canalização de hidrogênio com capacidade de distribuir 28.000 metros cúbicos padrão de por hora (SCMP, 2022).

4.1.5 Arábia Saudita

A Arábia Saudita, maior produtora e exportadora de petróleo, está progredindo com uma série de medidas designadas ao atingimento da meta de emissões líquidas zero para 2060, estabelecida em outubro de 2021. O progresso está ocorrendo mediante projetos de referência, como a usina pioneira de hidrogênio verde da NEOM e desenvolvimentos renováveis em grande escala, enquanto a introdução da energia nuclear no mix de energia permanece na agenda (ENERGY INTELLIGENCE, 2022). Na Figura 13 é apresentado a localização da Arábia Saudita.

Figura 13 – Mapa-múndi: Arábia Saudita

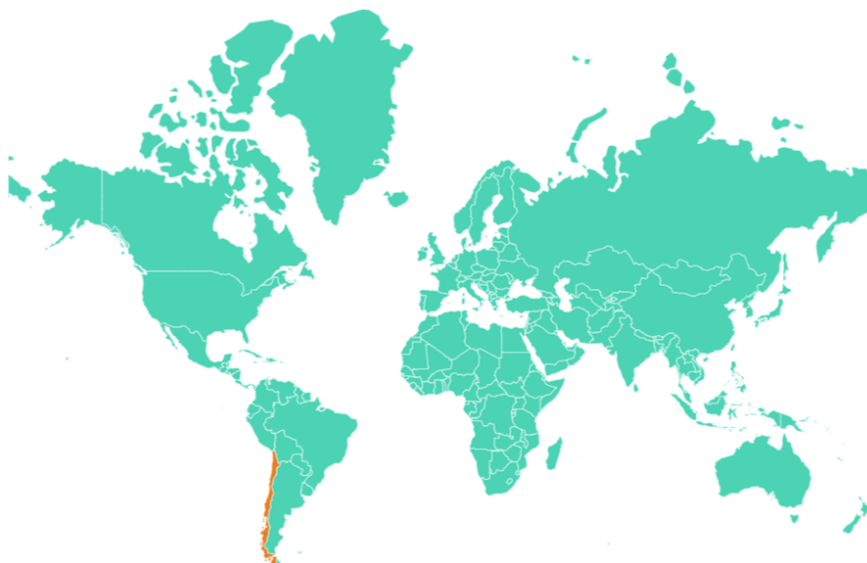
Fonte: Figura do autor (2022)

O projeto recebe o nome de Helios Green Fuels, será baseado na “cidade inteligente” futurística de Neom, às margens do Mar Vermelho, na província de Tabuk, no noroeste do país (BBC, 2021).

A concessionária saudita, ACWA Power International e um consórcio de parceiros deram início a construção da usina de Helios, que ao que tudo indica, pode ser a maior do mundo. A usina utilizará energia solar durante o dia e energia eólica à noite, a fim de mitigar a necessidade de baterias e soluções de custo elevado para armazenamento. O projeto de \$ 5 bilhões prevê a instalação de 4 GW de eletrolisadores até 2025 (FAST COMPANY, 2022).

4.1.6 Chile

De acordo com a Comissão Nacional de Energia, a matriz energética do Chile é formada principalmente por combustíveis fósseis, representando 68% da matriz nacional, sendo 30% de petróleo bruto, 22% de carvão e 16% de gás natural. As fontes renováveis incluem a biomassa, com participação de 23% da matriz energética, 5% de origem hidrológica, 2% de energia solar e 1% de energia eólica. Cerca 90% do combustível fóssil utilizado no Chile vem de importações, resultando numa intensa dependência do mercado externo (BERNAL, 2021; VERA, 2022). Na Figura 14 é apresentado a localização do Chile.

Figura 14 – Mapa-múndi: Chile

Fonte: Figura do autor (2022)

O país sul-americano, foi o primeiro da região a apresentar uma “Estratégia Nacional de Hidrogênio Verde” em novembro de 2020 (BBC, 2021). O objetivo do país é ter 5 GW de capacidade de eletrólise em desenvolvimento até 2025, além de produzir o hidrogênio verde mais barato do planeta até 2030 e estar entre os três maiores exportadores até 2040 (EPBR, 2021).

A estratégia segmenta o desenvolvimento do hidrogênio verde em diferentes etapas. Na primeira, a produção do hidrogênio será direcionada às indústrias-chave, a fim de reduzir a pegada de carbono e ganhar competitividade, com a indústria consolidada, o próximo passo é a exportação do hidrogênio (EPBR, 2021).

