

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LAYSE DE PAULA GUIMARÃES BITENCOURT**

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO  
DE HIDROGÊNIO VERDE**

**Bagé**

**2023**

**LAYSE DE PAULA GUIMARÃES BITENCOURT**

**ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO  
DE HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Dra. Sabrina Neves da Silva

**Bagé**

**2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B624a Bitencourt, Layse de Paula

Análise bibliométrica e projeto de um sistema de geração de  
hidrogênio verde / Layse de Paula Bitencourt.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2023.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. energias renováveis. 2. hidrogênio verde. 3. energia  
solar. 4. eletrolisador. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

## LAYSE DE PAULA GUIMARÃES BITENCOURT

### ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA E PROJETO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 08 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Dra. Luciana Machado Rodrigues  
UNIPAMPA

---

Prof. Dra. Maria Regina de Oliveira Casartelli  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/02/2023, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA MACHADO RODRIGUES, Usuário Externo**, em 08/02/2023, às 20:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARIA REGINA DE OLIVEIRA CASARTELLI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/02/2023, às 21:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1047704** e o código CRC **F5A745A1**.

## **AGRADECIMENTO**

Gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe, poucas mães fariam o que você faz por mim diariamente, toda ajuda, todo carinho e todo amor que sempre me deu. E também meu pai, meu irmão e a Mara. A minha melhor amiga Ana Flávia, que distância nunca representou nada para gente. As amigadas que me ajudaram a passar por esse caminho tão difícil que foi a vida universitária, longe da minha terra, da minha família, Wandressa e Rodrigo.

Mas esse TCC está de fato acontecendo por causa de 3 pessoas. Sem elas eu não estaria escrevendo este agradecimento e elas merecem muito essa dedicatória. Primeiramente, minha orientadora Sabrina Neves, de verdade muito obrigada por ser minha orientadora, o que você fez por mim, eu não consigo nem explicar e nem agradecer o suficiente, por ser compreensiva e maravilhosa. Ao meu namorado, Raphael, que em cada momento de dúvida estava ao meu lado. E a minha psicóloga, que vem mudando de caixinha em caixinha minha vida. Dedico a vocês esse trabalho, ele é muito mais de vocês que meu.

*“Se estiver se sentindo desmotivado ou sentindo que não é bom o suficiente, incendeie o seu coração, enxugue as lágrimas e siga em frente”.*

*Rengoku, Kimetsu no Yaiba*

## RESUMO

As mudanças climáticas, agravadas pelo aumento das emissões de gases do efeito estufa (GEE), motivam pesquisas relacionadas à descarbonização de todos os setores da economia. No setor elétrico, as tecnologias apresentadas como centrais na transição para uma economia com menos carbono se baseiam na expansão da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, o hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), assim chamado quando produzido a partir de fontes renováveis como eólica, fotovoltaica e hidrelétrica surge como alternativa promissora. Ainda existem desafios a serem superados, principalmente os relacionados ao custo de produção, os quais ainda são superiores ao hidrogênio obtido de fontes fósseis. Contudo, devido à expansão dos sistemas de geração fotovoltaica e eólico brasileiro, espera-se uma tendência de uso de H<sub>2</sub>V competitiva. Com base nesses aspectos, este trabalho tem como objetivos: i) realizar uma revisão bibliométrica buscando por trabalhos que estão sendo publicados no Brasil e no mundo que relacionam sobre produção de H<sub>2</sub>V com energia fotovoltaica analisando-se os documentos encontrados base *Scopus* e ii) elaborar um projeto piloto de produção de H<sub>2</sub>V tendo como fonte de energia o excedente gerado em instalações fotovoltaicas da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé. Na base de dados *Scopus* foram encontrados 4714 documentos contendo os termos “*hydrogen*” and “*photovoltaic*” publicados de 2002 a 2022, sendo 57 publicados por instituições brasileiras. Evidenciou-se um crescimento do número de publicações no período analisado. Considerando-se o excedente de 5kWp, pelo projeto aqui proposto, estimou-se uma geração de 43,2 L/dia de H<sub>2</sub>V o qual poderá ser utilizado para ajudar a enfrentar vários desafios energéticos críticos, oferecendo maneiras de descarbonizar uma gama de setores – incluindo transporte de longa distância, indústria de produtos químicos e indústrias de ferro e aço –, em que está provado ser difícil reduzir as emissões de forma significativa. Também pode ajudar a melhorar a qualidade do ar e fortalecer a segurança energética.

Palavras-chave: energias renováveis, hidrogênio verde, eletrolisador, energia solar.

## ABSTRACT

The climate change, aggravated by the increase in greenhouse gas (GHG) emissions, motivate research related to the decarbonization of all sectors of the economy. In the electricity sector, the technologies developed as central to the transition to an economy with less carbon are based on the expansion of electricity generation from renewable sources. In this context, green hydrogen (GH<sub>2</sub>), so called when produced from renewable sources such as wind, hydroelectric and electrical photovoltaics, emerges as a promising alternative. There are still challenges to be overcome, mainly those related to the cost of production, which are still higher when obtaining fossil sources. However, due to the expansion of brazilian photovoltaic and wind generation systems, a trend towards the use of competitive GH<sub>2</sub> is expected. Based on these aspects, this work aims to: i) carry out a bibliometric review of the literature, searching for works that are being published in Brazil and in the world that relate the production of GH<sub>2</sub> with photovoltaic energy, analyzing the documents found in the *Scopus* database and ii) develop a pilot project for the production of GH<sub>2</sub> using surplus generated in photovoltaic installations at the Federal University of Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé, as an energy source. In the *Scopus* database, 4714 documents were found containing the terms “hydrogen” and “photovoltaic” published from 2002 to 2022, 57 of which were published by Brazilian institutions. There was an increase in the number of publications in the analyzed period. Considering the surplus of 5kWp, by the standard design here, it is estimated a generation of 43.2 L/day of GH<sub>2</sub> which can be used can help to face several innovative energy challenges, offering ways to decarbonize a range of sectors – including long distance transport, chemicals and iron and steel – where it is proving difficult to significantly reduce emissions. It can also help improve air quality and strengthen energy security.

Keywords: renewable energies, green hydrogen, electrolyser, solar energy.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Produção mundial dos derivados do petróleo .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2 - Produção mundial de geração hidrelétrica .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3 – Produção de hidrogênio e seus meios .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4 – Planta do processo convencional de reforma a vapor de metano.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 5 – Forno reformador com queimador no topo.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 6 - Representações esquemáticas do tubo de um forno reformador .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7 – Representação dos componentes internos do forno reformador .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8 - Processo de gaseificação em uma planta IGCC.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 9 - Representação esquemática da eletrólise alcalina .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 10 - Representação esquemática da eletrólise PEM.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 11 – Representação do eletrolisador de óxido sólido .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 12 – Comparação dos sistemas eletrolíticos.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 13 - Espectro da radiação solar.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 14 – Relação do Sol-Terra .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 15 - Variação da irradiância solar total .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 16 – Radiação Solar Sobre uma Determinada Área .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 17 – Perfil de Irradiância .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 18 – Universidade Federal do Pampa, Bagé/RS .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 19 – Eletrolisador HyPEM XP HOME .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 20 – Sistema de Compressão (Hy-COMP XT HP).....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 21 - Esquematização do sistema composto por painéis solares e eletrolisador ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 22 – Fluxograma da produção diária de hidrogênio.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 23 - Produção diária de hidrogênio Campus Bagé .....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 - Matriz energética mundial .....</b>	<b>18</b>
<b>Gráfico 2 - Matriz elétrica brasileira .....</b>	<b>21</b>
<b>Gráfico 3 - Evolução da geração solar fotovoltaica .....</b>	<b>22</b>
<b>Gráfico 4 - Demanda global de hidrogênio por tecnologia de produção ou insumos.....</b>	<b>25</b>
<b>Gráfico 5 – Publicações no mundo.....</b>	<b>48</b>
<b>Gráfico 6 - Publicações no Brasil .....</b>	<b>49</b>
<b>Gráfico 7 - Número de Publicações por País.....</b>	<b>50</b>
<b>Gráfico 8 - Publicação por Filiação .....</b>	<b>50</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABH<sub>2</sub> - Associação Brasileira de Hidrogênio

*aq* - aquoso

BEN – Balanço Energético Nacional

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CENEH – Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio

CCS - *Carbon Capture and Storage*

CCU - *Carbon Captured and Utilisation*

CO – Monóxido de Carbono

COS – Cosseno

*e*<sup>-</sup> - Elétron

EPE – Empresa de Pesquisa ENergética

*g* - Grama

GEE – Gases de Eleito Estufa

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

Gon - Radiação Extraterrestre

Gsc - Constante Solar

GWh – Gigawatts-hora

H<sub>2</sub>V – Hidrogênio Verde

IEA – *International Energy Agency*

IGCC – *Integrated Gasification Combined Cycle*

IPHE – *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*

kg/s – Quilograma por segundo

$\text{kJ/kg}$  – Quilojoule por Quilograma

$\text{kJ/mol}$  – Quilojoule mol

H – Hidrogênio

$\text{H}^+$  - Íon Hídron

I – corrente

KOH – Hidróxido de Potássio

$\text{kWp}$  – KiloWatt pico

l – Líquido

*liq* – Líquido

$\text{LHVH}_2$  – *Lower Heating Value of Hydrogen*

$\dot{m}$  - Vazão Mássica

$\text{mA/cm}^2$  - Miliampere por Centímetro Quadrado

MPa - Megapascal

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MME - Ministério de Minas e Energia

$\text{Mt CO}_2\text{eq}$  – Milhões de Toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente

$\text{Mtep}$  – Milhões de Toneladas de Petróleo Equivalente

$\text{O}^-$  - Íon Óxido

$\text{OH}^-$  - Íon Hidróxido

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PEM – *Proton Exchange Membrane*

pH - Potencial Hidrogeniônico

PROCaC - Programa Brasileiro de Células a Combustível

$\text{ProH}_2$  - Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio

PN – Junção P-N

PNE – Plano Nacional de Energia

PNE 2050 – Plano Nacional de Energia 2050

$R^2$  - Coeficiente de determinação

Si – Silício

Tep - Tonelada Equivalente de Petróleo

TWh – Terawatts-hora

TSI – *Total Solar Irradiance*

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

UnB - Universidade de Brasília

USGAMP - Unidades de Separação de Gases por Adsorção com Modulação da Pressão

USP - Universidade de São Paulo

V – Voltagem

WIC<sub>a</sub>C - Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível

$\Delta H$  – Variação de entalpia

$\eta$ eletrólise – Eficiência da Eletrólise

$\pi$  – pi

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Configuração da matriz energética brasileira</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Hidrogênio: Vetor Energético</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.1 Histórico do H<sub>2</sub> no Brasil</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.2 Evolução e Projeção de Hidrogênio no Mundo</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3 Principais Métodos para Produção de Hidrogênio</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3.1 Reforma a Vapor do Metano</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.2 Gaseificação</b> .....	<b>29</b>
<b>2.3.3 Eletrólise</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3.4 Tipos de Eletrolisadores</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.4.1 Eletrolisador Alcalino Unipolar e Bipolar</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.4.2 Eletrolisador de Membrana de troca protônica (PEM)</b> .....	<b>33</b>
<b>2.3.4.3 Eletrolisador de Óxido Sólido</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4 Armazenamento e transporte de hidrogênio</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5 Energia solar fotovoltaica</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5.1 Radiação Solar</b> .....	<b>36</b>
<b>2.5.2 Irradiância/Irradiação</b> .....	<b>39</b>
<b>2.5.4 Efeito Fotovoltaico</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5.5 Tecnologias Fotovoltaicas</b> .....	<b>41</b>
<b>2.6 Perspectivas e desafios</b> .....	<b>42</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>44</b>
<b>3.1 Revisão Bibliométrica</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2 Estudo de caso</b> .....	<b>44</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>48</b>
<b>4.1 Revisão Bibliométrica</b> .....	<b>48</b>
<b>4.2 Estudo de caso</b> .....	<b>51</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Planejamento Anual da Operação Energética - Ciclo 2022 (2022-2026) publicado em novembro de 2021 pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), em conjunto com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para o período 2022-2026, a expectativa de crescimento médio da carga de produção de energia no Brasil é de 3,4% por ano. Além disso, como consequência do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, espera-se um aumento no consumo de água, servindo de alerta ao atual cenário de desperdício hídrico e de frequentes contaminações das águas subterrâneas (CCEE, 2021).

Em 2021, a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) atingiu 301,5 Mtep (milhões de toneladas de petróleo equivalente), registrando um avanço de 4,5% em relação ao ano anterior. A tonelada equivalente de petróleo (tep) é a unidade comum na qual se convertem as unidades de medida das diferentes formas de energia utilizadas no Balanço Energético Nacional (BEN). Ainda em 2021, a participação de renováveis na matriz energética foi marcada pela queda da oferta de energia hidráulica, associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas. No entanto, o incremento das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica e o biodiesel contribuíram para que a matriz energética brasileira se mantivesse em um patamar renovável de 44,7% (BEN, 2022).

Em 2021, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 445,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (Mt CO<sub>2eq</sub>), sendo a maior parte (197,8 Mt CO<sub>2eq</sub>) gerada no setor de transportes. Isso devido ao uso generalizado de energia não renovável na matriz energética brasileira e mundial (BEN, 2022).

O Acordo de Paris, firmado no ano de 2015, rege medidas de redução de emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e teve por objetivos fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos gerados por essa mudança. Assim, diante da expansão de oferta de energia e da necessidade de descarbonização mundial como alternativa para este panorama, tem-se o hidrogênio (H<sub>2</sub>) (CCEE, 2021).

A expressão “Economia do Hidrogênio” tem sido utilizada para descrever um novo paradigma econômico baseado no H<sub>2</sub> como vetor energético e não mais numa economia dependente quase exclusivamente de recursos não-renováveis, como o petróleo e seus derivados (BEZERRA, 2021).

O  $H_2$  possui poder calorífico elevado por unidade de massa e, por não conter carbono em sua molécula, se torna um recurso energético atraente para vários dispositivos de energia (como o motor de combustão interna a turbina a gás e a célula de combustível). Além disso, o  $H_2$  pode ser transportado no estado sólido, líquido, gasoso e/ou via produtos químicos em longas distâncias, criando conexões entre oferta e demanda, e aumentando a flexibilidade do sistema energético. Dessa forma, esse composto tem a capacidade de atuar como um integrador entre a produção de energia elétrica e o seu uso industrial (PAIVA, 2022).

A produção de  $H_2$  ainda é predominante por técnicas de base fóssil, o que é considerado indesejável devido à baixa eficiência de conversão e liberação de GEE (XU *et al.*, 2022). Contudo, o  $H_2$  vem atraindo interesse no meio industrial e acadêmico quando a produção está integrada a fontes renováveis, atuando como peça-chave para a transição energética e o combate às mudanças climáticas (BEZERRA, 2022).

Na eletrólise da água, ocorre a quebra da molécula sob uma corrente elétrica. Dessa forma, produz-se  $H_2$  por uma rota menos poluidora se comparada aos processos (gaseificação e a reforma a vapor do metano) que utilizam combustíveis fósseis como matéria prima. Entretanto, apesar de ser considerado uma via limpa e com alto grau de pureza do  $H_2$  produzido, a eletrólise exige um elevado consumo de energia, o qual espera-se reduzir, ao longo dos anos, com investimentos em fontes renováveis e, conseqüentemente, diminuir os custos de produção (PAIVA, 2022).

O conceito de  $H_2V$  é usado quando o  $H_2$  é produzido através da eletrólise da água utilizando eletricidade advinda de fontes renováveis, como: eólica, fotovoltaica e hidrelétrica (EERE, 2021).

As fontes renováveis de energia como a solar fotovoltaica e a eólica correspondem a uma fatia de mercado de 2,47% e 10,6%, respectivamente. Em relação ao crescimento da oferta de 2021, essas fontes obtiveram um crescimento significativo na participação na capacidade instalada de geração, de 11,43% na geração eólica e 2,55 % na geração fotovoltaica (EPE,2022).

Devido a esse crescimento na participação de energias renováveis e a conseqüente possibilidade de variações de produção diárias e sazonais, estima-se que um excesso de eletricidade poderá ser gerado. Isso pode proporcionar a instabilidade nos sistemas de transmissão de eletricidade. Para minimizar essa situação, são necessárias medidas preventivas que proporcionem a segurança do sistema. Uma dessas medidas refere-se aos processos que

promovem a conversão do excedente de eletricidade para outros transportadores de energia, dentre eles o H<sub>2</sub>V (SOUZA FILHO, *et al.*, 2020).

Diante da atualidade sobre o tema, este trabalho buscou na base *Scopus*, publicações sobre H<sub>2</sub>V e energia fotovoltaica para identificar as publicações na área. A seguir, elaborou-se um projeto piloto de produção de H<sub>2</sub>V, nesta parte do estudo será analisada a possibilidade de uso do excedente gerado em instalações fotovoltaicas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estudar o ciclo energético do H<sub>2</sub>V visando a ampliação do uso na matriz energética.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estudar os processos de produção de hidrogênio;
- Explorar e exemplificar as metodologias de produção de H<sub>2</sub>V;
- Analisar a evolução das publicações sobre H<sub>2</sub>V nos últimos anos;
- Propor um projeto de geração de H<sub>2</sub>V utilizando energia solar fotovoltaica.

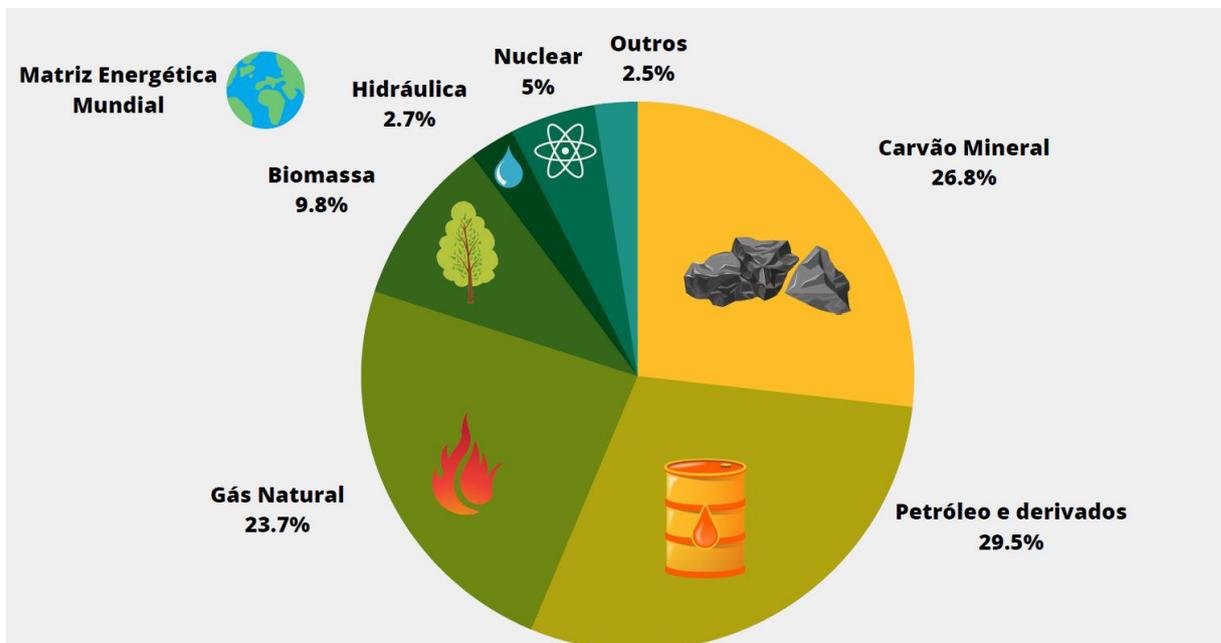
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados tópicos sobre a matriz energética brasileira, hidrogênio e energia solar fotovoltaica.