O Chile possui alguns projetos em desenvolvimento: o HyEx, da empresa francesa de energia Engie e da empresa chilena de serviços de mineração Enaex; e o Highly Innovative Fuels (HIF), da AME, Enap, Enel Green Power, Porsche e Siemens Energy (BBC, 2021).

O HyEx possui sede em Antofagasta, no norte do Chile, utilizará energia solar para abastecer eletrolisadores de 1,6 GW, o hidrogênio verde gerado será destinado ao setor de mineração. Um teste piloto inicial planeja instalar 16 MW até 2024 (BBC, 2021).

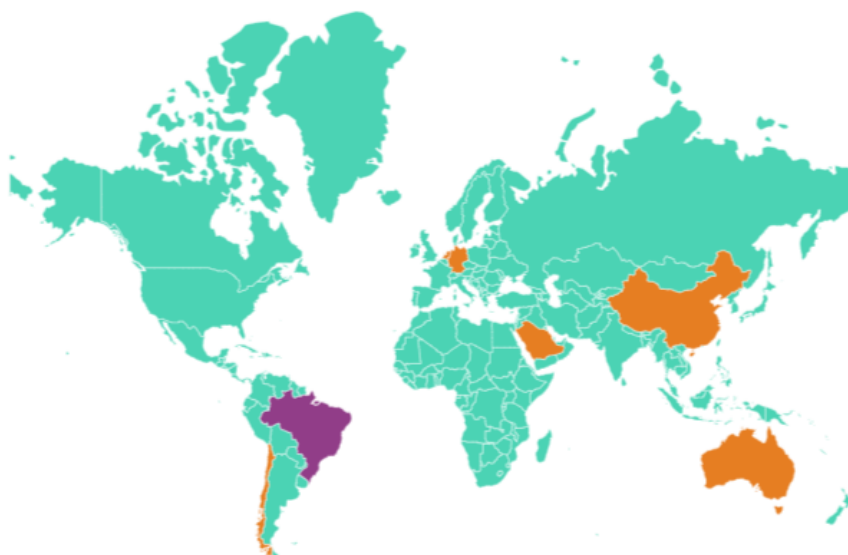
O projeto HIF está situado na Região de Magalhães e da Antártida Chilena, utilizará energia eólica para a geração de hidrogênio. O projeto piloto utilizará um eletrolisador de 1,25 MW e nas fases comerciais será superior a 1 GW (BBC, 2021).

4.2 Hidrogênio verde no Brasil

O Brasil apresenta potencial para se tornar líder no mercado de hidrogênio verde, pois apresenta condições singulares para geração de energia limpa são um importante fator para que o país atinja essa posição. Cerca de 80% da matriz elétrica do Brasil é renovável, o que contribui fortemente para a geração do combustível, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética

(EPE), o potencial de energia eólica e solar do Brasil está em torno de 1,3 milhão de megawatts (MW), tal potencial apresenta baixa possibilidade de ser absorvida pelos mercados internos latinoamericanos, possibilitando que a região se torne um grande hub global de exportação de renováveis (UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022). Na Figura 15 é apresentado a localização do Brasil.

Figura 15 – Mapa-múndi: Brasil



Fonte: Figura do autor (2022)

Como já analisado, acordos internacionais, políticas públicas, planejamento energético e ações empresariais estão cada vez mais direcionados às inovações tecnológicas verdes, com foco nas energias eólica e solar e posterior geração de hidrogênio verde, nesse contexto, o Brasil tem recebido atenção especial (UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

A União Europeia é um grande importador de recursos energéticos fósseis, no contexto de transição energética, o bloco tem assumido um importante papel mundial em prol de políticas de mudanças climáticas, uma das medidas tomadas é a busca por países parceiros que auxiliem na transição. A Alemanha vê o Brasil como um potencial grande exportador energético, tornando-se alvo para a importação de hidrogênio verde, um fator importante para essa parceria se dá à presença de subsidiárias alemãs em território brasileiro (UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

Diante desse contexto, o Brasil passa a considerar o hidrogênio verde como importante fator da transição energética, mas também objeto de oportunidades econômicas. Recentemente o governo publicou e aprovou uma resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) que institui o Programa Nacional do Hidrogênio, com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio enquanto vetor energético no Brasil e cria o Comitê Gestor da política pública (GOV, 2022; UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

O Ministério de Minas e Energia (MME), com contribuição dos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Desenvolvimento Regional (MDR), com o apoio

técnico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), apresentou a Proposta de Diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, as diretrizes do programa estão constituídos em seis eixos, que compreendem o fortalecimento das bases científico-tecnológicas, a capacitação de recursos humanos, o planejamento energético, o arcabouço legal e regulatório-normativo, a abertura e crescimento do mercado, além da competitividade e da cooperação internacional (EPE, 2022a; UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

Os investimentos divulgados para construção de usinas produtoras de H2V no Brasil já totalizam mais de US\$ 27 bilhões, a maioria localizados em portos – Pecém, no Ceará; Suape, em Pernambuco; e Açú, no Rio de Janeiro. A escolha desses locais implica numa série de benefícios e quesitos estratégicos para o desenvolvimento da nova cadeia do H2V, como logística para exportação, proximidade de polos industriais e de fontes de energia renovável, utilizada na eletrólise para sintetização do H2V (IPEA, 2022). No Quadro 5, é apresentado os projetos a serem desenvolvidos em território brasileiro.

Quadro 5 – Projetos e investimentos confirmados no Brasil de hidrogênio verde

País	Empresa	Valores previstos (US\$)	Local de investimento
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Enegix Energy	5,4 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Qair	6,95 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Portugal	EDP do Brasil	8 milhões	Porto do Pecém, Ceará
França	Engie	-	Porto do Pecém, Ceará
Espanha	Neoenergia	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	White Martins	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Linde	-	Porto do Pecém, Ceará

País	Empresa	Valores previstos (US\$)	Local de investimento
França	TotalEnergies	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Eneva	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Diferencial Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Alemanha	Hytron	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	H2helium Energia	-	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Abreu e Lima (RNEST)	-	Porto de Suape, Pernambuco
Espanha	Neoenergia	-	Porto de Suape, Pernambuco
França	Qair	3,8 bilhões	Porto de Suape, Pernambuco
Reino Unido	Enterprize Energy	-	Rio Grande do Norte
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Porto do Açu, Rio de Janeiro
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí
Canadá	AmmPower	-	Espírito Santo
Alemanha	Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit)	39 milhões	Universidade Federal de Itajubá (Unifei), Minas Gerais
Brasil	Cummins New Power	33 milhões	São Paulo
Brasil	Unipar	19,4 milhões	Santo André, São Paulo
Alemanha	Siemens Energy	135,7 mil	-

Fonte: IPEA (2022)

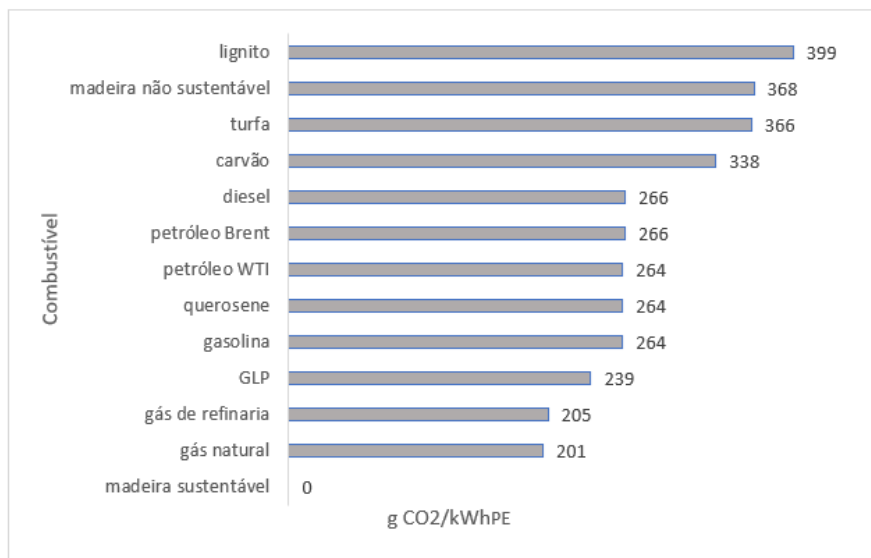
4.3 Emissão de CO₂

A emissão de CO₂ para geração de energia bateu recorde no ano de 2021, o elevado índice de emissão foi impulsionado pela necessidade de recuperação econômica pós-pandêmica. O aumento foi de 6% em relação ao ano de 2020, totalizando 36,3 gigatoneladas (Gt) de CO₂ emitido. O principal combustível responsável por esse aumento de emissão foi o carvão, representando mais de 40% do crescimento geral das emissões globais de CO₂ em 2021 (IEA, 2022a).