### 2.1 Configuração da matriz energética brasileira

A matriz energética mundial é composta principalmente de fontes não renováveis, sendo 80% da produção mundial dividida em petróleo e seus derivados (29,5%), carvão mineral (26,8%) e gás natural (23,7%), quanto a hidráulica é somente 2,7% do montante total (BEN, 2022).

Gráfico 1 - Matriz energética mundial



Fonte: Adaptado de EPE, (2022)

De acordo com balanço energético de 2022, onde os dados são de 2019, o Brasil se encontra em décimo lugar na produção mundial de derivados do petróleo, contribuindo com 2,2%.

Figura 1 - Produção mundial dos derivados do petróleo

Produtores	2019		Producers	Exportadores	2019		Importadores	Importers	
	10 <sup>6</sup> t	% Mundial World			10 <sup>6</sup> t	10 <sup>6</sup> t			
Estados Unidos	833	20,0%	United States	Estados Unidos	139	United States	México	47	Mexico
China	635	15,3%	China	Rússia	129	Russia	França	28	France
Rússia	280	6,7%	Russia	Arábia Saudita	63	Saudi Arabia	Austrália	27	Australia
Índia	263	6,3%	India	Coreia do Sul	28	India	Cingapura	27	Japan
Coreia do Sul	158	3,8%	Korea	Índia	25	Korea	Nigéria	21	Nigeria
Japão	147	3,5%	Japan	Kuwait	24	Kuwait	Japão	21	Japan
Arábia Saudita	124	3,0%	Saudi Arabia	Irã	22	Iran	Alemanha	20	Germany
Canadá	99	2,4%	Canada	Holanda	21	Netherlands	Hong Kong (China)	20	Hong Kong (China)
Alemanha	98	2,4%	Germany	Emirados Árabes Unidos	20	United Arab Emirates	Indonésia	20	Indonesia
Brasil	91	2,2%	Brazil	Argélia	18	Algeria	Brasil	19	Germany
Demais Países	1.431	34,4%	Rest of the world	Demais Países	149	Rest of the world	Demais Países	306	Rest of the world
Mundial	4.159	100,0%	World	Mundial	638	World	Mundial	556	World

Fonte: BEN, (2022)

É importante salientar que matriz energética e matriz elétrica são conceitos diferentes. Em síntese, matriz energética corresponde ao conjunto de fontes de energia disponíveis para, por exemplo, movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade. Já a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Dessa forma, a matriz elétrica é parte da matriz energética (EPE, 2022).

Já a matriz energética brasileira, vai em um viés diferente da ordem mundial tendo como base de sua matriz energética a energia renovável, onde sua principal fonte são as hidroelétricas. Tanto que o Brasil se encontra em segundo lugar na produção a partir da energia hidráulica, representando 9,2% da produção mundial. Vale ressaltar que o primeiro lugar detém uma participação de 30,1% na produção mundial, em 2019., conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Produção mundial de geração hidrelétrica

Produtores	TWh	2019	Producers	2019			País <sup>2</sup>	2019	Country <sup>3</sup>
		% Mundial World		Capacidade Instalada <sup>1</sup>	GW	Installed Capacity <sup>1</sup>		% Hidro <sup>3</sup>	
China	1.307	30,1%	China	China	356	China	Noruega	9,3	Norway
Brasil	398	9,2%	Brazil	Brasil	110	Brazil	Brasil	63,5	Brazil
Canadá	380	8,8%	Canada	Estados Unidos	103	United States	Canadá	58,8	Canada
Estados Unidos	311	7,2%	United States	Canadá	81	Canada	Turquia	29,2	Turkey
Rússia	197	4,5%	Russia	Rússia	54	Russia	Vietnã	27,8	Viet Nam
Índia	172	4,0%	India	Japão	50	Japan	Rússia	17,5	Russia
Noruega	126	2,9%	Norway	Índia	49	India	China	17,4	China
Turquia	89	2,1%	Turkey	Noruega	33	Norway	Índia	10,6	India
Japão	87	2,0%	Japan	Turquia	29	Turkey	Japão	8,4	Japan
Vietnã	66	1,5%	Viet Nam	França	26	France	Estados Unidos	7,1	United States
Demais Países	1.199	27,7%	Rest of the world	Demais Países	417	Rest of the world	Demais Países <sup>4</sup>	14,2	Rest of the world <sup>4</sup>
Mundial	4.329	100,0%	World	Mundial	1.308	World	Mundial	16,0	World

1. Baseada na produção. / Based on production.

2. Baseado nos 10 maiores produtores mundiais. / Based on top 10 producers in the world.

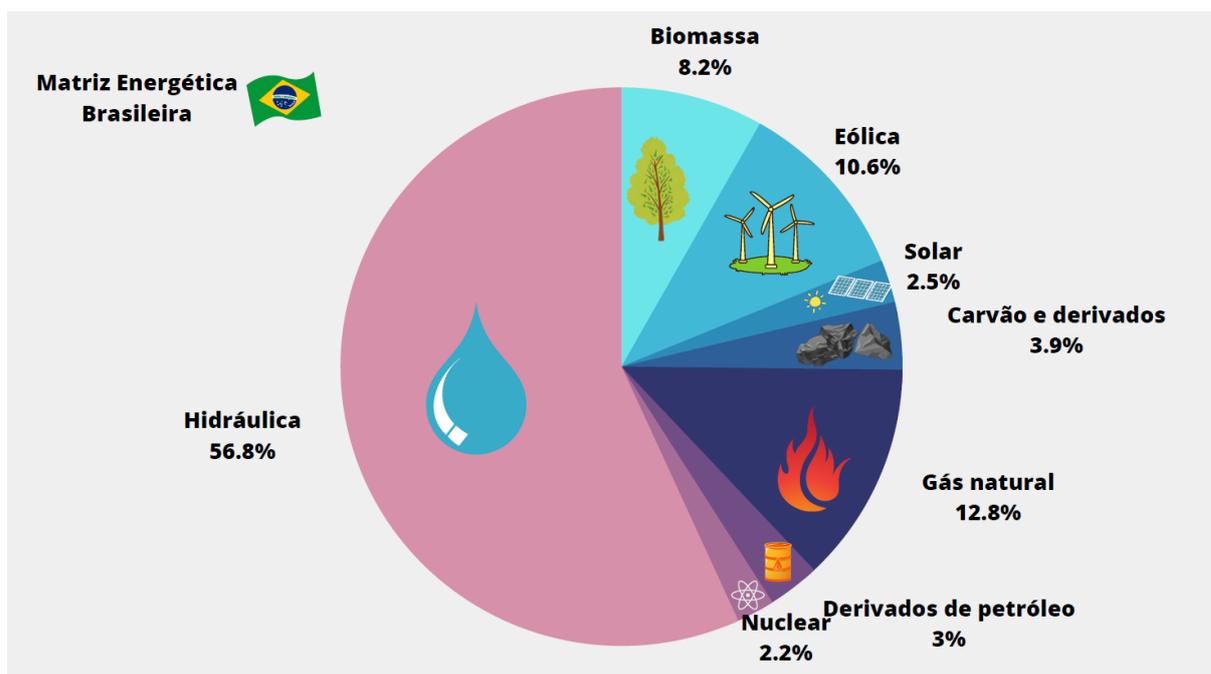
3. Percentual na geração interna total. / Percentage of hydro in total electricity production.

4. Exclui países sem geração hidrelétrica. / Excludes countries that do not use hydraulic energy.

Fonte: BEN, (2022)

O gráfico 2 mostra que a geração hidrelétrica é responsável por 56,8% da oferta interna, referente à produção de energia com fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica.

Gráfico 2 - Matriz elétrica brasileira



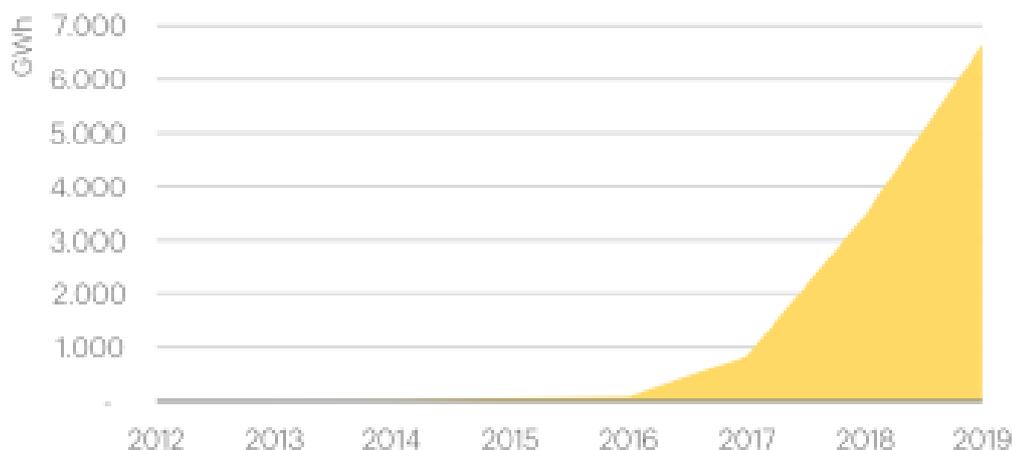
Fonte: Adaptado de EPE, (2022)

Apesar de considerada uma fonte estável e sendo a mais utilizada no Brasil, investir somente em grandes hidroelétricas fragiliza a segurança energética do país. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a capacidade de geração tem diminuído, resultando em um aumento do custo da energia e no risco de apagões. A diversificação da matriz energética é uma das formas de aumento da segurança energética, sendo um cenário propício para o investimento na utilização outras fontes renováveis (PEREIRA, 2017).