O carvão, assim como outros combustíveis, em especial os combustíveis fósseis, apresen-

tam emissão de CO₂ no seu processo de combustão. O índice de dióxido de carbono emitido pode variar conforme a composição, propriedades físico-químicas do combustível e características do processo, como a eficiência de geração da usina (QUASCHNING, 2021). Na imagem abaixo, pode-se observar a quantidade de CO₂ emitido de acordo com o combustível utilizado.

Figura 16 – Emissão de dióxido de carbono de diferentes combustíveis



Fonte: Volker Quaschnig (2021)

Desde meados do século XVIII, com o advento da Revolução Industrial, os combustíveis fósseis apresentaram grande relevância no processo de industrialização mundial, sendo também, os principais responsáveis pelas emissões de CO₂ e outros Gases de Efeito Estufa (GEE). A utilização destes combustíveis resultou num aumento de 31% nas concentrações de CO₂ na atmosfera terrestre (FONSECA, 2022).

O Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change), indica que até 2100 os níveis de CO₂ na atmosfera terrestre podem atingir o dobro dos parâmetros anteriores à Revolução Industrial, ocasionando o aumento da temperatura do globo terrestre em 1,5°C, podendo atingir até 5,8°C de aumento, tal alteração pode resultar em catástrofes ambientais imensuráveis (FONSECA, 2022).

Diferente dos combustíveis fósseis, o hidrogênio verde não emite gases poluentes nos processos de produção e combustão. No processo de eletrólise, em que ocorre a dissociação das moléculas de água, os únicos produtos são hidrogênio e oxigênio. Sendo um importante aliado na redução de emissão de gases poluentes e transição energética (FONSECA, 2022).

5 Conclusão

O presente Trabalho de Conclusão de Curso avaliou toda a cadeia energética do hidrogênio verde, incluindo aspectos da produção do combustível, mediante processo de eletrólise, características do transporte e armazenamento, assim como as principais aplicações do material. Adicionalmente, foram abordados o cenário atual e as perspectivas de mercado para o hidrogênio verde, assim como a sua importante participação na descarbonização do meio ambiente.

A transição energética e processo de descarbonização da economia global, como forma de redução da dependência econômica de combustíveis fósseis e adoção de um consumo mais sustentável, é uma medida não só necessária como obrigatória para a garantia de um futuro promissor economicamente e ambientalmente favorável. Pode-se concluir que o hidrogênio verde é então, uma alternativa viável para colaborar com o atingimento dessas metas.

O hidrogênio verde é caracterizado como um combustível 100% sustentável, devido a ausência de emissão de gases poluentes durante os processos de produção e combustão, trata-se também de um combustível versátil, podendo ser armazenado nos estados sólido, líquido e gasoso, além da versatilidade no armazenamento, o hidrogênio verde possui ampla aplicabilidade, podendo ser convertido em eletricidade ou combustíveis sintéticos, como a amônia, e utilizado com finalidades comerciais, industriais e de mobilidade.

No entanto, o hidrogênio verde é uma fonte de energia com utilização e investimento recente, sendo necessário melhorias em alguns aspectos, como a redução do custo de produção, redução do gasto de energia, otimização dos processos de transporte e armazenamento, a fim de atender às características do hidrogênio, elevada volatilidade e inflamabilidade, que podem ocasionar escapamento do combustível e explosões.

O hidrogênio verde tem recebido atenção especial e investimento em todos os continentes do mundo, projetos e usinas estão em desenvolvimento, com início das operações programadas para os próximos anos, dessa forma conclui-se que a sua participação na matriz energética global tende a sofrer um grande avanço, justificando o título que tem recebido, o combustível do futuro.