A energia solar no Brasil está longe de ser a principal fonte renovável, de acordo com os dados fornecidos pelo BEN de 2022. Em 2021 o Brasil produziu um total de 656,1 Terawatts-h (TWh), 2,47% do total gerado de energia elétrica em centrais de serviço público e autoprodutores.

Entretanto, a geração solar fotovoltaica vem crescendo cada vez mais nos últimos anos, em menos de 10 anos foi de uma produção menor do que 1.000 gigawatts-h (GWh) para no ano de 2019 (Gráfico 3) chegar a valores maiores que 6.000GWh (BEN 50 ANOS, 2019).

Gráfico 3 - Evolução da geração solar fotovoltaica



Fonte: BEN 50 ANOS, (2019)

## 2.2 Hidrogênio: Vetor Energético

O elemento químico hidrogênio (H) foi descoberto no ano de 1766 pelo físico-químico Henry Cavendish, sua massa atômica é de 1g/mol e número atômico igual a 1, sendo o elemento químico com estrutura mais simples e mais leve da tabela periódica. Na forma molecular, o H<sub>2</sub> tem como característica ser um gás incolor, altamente inflamável, inodoro e não tóxico (PALHARES, 2016).

O H<sub>2</sub> é um armazenador de energia e não é encontrado na sua forma pura na atmosfera, mas sim combinado com outras substâncias como a água, hidrocarbonetos e outros. Devido a isso, classifica-se como vetor energético, isto é, precisa ser extraído de uma fonte que o contenha. Os métodos de obtenção serão apresentados mais adiante nesta revisão. Apesar da baixa massa molecular, a densidade energética do H<sub>2</sub> por unidade de massa é alta, 120 kJ/kg, valor três vezes maior do que o da gasolina (DENG, 2021).

O H<sub>2</sub> tem diversas aplicações principalmente nas indústrias química, de alimentos e de refino de petróleo. Para fins energéticos, o uso principal é em células a combustível para geração de energia elétrica limpa (RIFKIN, 2003).

Ainda segundo Rifkin (2003), o H<sub>2</sub> pode desempenhar um papel importante na transição energética, alcançando um futuro com zero emissões de gases poluentes devido a sua ampla aplicação industrial e atuando como meio para armazenamento de energia.

Em 2021, o Ministério de Minas e Energia (MME) indicou à Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o interesse no desenvolvimento de novo roteiro para o desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao H<sub>2</sub> energético. No mesmo ano, a EPE publicou as "Bases para a

Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio", abordando o panorama do mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, o papel do H<sub>2</sub> na transição energética e, por fim, as implicações para políticas públicas. Em síntese, o documento trata sobre aspectos conceituais e fundamentais para subsidiar a construção da estratégia brasileira de hidrogênio (PNH2, 2021).

Assim como o Brasil, diversos países vêm apresentando estratégias para o desenvolvimento da "Economia do Hidrogênio". Segundo a EPE (2021), a perspectiva futura para uso do H<sub>2</sub> como vetor energético é crescente, impulsionada pela necessidade de os países aderirem à descarbonização, necessária para o cumprimento das metas do Acordo de Paris (2016), tratado mundial que tem como objetivo a redução do aquecimento global (EPE, 2021).

O H<sub>2</sub> pode ser produzido por diferentes rotas, a partir de combustíveis fósseis como o carvão e gás natural, sem ou com captura de carbono, e pelo processo de eletrólise, integrado a energias renováveis como solar e/ou eólica, sendo classificado como hidrogênio cinza, azul e verde, respectivamente (PAIVA, 2022).

Atualmente, existem 6 principais métodos para produção do hidrogênio, são: bioquímico, radioquímico, fotoquímico, híbrido, termoquímico e o eletroquímico. Desses métodos, o mais utilizado, hoje, para obtenção do H<sub>2</sub> é o da reforma a vapor do metano ou gás natural. O principal uso do H<sub>2</sub> tem sido para o refino do petróleo, para produção de amônia e em menor escala para refino de metais (VIOLA, 2015).

Através da eletrólise da água é possível a obtenção do H<sub>2</sub>, contudo este método é pouco utilizado, somente 4% da produção mundial de hidrogênio é feita por eletrólise. O H<sub>2</sub> eletrolítico possui um alto teor de pureza, é um processo considerado simples e pode-se utilizar fontes renováveis para sua obtenção (VIOLA, 2015).

### **2.2.1 Histórico do H<sub>2</sub> no Brasil**

No Brasil, um dos primeiros passos importantes na temática do H<sub>2</sub> consistiu na criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998. Em 2002, foi instituído pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCac), tendo como objetivo "organizar e promover ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada". Posteriormente, em 2005, esse Programa passou por

reformulação, recebendo o nome de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH<sub>2</sub>) (BEZERRA, 2022).

Bezerra (2021) lista o histórico de H<sub>2</sub> no Brasil:

-2003: O Brasil tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy).

-2005: Foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”.

-2010: Publicação do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE).

-2012: Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC).

-2017: Criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH<sub>2</sub>).

-2018: Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis.

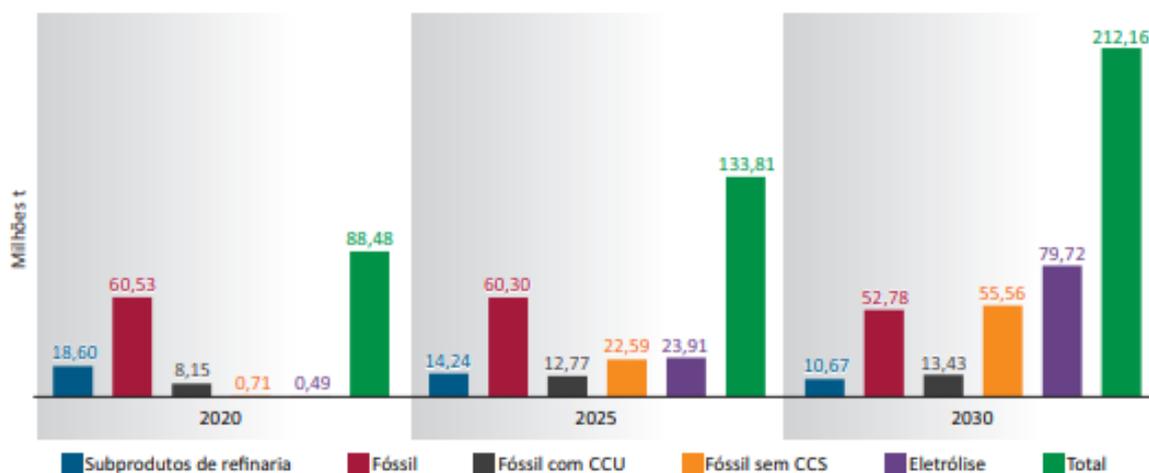
-2020: Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050).

-2021: A EPE publicou as “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio”.

### **2.2.2 Evolução e Projeção de Hidrogênio no Mundo**

A utilização ativa do H<sub>2</sub> proveniente de eletrólise é o objetivo de vários países nos próximos anos, Bezerra (2021), por meio de um gráfico (Gráfico 4) demonstra a demanda da produção do H<sub>2</sub> de acordo com cada tecnologia da qual ele pode ser obtido, de 2020 a 2030.

Gráfico 4 - Demanda global de hidrogênio por tecnologia de produção ou insumos



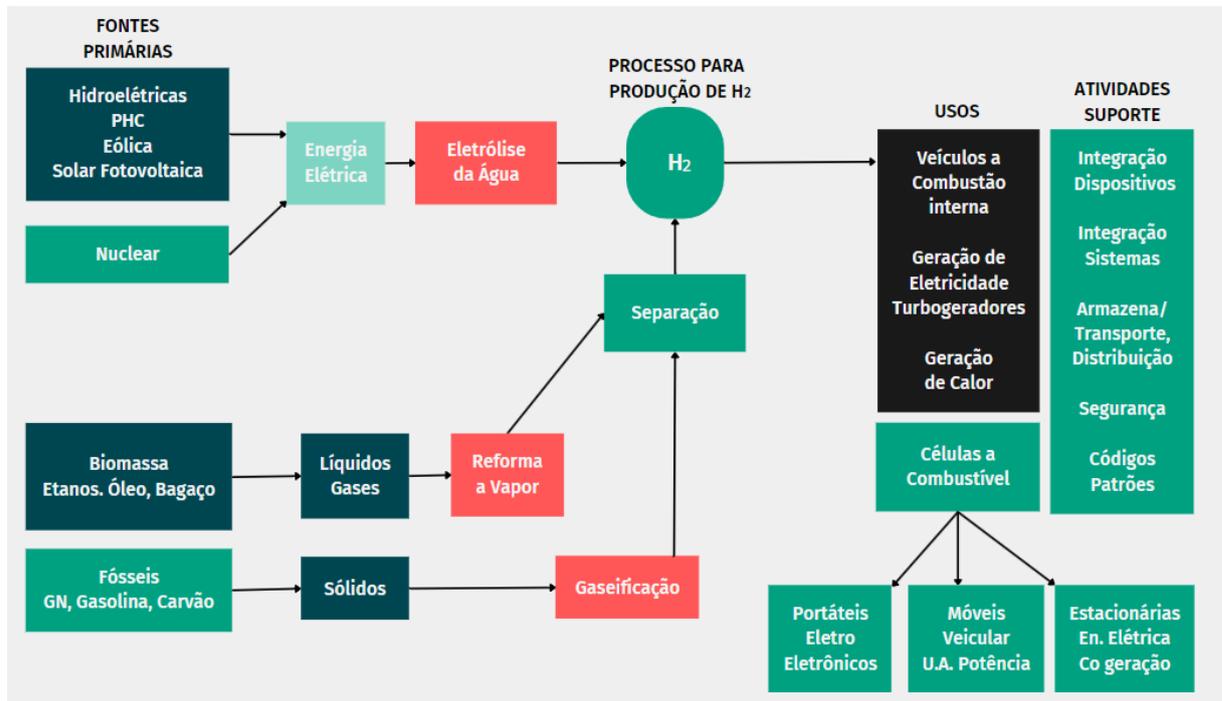
Fonte: BEZERRA (2021)