Referências

- ALMEIDA, A. S. de *et al.* Hidrogênio, o combustível do futuro. **Diversitas Journal**, Santana do Ipanema/ AL, v. 4, n. 2, p. 356 – 366, mai/ ago 2019. ISSN 2525-5215. Acesso em: 17/06/2022.
- AMARAL, M. M. do. **Avaliação técnica do transporte e do armazenamento de hidrogênio visando a descarbonização do sistema energético nacional**. 2021. 107 p. Dissertação (Engenharia Mecânica - Mecatrônica) — Universidade Nova de Lisboa.
- AMBIENTE BRASIL. **Armazenamento de Hidrogênio**. 2021. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html. Acesso em: 21 de ago. de 2022.
- APROBIO. **Você sabe o que é o Efeito Estufa?** 2019. Disponível em: <https://aprobio.com.br/noticia/voce-sabe-o-que-e-o-efeito-estufa>. Acesso em: 29 de out. de 2022.
- AQUAVENTUS. **The green energy revolution starts in the North Sea**. 2020. Disponível em: <https://aquaventus.org/en/>. Acesso em: 26 de nov. de 2022.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Australia's National Hydrogen Strategy**. 2022. Disponível em: <https://www.dcccew.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.
- BARBOSA, H. A. **PROCESSOS DE PRODUÇÃO E ESTOCAGEM DE HIDROGÊNIO: UMA REVISÃO DA LITERATURA**. 2020. 81 p. Monografia (Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Acesso em: 17/06/2022.
- BARROSO, A. M. R. *et al.* **Obtenção de Hidrogênio Verde a partir de energias renováveis**. 2022. Disponível em: <https://cet.edu.br/files/pages/95/artigo.pdf>. Acesso em: 30 de jun. de 2022.
- BBC. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro'**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 18 de nov. de 2022.
- BEN. EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.b>. Acesso em: 30 de out. de 2022.
- BERNAL, N. G. Matriz energética y eléctrica en Chile. **Biblioteca del Congreso Nacional de Chile**, 2021.
- BERTUCCIOLI, L. *et al.* **Study on development of water electrolysis in the EU**. 2014. Disponível em: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0.pdf. Acesso em: 10 de jul. de 2022.
- BNAMERICAS. **Hidrogênio verde: a situação na América Latina e os líderes em projetos**. 2022. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/pt/feature/hidrogenio-verde-a-situacao-na-america-latina-e-os-lideres-em-projetos>. Acesso em: 18 de nov. de 2022.
- BOLSON, S. H.; ARAÚJO, S. F. de. As Metas Brasileiras ao Acordo de Paris sobre as Mudanças Climáticas e o Desmatamento Ilegal no Bioma Cerrado: a Omissão do Estado Brasileiro. **RELPE: Revista Leituras em Pedagogia e Educação**, v. 5, n. 1, p. 144 – 158, Jun 2022.

BP AUSTRALIA. **Renewable energy hub in Australia**. Disponível em: https://www.bp.com/en_au/australia/home/who-we-are/reimagining-energy/decarbonizing-australias-energy-system/renewable-energy-hub-in-australia.html. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

CAMARGO, C. A. D. **Catalisadores contendo metais de transição sobre estruturas de nitrogênio e carbono para produção de hidrogênio por meio da eletrólise de água salgada**. 2021. 177 p. Dissertação (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo. Acesso em: 17/06/2022.

CHIOCA, M. F. **As Estratégias de Internacionalização das Empresas de Energia Solar: a influência do Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris**. 2022. 71 p. Monografia (RELAÇÕES INTERNACIONAIS) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

CLEAN ENERGY WIRE. **Germany's energy consumption and power mix in charts**. 2022. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>. Acesso em: 23 de nov. de 2022.

CNN BRASIL. **Risco-país: saiba o que é e como ele afeta os investimentos**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/risco-pais-saiba-o-que-e-e-como-ele-afeta-os-investimentos/>. Acesso em: 18 de nov. de 2022.

COAG ENERGY COUNCIL HYDROGEN WORKING GROUP. **AUSTRALIA'S NATIONAL HYDROGEN STRATEGY**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

CPG. **Quais os perigos do hidrogênio?** 2022. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/blog/hidrogenio/quais-os-perigos-do-hidrogenio/#:~:text=Armazenamento%20de%20hidrog%C3%AAnio%20pode%20causar%20riscos&text=Entretanto%2C%20por%20ser%20mais%20vol%C3%BAvel,riscos%20no%20armazenamento%20de%20hidrog%C3%AAnio>. Acesso em: 22 de dez. de 2022.

CRIZOL, A. A. Z. **GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à combustão**. 2020. 53 p. Monografia (Engenharia Mecânica) — CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS.

CUNHA, P. C. R. da. **ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DO SURFACTANTE DODECIL SULFATO DE SÓDIO A PARTIR DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA ACOPLADA À INJEÇÃO DE OXIGÊNIO GERADO IN LOCO POR ELETRÓLISE ALCALINA DA ÁGUA INDUZIDA POR ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**. 2021. 121 p. Tese (Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia.

DS NEW ENERGY. **Os 27 maiores projetos de hidrogênio verde em escala de Gigawatt**. 2022. Disponível em: <https://pt.dsisolat.com/info/the-27-largest-gigawatt-scale-green-hydrogen-p-76893346.html>.

ECYCLE. **O que são os gases do efeito estufa?** 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 29 de out. de 2022.