Conforme o IEA (2021), no ano de 2020 dez países adotaram estratégias para que produção de hidrogênio utilizando o método de eletrólise possa vir a se tornar o principal meio de obtenção, países como: Canadá; Chile; França; Alemanha; Holanda; Noruega; Portugal; Rússia; Espanha; União Europeia. No ano de 2021 mais quatro países começaram a adotar estratégias: República Tcheca, Colômbia, Hungria e Reino Unido (BEZERRA, 2021).

### 2.3 Principais Métodos para Produção de Hidrogênio

O H<sub>2</sub> pode ser produzido a partir de diferentes insumos e processos e ser utilizado para diversas aplicações energéticas, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Produção de hidrogênio e seus meios



Fonte: Adaptado BEZERRA (2021)

Este capítulo irá detalhar as tecnologia mais utilizada atualmente: reforma a vapor do metano, gaseificação e a eletrólise (foco deste estudo).

### 2.3.1 Reforma a Vapor do Metano

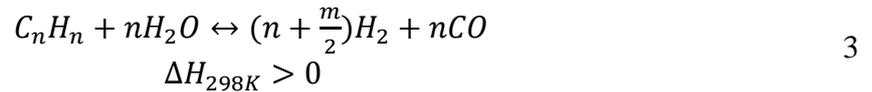
A reforma a vapor é um processo consolidado para conversão de gás natural ou outros hidrocarbonetos a gás de síntese. O gás de síntese é uma mistura de monóxido de carbono (CO) e H<sub>2</sub> (MARIGLIANO, et al., 2001).

A reforma a vapor do metano é o processo mais eficiente de produção de H<sub>2</sub>. De acordo com Torres (2014), a taxa de conversão é de 70% a 80%. A reação consiste em separar os átomos de hidrogênio do átomo de carbono no metano. Envolve a reação do metano (ou gás natural) com vapor d'água a alta temperatura em superfícies catalíticas. O processo extrai os átomos de hidrogênio, deixando o dióxido de carbono como subproduto. O primeiro passo da reação decompõe o combustível em água e monóxido de carbono. Uma reação posterior transforma o monóxido de carbono e a água em dióxido de carbono e hidrogênio, conforme mostram as reações nas Equações 1 e 2 (SOUZA, 2011):



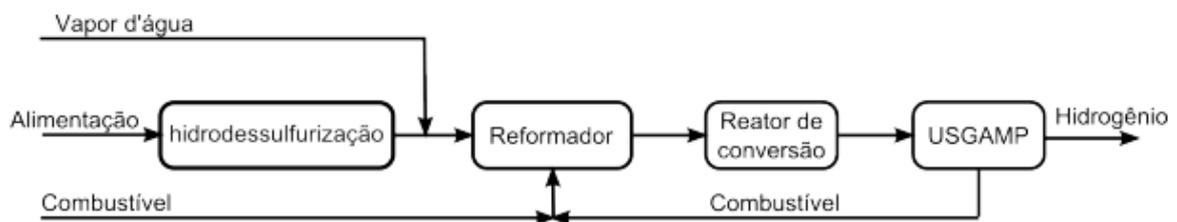
$$\Delta H_{298K} = -41 \text{ kJ/mol}$$

A equação 3 nos mostra que a reação é semelhante nos hidrocarbonetos de cadeia maior, esses hidrocarbonetos estão presentes no gás natural. Sendo o gás natural um componente do gás liquefeito de Petróleo (GLP) ou dos hidrocarbonetos líquidos (SOUZA, 2011).



Uma planta de reforma a vapor é representada na Figura 9. O metano, ou o gás natural, é alimentado em sistema de purificação para retirada de compostos de enxofre. Após, ocorre a mistura do gás purificado em contracorrente com o vapor d'água e então alimentado ao reformador. A saída do reformador segue para um reator de deslocamento e, por fim, segue para uma unidade de purificação. O grau de purificação necessário depende da aplicação. Unidades de separação de gases por adsorção com modulação da pressão (USGAMP) ou membranas são usadas para produzir H<sub>2</sub> com pureza acima de 99,999% (SILVA, 2008).

Figura 4 – Planta do processo convencional de reforma a vapor de metano



Fonte: SILVA (2008)

O primeiro reformador industrial foi instalado em Baton Rouge pela *Standard Oil* de *New Jersey* em 1930. Um modelo de reformador industrial é mostrado na Figura 5. Neste modelo o efluente é obtido com uma relação H<sub>2</sub>/CO próxima de três (SOUZA, 2011).

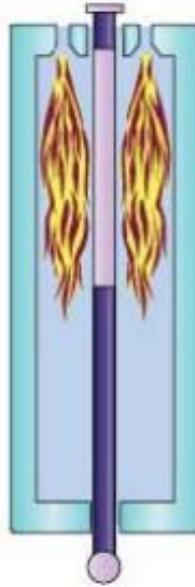
Figura 5 – Forno reformador com queimador no topo



Fonte: SOUZA (2011)

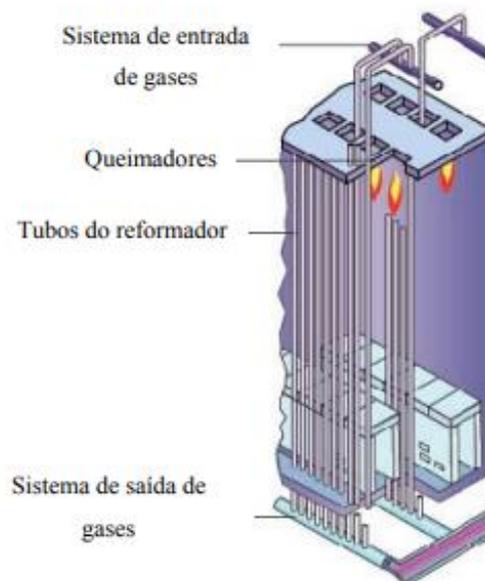
Os catalisadores são acondicionados dentro de uma série de tubos dispostos em fileiras ao longo do forno, mostrado na Figura 7. O diâmetro externo dos tubos varia entre 100-150 milímetros e o comprimento entre 10-13 metros. As temperaturas de entrada se situam entre 450-650°C e o produto gasoso deixa o reformador a 800-950°C, Figura 6 (SOUZA, 2011).

Figura 6 - Representações esquemáticas do tubo de um forno reformador



Fonte: SOUZA (2011)

Figura 7 – Representação dos componentes internos do forno reformador



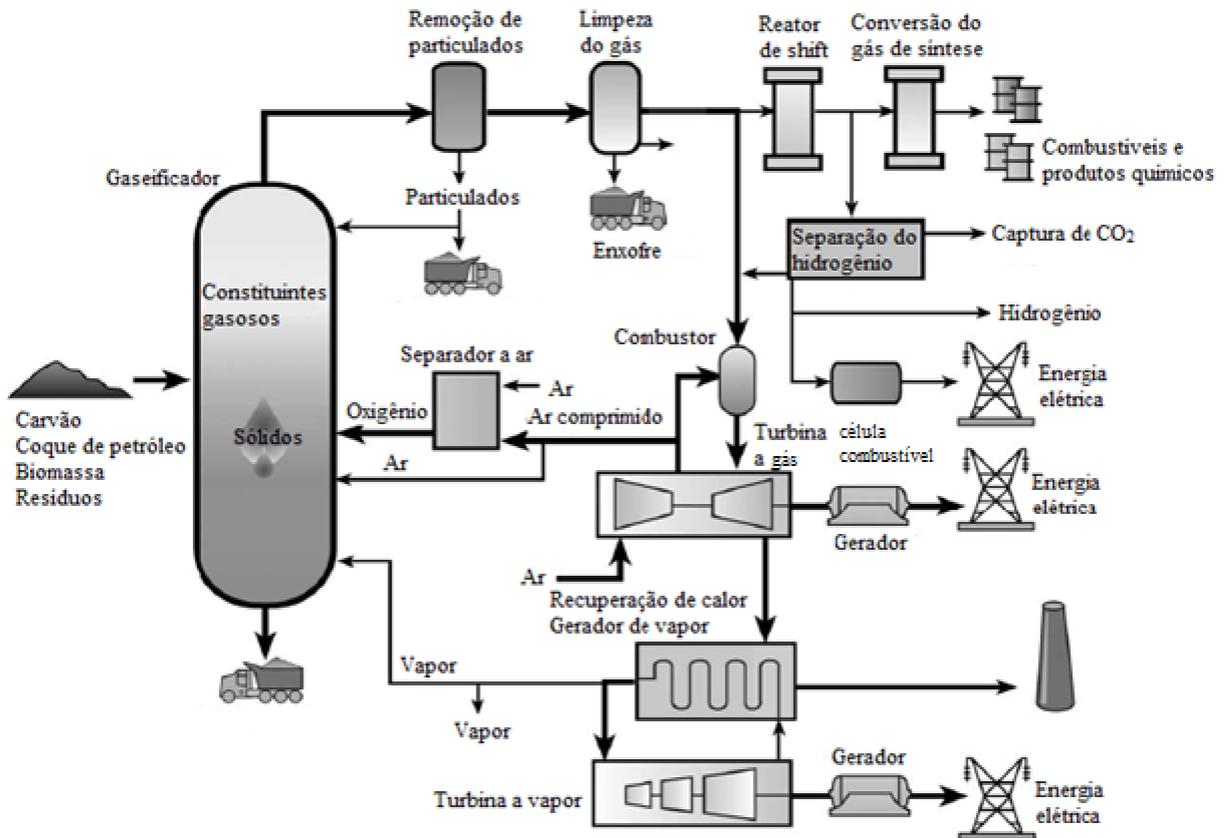
Fonte: SOUZA (2011)

### 2.3.2 Gaseificação

O carvão, a biomassa, o coque de petróleo são combustíveis sólidos, a partir deles, utilizando o processo de gaseificação é possível obter o  $H_2$  por meio da decomposição térmica das matérias primas (DOMENICO, 2013).

Um esquema representativo de um processo de gaseificação integrada com ciclo combinado (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) é mostrado na Figura 8.

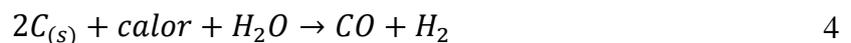
Figura 8 - Processo de gaseificação em uma planta IGCC.



Fonte: Adaptado DOMENICO (2013)

O gaseificador converte os combustíveis em gás de síntese na presença de elevadas temperaturas e pressões moderadas, é necessária a presença de água no estado a vapor e oxigênio para a conversão. A composição final do gás dependerá, entre outros fatores, do combustível utilizado, do tipo de reator e das condições de operação. Na saída do gaseificador, o gás de síntese passa por um processo de limpeza, para remoção de impurezas, como enxofre e particulados. Os principais produtos de gaseificação são o  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , além de outros hidrocarbonetos leves, apesar do processo de limpeza ainda sobram traços de enxofre e impurezas no produto. Com o gás de síntese é possível produzir combustíveis sintéticos, hidrogênio ou energia elétrica (COLLOT, 2006).

O processo de gaseificação pode ser representado pela Equação 4:



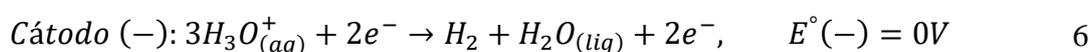
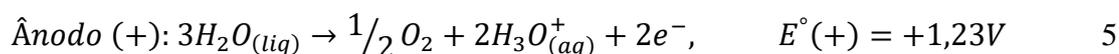
### 2.3.3 Eletrólise

A produção de  $H_2$  via eletrólise da água é uma tecnologia demonstrada há mais de um século. Possibilita vantagens como a utilização da energia elétrica disponível, redução nas

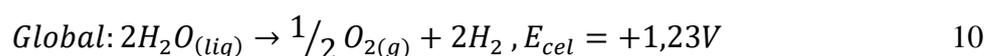
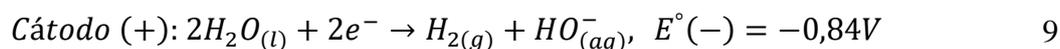
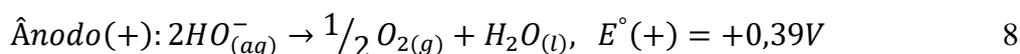
emissões de CO<sub>2</sub> e interação com fontes renováveis. A eletrólise da água é relativamente eficiente (> 70%), mas por demandar de eletricidade, o H<sub>2</sub> produzido por eletrólise da água é caro (PAIVA, 2022).

A eletrólise é uma reação química não espontânea. Assim, para que ela ocorra é necessária uma fonte externa de energia. A reação ocorre em meio ácido ou alcalino, como apresentado nas reações (PAIVA, 2022).

Reações em um meio ácido:



Reações em um meio alcalino:



A principal diferença entre as reações no meio ácido e alcalino, são os valores dos potenciais dos eletrodos. Sendo assim, quando os eletrodos (anódico e catódico), estão imersos no mesmo eletrólito, o potencial da célula de equilíbrio é +1,23 V e a tensão necessária para separar a molécula da água independe do potencial hidrogeniônico (pH) (PAIVA, 2022).

### 2.3.4 Tipos de Eletrolisadores

Como já mencionado, o oxigênio e o hidrogênio são obtidos a partir da quebra da molécula de água, e o equipamento responsável por permitir, isto é, o eletrolisador. Os eletrolisadores distinguem-se em relação a alguns parâmetros como o eletrólito utilizado, condições de operações e o agente iônico presente (OH<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, O<sup>2-</sup>). Dessa forma, tem-se eletrólise

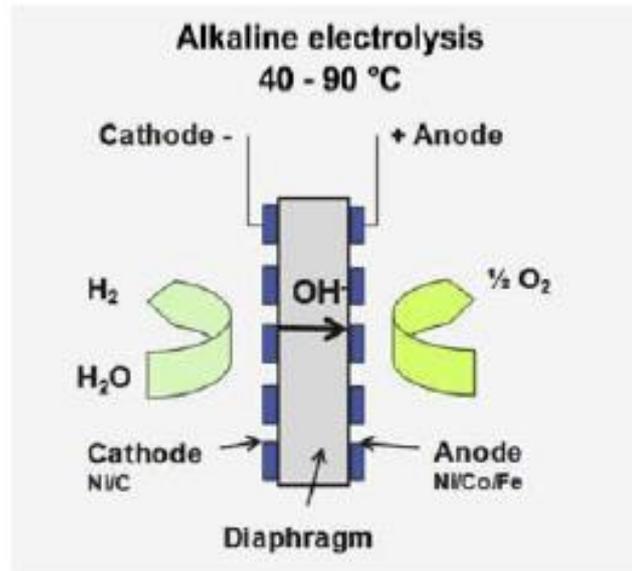
alcalina, eletrólise de membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane - PEM, em inglês) e a eletrólise de óxido sólido (PAIVA, 2022).

#### **2.3.4.1 Eletrolisador Alcalino Unipolar e Bipolar**

Ambos eletrolisadores alcalinos possuem uma membrana polimérica que separa seus eletrodos. O unipolar os eletrodos são colocados paralelamente em um tanque onde estão imersos na solução, separados por uma membrana, é ela a responsável pela separação do hidrogênio do oxigênio no momento que esses gases são produzidos. Já a bipolar, possui uma conexão de células de eletrólises em série (KNOB, 2013).

Eletrólise alcalina é formada por dois eletrodos (anódico e catódico) das quais ficam imersos em solução alcalina. Para que não haja a mistura dos gases produzidos ao longo da reação, os eletrodos são separados por um diafragma, conforme mostra a Figura 9. O diafragma é permeável aos íons hidróxido e às moléculas de água. Com o objetivo de aumentar a condutividade iônica no sistema, utiliza-se solução de hidróxido de potássio (KOH) de 20-40% em massa. A eletrólise alcalina é considerada a tecnologia eletrolítica mais empregada no mundo no setor comercial (PAIVA, 2022).

Figura 9 - Representação esquemática da eletrólise alcalina



Fonte: PAIVA (2022)

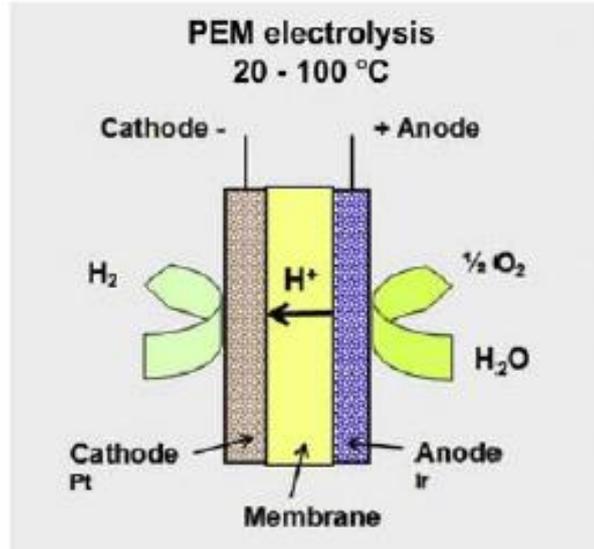
#### 2.3.4.2 Eletrolisador de Membrana de troca protônica (PEM)

As vantagens desse tipo de eletrolisador é a alta densidade de corrente e a capacidade de trabalhar pressões elevadas. Sua membrana sólida permite a condução dos íons  $H^+$  do ânodo para o cátodo, onde haverá a formação do  $H_2$  (KNOB, 2013).

As membranas possuem alta resistência mecânica, conduzem o  $H^+$ , atuam em condições de elevadas pressões e conferem uma menor mistura do hidrogênio com o oxigênio. A membrana é formada por um polímero de ácido perfluorosulfônico chamado comercialmente de Nafion. Uma das características do ácido sulfônico é a atração pela água, sendo assim quanto menos hidratada a membrana estiver, menor será a sua condutividade elétrica. Uma

representação de como ocorre a eletrólise nesse tipo de eletrolisador é mostrada na Figura 10 (PAIVA, 2022).