ENERGY INTELLIGENCE. **Saudi Arabia's Energy Transition Ramps Up**. 2022. Disponível em: <https://www.energyintel.com/00000183-45f9-dcbb-a1b7-4dfbc9ad0000>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

ENGIE: ALÉM DA ENERGIA. **Saiba como o hidrogênio se transforma em combustível.** 19 de out. de 2020. Disponível em: <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/saiba-como-o-hidrogenio-se-transforma-em-combustivel/#:~:text=Estas%20o%20classificam%20conforme%20a,carbono%2C%20temos%20o%20hidrog%C3%AAnio%20azul>. Acesso em: 25 de jun. de 2022.

EPBR. **Meta do Chile é produzir hidrogênio verde mais barato do mundo, afirma ministro Juan Carlos Jobet.** 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/meta-do-chile-e-produzir-hidrogenio-verde-mais-barato-do-mundo-afirma-ministro-juan-carlos-jobet/>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

EPE. **MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).** 2022a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2-#:~:text=As%20diretrizes%20do%20programa%20est%C3%A3o,competitividade%20e%20da%20coopera%C3%A7%C3%A3o%20internacional>. Acesso em: 29 de nov. de 2022.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 30 de out. de 2022.

FAST COMPANY. **Construction on NEOM's green hydrogen project with \$900 EPC contract has begun.** 2022. Disponível em: <https://fastcompany.me.com/news/construction-on-neoms-green-hydrogen-project-with-900-epc-contract-has-began/#:~:text=Construction%20on%20NEOM's%20green%20hydrogen%20project%20with%20%24900%20EPC%20contract%20has%20begun,-%5BSource%20photo%3A%20NEOM&text=Saudi%20utility%2C%20ACWA%20Power%20International,globally%20in%20NEOM's%20Oxagon%20region>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH. **National Hydrogen Strategy: Green hydrogen as energy source of the future.** 2022. Disponível em: <https://www.bmbf.de/bmbf/en/news/national-hydrogen-strategy.html#:~:text=The%20National%20Hydrogen%20Strategy%20integrates,to%20become%20a%20new%20brand>. Acesso em: 23 de nov. de 2022.

FERREIRA, M. A. **Utilização de Fontes de Energia Renováveis para a Produção de Hidrogênio.** 2022. 118 p. Dissertação (Engenharia Eletrotécnica) — Instituto Politécnico de Coimbra.

FIGUEIREDO, B. B.; CESAR, F. I. G. **HIDROGÊNIO COMO FONTE ALTERNATIVA DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA EXPLORATÓRIA.** *REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE*, v. 1, n. 6, p. 1 – 19, 2021. ISSN 2763-8928.

FONSECA, R. G. da. **A era do hidrogênio verde no século XXI.** *REVISTA INOVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO*, v. 1, n. 8, p. 40 – 45, 2022.

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico:** Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu. 2010. 163 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas.

GÓES, G. S. **A Geopolítica da Energia no Século XXI.** [S.l.]: Synergia, 2021.

GOMES, J. **Eletrolise da água na obtenção de hidrogênio.** *Revista de Ciência Elementar*, v. 10, n. 2, 2022.

GOMES, W. Z. **Elaboração de protocolo de testes para células a combustível Portáteis**. 2011. 101 p. Dissertação (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA PRODETEC) — IEP-INSTITUTO DE ENGENHARIA DO PARANÁ.

GOV. **DESPACHO DO PRESIDENTE DA REPÚBLICA**. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-419972141>. Acesso em: 29 de nov. de 2022.

HYRESOURCE. **Asian Renewable Energy Hub**. 2022a. Disponível em: <https://research.csiro.au/hyresource/asian-renewable-energy-hub/>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

HYRESOURCE. **Western Green Energy Hub**. 2022b. Disponível em: <https://research.csiro.au/hyresource/western-green-energy-hub/>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

IBERDROLA. **Iberdrola investirá quase EUR 3 bilhões na Austrália para liderar a transição energética**. 2021. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/quem-somos/iberdrola-australia#:~:text=AUSTR%C3%81LIA%3A%20UM%20MERCADO%20EM%20CRESCIMENTO&text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20renov%C3%A1vel,a%20biomassa%20compondo%20o%20restante>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

IEA. **Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021**. 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>. Acesso em: 03 de dez. de 2022.

IEA. **World Energy Outlook 2021**. 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Acesso em: 04 de nov. de 2022.

IFB. **Aquecimento Global**. 2020. Disponível em: https://www.ibflorestas.org.br/aquecimento-global?utm_source=google-ads&utm_medium=cpc&utm_campaign=nativas-cpa&keyword=aquecimento%20global&creative=367878241909&gclid=Cj0KCQjwnvOaBhDTARIsAJf8eVMl8kDbKJpL2NMZI-Aq0_4dhjz6i6GXUN3YVpIYwXxV0glm9NLUqLUaAoCYEALw_wcB. Acesso em: 10 de out. de 2022.

INTERCONTINENTAL ENERGY. **Asian Renewable Energy Hub**. 2022. Disponível em: <https://intercontinentalenergy.com/asian-renewable-energy-hub>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION. **NETHERLANDS GREEN HYDROGEN ENERGY**. 2022a. Disponível em: <https://www.trade.gov/market-intelligence/netherlands-green-hydrogen-energy>. Acesso em: 22 de nov. de 2022.

INTERNATIONAL TRADE ADMINISTRATION. **This is a best prospect industry sector for this country. Includes a market overview and trade data**. 2022b. Disponível em: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/netherlands-energy>. Acesso em: 22 de nov. de 2022.

IPEA. **PANORAMA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 29 de nov. de 2022.

- KNOB, D. **Geração de Hidrogênio por Eletrólise da Água Utilizando Energia Solar Fotovoltáica**. 2013. 125 p. Dissertação (Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) — Universidade de São Paulo - USP. Acesso em: 05 de jul. de 2022.
- LEITE, J. M. D. S. **Avaliação de fugas de um sistema de armazenamento de hidrogênio**. 2021. 103 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- LINS, P. H. C. **ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DE RISCOS EM GASODUTOS DE HIDROGÊNIO**. 2013. 60 p. Dissertação (ENGENHARIA DE PRODUÇÃO) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.
- MARTINS NETO, J. H. POSSIBILIDADES PARAUTILIZAÇÃO DE PLANTAS HELIOTÉRMICAS PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE VIA ÁGUA DESSALINIZADA. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Florianópolis: [s.n.], 2022.
- NIAZ, S.; MANZOOR, T.; PANDITH, A. H. Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. **Elsevier**, v. 50, p. 457 – 469, 2015.
- NIERMANN, M. *et al.* Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 44, p. 6631 – 6654, March 2019.
- NORTH2. **Kickstarting the green hydrogen economy**. 2020. Disponível em: https://www-north2-eu.translate.google/?_x_tr_sl=nl&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=sc. Acesso em: 23 de nov. de 2022.
- OLIVEIRA, A. C. M. D. **ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM PALÁDIO E HIDRETOS METÁLICOS**. 2018. 98 p. Tese (Química Teórica - Computacional) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.
- OLIVEIRA, J. R. D. **DESCARBONIZAÇÃO DA UNIDADE FABRIL DA MITSUBISHI FUSO TRUCK EUROPE COM USO DO HIDROGÊNIO VERDE**. 2021. 131 p. Dissertação (ENGENHARIA DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS) — Universidade NOVA de Lisboa.
- ONISHI, N. *et al.* Recent progress for reversible homogeneous catalytic hydrogen storage in formic acid and in methanol. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 373, p. 317 – 332, Oct 2018.
- PAIVA, S. da Silva Mendonça de. **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL**. 2022. 112 p. Dissertação (Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- PALHARES, D. D. de F. **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar**. 2016. 121 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia.
- PETROBRAS. **Pré-sal: Produção de petróleo e gás natural**. 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/busca/#?cludoquery=Campo%20de%20Petr%C3%B3leo%20Offshore%20de%20Lula&cludopage=1&cludorefurl=https%3A%2F%2Fpetrobras.com.br%2Fpt%2F&cludorefpt=P%C3%A1gina%20Inicial%20%7C%20Petrobras&cludoinputtype=standard>. Acesso em: 22 de dez. de 2022.
- PETROFAC. **Arrowsmith - one of the world's first green hydrogen projects**. 2022. Disponível em: <https://www.petrofac.com/services/our-work/front-end-engineering-arrowsmith-hydrogen-project-infinite-blue-energy-group-australia/>. Acesso em: 21 de nov. de 2022.

PINHO, L. L. R. de. **AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE EXCEDENTES DE ENERGIA EÓLICA UTILIZANDO ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVO**. 2017. 234 p. Dissertação (Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PORTAL ENERGIA. **Energia Eólica**. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/energia-eolica/>. Acesso em: 21 de ago. de 2022.

PORTAL HIDROGÊNIO VERDE. **O que é Hidrogênio Verde? Sobre o Hidrogênio Verde e as Tecnologias PtX**. 2021. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/o-que-e-hidrogenio-verde/#:~:text=Hidrog%C3%AAnio%20Verde%20%C3%A9%20aquele%20produzido,sem%20emiss%C3%A3o%20de%20CO2>. Acesso em: 15 de ago. de 2022.