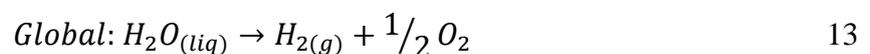
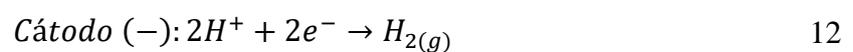
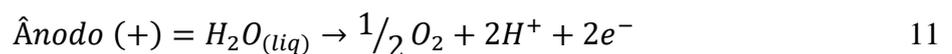
Figura 10 - Representação esquemática da eletrólise PEM



Fonte: PAIVA (2022)

A eletrólise na membrana de troca de prótons, apresenta algumas vantagens em relação ao eletrolisador alcalino como: maior grau de pureza, devido à baixa permeabilidade gasosa da membrana, atuação em condições de elevadas densidades de corrente, em torno de 0,6-2,0 mA/cm<sup>2</sup> e reversibilidade, isto é, possibilidade de integrar os modos de eletrolisador e célula de combustível. Apesar dessas vantagens quando comparado ao eletrolisador alcalino, este tipo de equipamento é menos utilizado. Primeiro por ser mais caro uma vez que necessita de materiais nobres associados aos catalisadores a base de platina, irídio e o rutênio. Segundo, devido a sua vida útil (10 - 20 anos), que é menor se comparado ao eletrolisador alcalino (20 - 30 anos) (PAIVA, 2022).

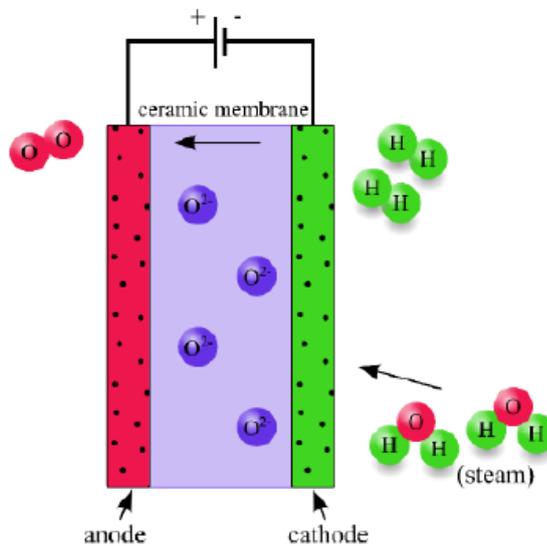
As reações que acontecem no eletrolisador tipo PEM são representadas nas Equações 11-13:



### 2.3.4.3 Eletrolisador de Óxido Sólido

O eletrolisador de óxido sólido, Figura 11, opera em elevadas temperaturas, em torno de 700-1000°C, fazendo com que o sistema se caracterize por uma elevada eficiência na difusão dos íons. Sua desvantagem é dada pelo preço elevado dos eletrólitos, pois precisa ser resistente a sua alta temperatura de trabalho. O eletrólito utilizado é de óxido de metal não poroso, como a zircônia estabilizada com ítria.

Figura 11 – Representação do eletrolisador de óxido sólido



Fonte: PAIVA (2022)

Um dos parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho dos eletrolisadores são a eficiência e a demanda de energia, conforme mostrado na Figura 12 (PAIVA, 2022).

Figura 12 – Comparação dos sistemas eletrolíticos

Parâmetros técnicos	Alcalino	PEM	Óxido sólido
Temperatura (°C)	60-80	50-80	650-1000
Pressão (bar)	< 30	< 70	< 25
Pureza de H <sub>2(g)</sub> (%)	> 99.5	99.99	99.99
Demanda de energia do sistema (kWh/kgH <sub>2</sub> )	50-78	50-83	45-55
$\eta_{\text{eletrolise}}$	42-66	40-66	60-74

Fonte: PAIVA (2022)

A eficiência do sistema ( $\eta_{\text{eletrolise}}$ ) é função da vazão mássica de hidrogênio produzido ( $\dot{m}$  [kg/s]) no processo, do poder calorífico (LHVH<sub>2</sub> [J/kg]) e da energia elétrica fornecida ao

sistema ( $P_{in}$  [W]). No caso da demanda de energia (kWh/kgH<sub>2</sub>), é avaliado a quantidade de energia para produzir 1 kg de gás hidrogênio (CAPURSO *et al.*, 2022).

$$\eta_{\text{eletrólise}} = \dot{m}LHV_{H_2} / P_{in} \quad 14$$

## 2.4 Armazenamento e transporte de hidrogênio

O setor do H<sub>2</sub> vem investindo em pesquisas das quais visem formas de utilizar, armazenar e transportar o H<sub>2</sub> que sejam viáveis economicamente. Para fazer com que o uso do H<sub>2</sub> se torne cada vez mais acessível e com maior aplicabilidade são necessárias formas eficientes de armazenamento (PAIVA, 2022).

O armazenamento pode ser feito em sua forma: gasosa (gás comprimido em elevada pressão), líquida (em condições criogênicas) ou sólida (adsorvidos em superfície). No estado gasoso, o gás é armazenado em reservatórios de aço ou alumínio, que precisa estar e ser mantidos em ótimas condições, para que não haja vazamentos. A pressão dentro desses reservatórios é elevada, entre 35-70 megapascal (MPa), elas precisam ser altas devido à baixa densidade do gás. No estado líquido, o armazenamento é feito em vasos criogênicos que podem possuir uma região interna revestida de uma forro metálico reforçado com fibra de carbono, em temperaturas de 20 Kelvin, abaixo de seu ponto de ebulição. No estado sólido, o armazenamento é feito por meio de adsorção na superfície de materiais como nanotubos de carbono, minerais com estrutura interna porosa, como zeólitas, estruturas orgânicas, metálicas entre outros.

## 2.5 Energia solar fotovoltaica

As fontes renováveis utilizadas para a produção de H<sub>2</sub>V dependem quais fontes são mais disponíveis na região de produção. No presente trabalho pretende-se utilizar a energia solar fotovoltaica por esse motivo a revisão da literatura abordará esta temática com mais ênfase.

### 2.5.1 Radiação Solar

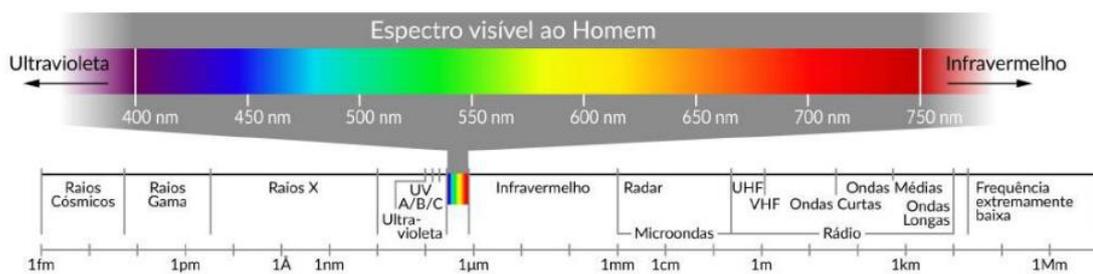
O sol é a estrela mais próxima do planeta terra, emitindo uma taxa de energia de  $3,86 \cdot 10^6$  W de acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar. É a principal fonte de energia, como se fosse uma usina termonuclear de grandes proporções, emitindo energia para o espaço, da qual parte dela é recebida pela Terra. A vida no planeta existe devido a energia advinda do sol, pois

é em razão dessa energia que existe a possibilidade de diversos processos acontecerem, como: térmicos, biológicos, dinâmicos e químicos (PEREIRA *et al.*, 2017).

A radiação solar é a radiação eletromagnética originada pelo núcleo do sol, o fluxo dessa energia é emitido pela camada conhecida como fotosfera, sendo esta categorizada como a superfície do sol, ou seja, é a parte visível (GÓMEZ *et al.*, 2018).

De toda a radiação eletromagnética emanada da superfície do sol, somente 45% consegue adentrar a atmosfera e atingir a superfície terrestre, uma parcela é absorvida pela própria atmosfera, em torno de 25%. Os 30% restantes, é refletido de volta ao espaço extraterrestre. De acordo com Pereira *et al.* (2017) a constituição do espectro da radiação solar é formada em maioria, 81%, por ondas com comprimento que vão do visível até o infravermelho. A Figura 13 mostra o espectro da radiação solar.

Figura 13 - Espectro da radiação solar

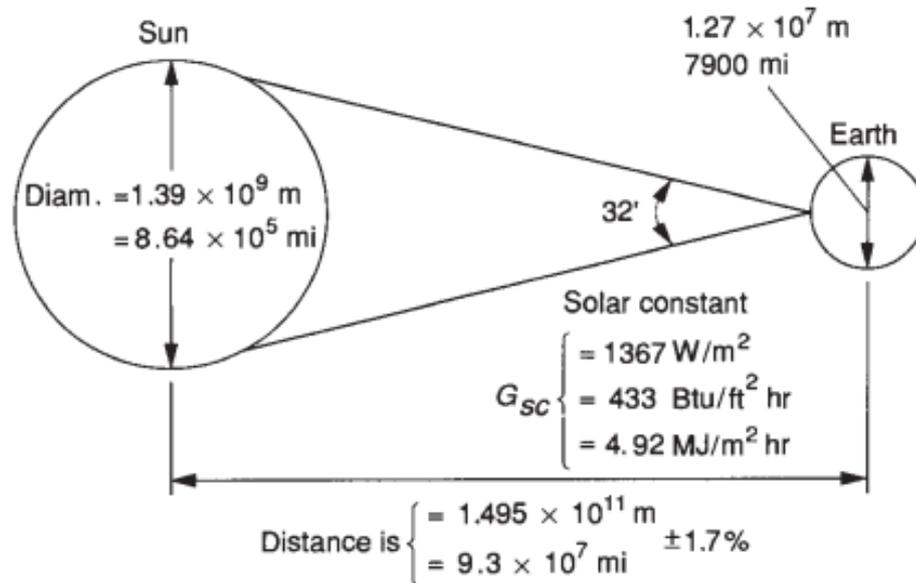


Fonte: PEREIRA *et al.*, (2017)

Com uma distância média de  $1.495 \times 10^{11}$  metros, como pode ser observado na Figura 19, o ângulo a partir do sol com o centro da terra é de  $32^\circ$ . De acordo com Duffie e Beckman (2013):

De acordo com DUFFIE “A constante solar  $G_{sc}$  é a energia do Sol por unidade de tempo recebida em uma unidade de área de superfície perpendicular à direção de propagação da radiação na distância média da terra-sol fora da atmosfera” (DUFFIE; BECKMAN, 2013, pg 5).