PORTAL SOLAR. **O que é energia solar? Tudo o que você precisa saber**. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-energia-solar.html>. Acesso em: 21 de ago. de 2022.

POVEDA, G. I. D. **ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM LIGAS METÁLICAS A BASE DE MAGNÉSIO**. 2007. 233 p. Tese (ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

QUASCHNING, V. **REGENERATIVE ENERGIESYSTEME**. [S.l.]: Hanser, 2021. ISBN 978-3-446-47163-4.

REVISTA FORUM. **A transição energética na China**. 2022. Disponível em: https://www.google.com/search?q=matriz+energ%C3%A9tica+da+china&bih=625&biw=1366&hl=pt-BR&sxsrf=ALiCzsbXXAV1i8TLpRye4aXWhkhI4Scelg%3A1669512850269&ei=kr6CY6SMENDW1sQP9q2IgAo&oeq=matriz+energ%C3%A9tica+da+c&gs_lcp=Cgxnd3Mtd2l6LXNlcnAQAxgAMgUIABCABDIFCAAQgAQyCAGAEbYQHhAPMgYIABAWEB4yBggA&gws-wiz-serp. Acesso em: 26 de nov. de 2022.

RODRIGUES, R. P.; SOUZA, J. E. S.; TAMBOR, J. H. M. AS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO: SUAS APLICAÇÕES NO SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL EM EQUILÍBRIO COM O MEIO AMBIENTE. **Brasil Para Todos - Revista Internacional**, v. 7, n. 1, p. 15 – 28, Out 2019a.

RODRIGUES, R. P.; SOUZA, J. E. S.; TAMBOR, J. H. M. AS CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO: SUAS APLICAÇÕES NO SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL EM EQUILÍBRIO COM O MEIO AMBIENTE. **Brasil Para Todos - Revista Internacional**, v. 7, n. 1, p. 15 – 26, Out 2019b.

ROSSI, R. A. da S. *et al.* Produção de hidrogênio via eletrólise alcalina utilizando painel fotovoltaico como fonte de energia. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 15223 – 15229, Fev 2022. ISSN 2525-8761. Acesso em: 10 de set. de 2022.

RWE. **NorthH2**. Disponível em: https://www-rwe-com.translate.goog/en/research-and-development/hydrogen-projects/north2?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=sc. Acesso em: 23 de nov. de 2022.

SCMP. **China building world's largest 'green hydrogen' factory**. 2022. Disponível em: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3188751/china-building-worlds-largest-green-hydrogen-factory>. Acesso em: 26 de nov. de 2022.

SIEMENS ENERGY. **Soluções de Hidrogênio**. 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/br/pt/solucoes/energia-renovavel/solucoes-de-hidrogenio.html>. Acesso em: 03 de nov. de 2022.

SINGH, G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. **Elsevier**, v. 53, p. 1 – 13, may 2013.

UFRGS. **MOTORES A EXPLOÇÃO: 2 TEMPOS**. 2009a. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/motores2t.htm>. Acesso em: 18 de set. de 2022.

UFRGS. **Motores de Combustão Interna**. 2009b. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/combustao_interna.htm. Acesso em: 18 de set. de 2022.

UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA. **Brasil pode se tornar maior hub de exportação de hidrogênio verde do mundo**. 2022. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2022/09/08/brasil-pode-se-tornar-maior-hub-de-exportacao-de-hidrogenio-verde-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA. **China aprova megaprojeto de energia renovável para produção de hidrogênio verde**. 2021. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2021/08/19/china-aprova-megaprojeto-de-energia-renovavel-para-producao-de-hidrogenio-verde.ghtml>. Acesso em: 26 de nov. de 2022.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410 – 426, Feb 2012. Acesso em: 10 de jul. de 2022.

URSÚA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410 – 426, 2012.

VERA, G. A. C. **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA INTEGRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN PROCESOS DE PLANTA DE BEBIDAS CONGLOMERADAS EN CHILE**. 2022. 82 p. Monografia (FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS) — UNIVERSIDAD DE CHILE.

WEBMOTORS. **Como funciona o motor a combustão interna**. 2020. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/wm1/dicas/como-funciona-um-motor-a-combustao-interna>. Acesso em: 18 de set. de 2022.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. TECNOLOGIA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL. **QUÍMICA NOVA**, v. 23, n. 4, p. 538 – 546, ago 2000.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307 – 326, 2010.

ZEROCO2.NO. **Petrobras Miranga CO2 Injection**. 2017. Disponível em: <http://www.zeroco2.no/projects/petrobras-ccs>. Acesso em: 22 de dez. de 2022.