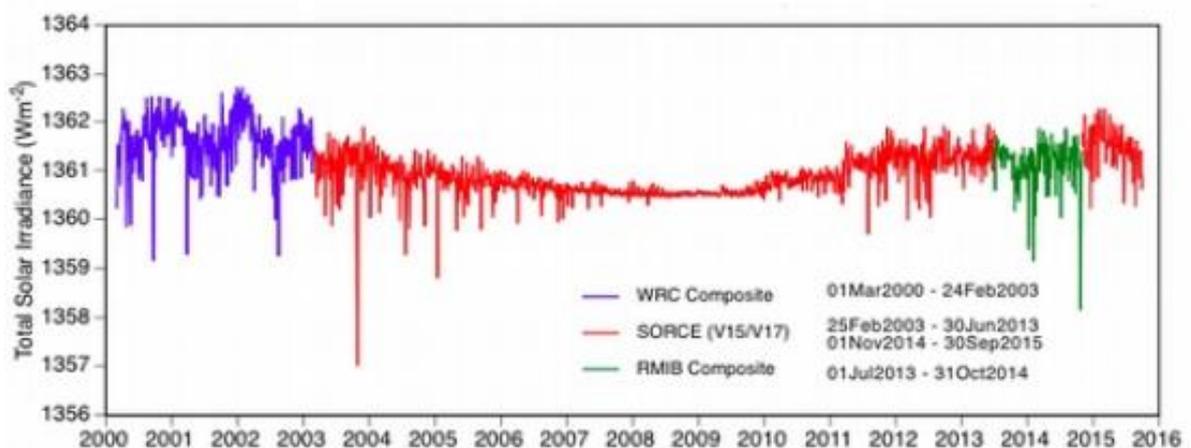
Figura 14 – Relação do Sol-Terra



Fonte: DUFFIE; BECKMAN, (2013)

A intensidade da radiação emitida pelo sol para a parte externa da atmosfera terrestre era considerada como um valor praticamente fixo, contudo estudos começaram a constatar que esses valores variaram ao longo do tempo, hoje o termo que melhor quantifica a emissão solar eletromagnética é Irradiância Solar Extraterrestre total, abreviada por TSI – do inglês “*Total Solar Irradiance*”. A Figura 14 mostra a variação da TSI de 2000 até 2016 (HAAG *et al.*, 2018).

Figura 15 - Variação da irradiância solar total



Fonte: HAAG *et al.*, (2018)

Apesar de não ser considerada um valor fixo ao longo do tempo, a constante solar ainda é utilizada, como forma de facilitar, para realização de alguns cálculos. A partir da radiação

extraterrestre com incidência normal ( $G_{on}$ ) é possível obter a variação da irradiância solar incidente no topo da atmosfera terrestre ao longo do ano.

$$G_{on} = G_{sc} * 1 + 0,033 * \cos 360 * n * 365 \quad 15$$

Onde,  $G_{sc}$  é a constante solar e  $n$  é o número do dia do ano (1 até 365). Atualmente, o valor da constante solar utilizada é a média,  $1366 \text{ W/m}^2$  (HAAG *et al.*, 2018).

A distância da Terra para o sol varia ao longo do período de translação, ou seja, durante os 365,25 dias solares. A distância varia entre  $1,47.10^8 \text{ km}$  e  $1,52.10^8 \text{ km}$ , por este motivo o valor da irradiância solar recebida também variará,  $1325 \text{ W/m}^2$  e  $1412 \text{ W/m}^2$  (PEREIRA *et al.*, 2017).

Como esta constante é calculada para um plano perpendicular, ou seja, a área da terra foi calculada, como um círculo ( $\pi * R^2$ ). Seu valor, entretanto, não representa com exatidão a realidade, uma vez que o planeta gira em torno do próprio eixo, assim o valor de  $1366 \text{ W/m}^2$  é distribuído, de forma não uniforme, pela área do globo ( $4 * \pi * R^2$ ). Desta forma, a irradiação solar média projetada sobre a terra é  $342 \text{ W/m}^2$  (CLOVIS e AVILA, 2013).

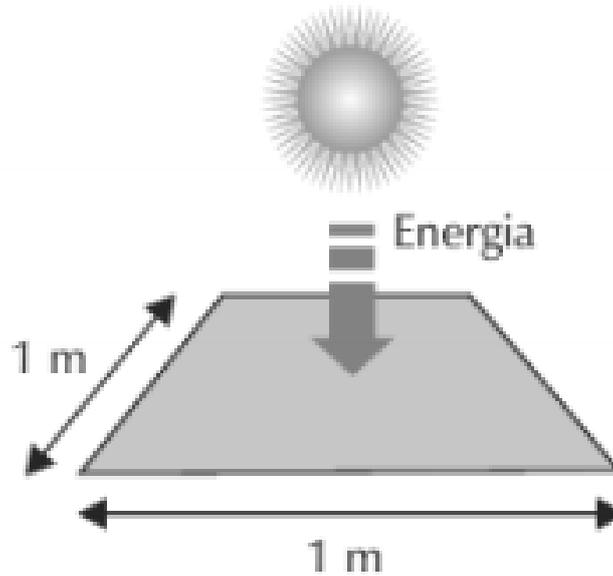
## 2.5.2 Irradiância/Irradiação

Duffie e Beckman (2013) colocam diversas definições em seu livro, incluindo Irradiância e Irradiação, apesar de alguns autores tratarem como se tivessem o mesmo significado, o autor explica que Irradiância ( $\text{W/m}^2$ ) é o valor da quantidade de potência radiante recebida na área de uma superfície, simbolizada por  $G$ . Já a Irradiação ( $\text{J/m}^2$ ) é o cálculo da integral do valor da irradiância naquela área por um tempo específico, ou seja, o valor da irradiação varia com o tempo (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A irradiância na superfície terrestre tem um valor aproximado de  $1366 \text{ W/m}^2$ , contudo nas indústrias de módulo fotovoltaico utiliza-se como padrão o valor de  $1000 \text{ W/m}^2$  para especificações e avaliações das células fotovoltaicas, sendo a base para estimar a eficiência destes (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Para levantar um perfil de irradiância de um local é realizado o levantamento dos valores por períodos, um dia, uma semana, um mês ou também o perfil médio do ano (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Figura 16 – Radiação Solar Sobre uma Determinada Área

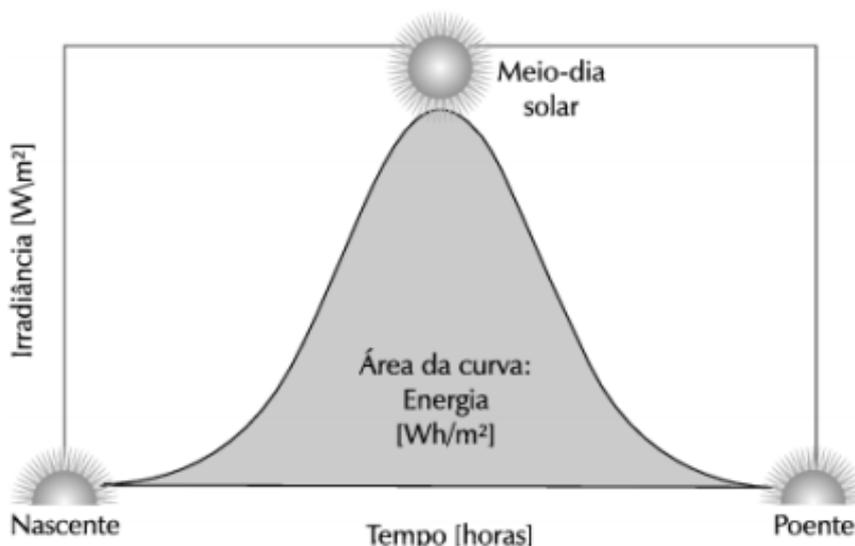


Fonte: VILLALVA; GAZOLI, (2012)

A insolação, é uma grandeza utilizada para medir a irradiação solar sobre uma área ao longo de um tempo específico, sua unidade é  $\text{Wh/m}^2$ . A Figura 17 expressa o perfil de irradiância, ou seja, os valores da irradiância medidos ao longo de um dia em uma determinada área. Assim, ao calcular a área abaixo da curva obtém-se a insolação (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A simbologia utilizada para a insolação varia de acordo com a unidade de tempo especificada. Quando a insolação for por um período de um dia, utiliza-se H. Por períodos diferentes a este o símbolo I é usado.

Figura 17 – Perfil de Irradiância



Fonte: VILLALVA e GAZOLI, (2012)

#### 2.5.4 Efeito Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica é a conversão da radiação solar em eletricidade por meio de materiais semicondutores. O efeito fotovoltaico é a diferença de potencial que ocorre na estrutura do material semicondutor (elemento que possui condutividade elétrica baixa, mas superior à de um material isolante) devido a absorção de luz solar (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Estudos sobre a utilização do efeito fotovoltaico tiveram início em meados de 1870, na década seguinte foi feita a primeira célula fotovoltaica, possuindo uma eficácia de 2%, o material utilizado para sua produção foi o selênio. Somente em 1954, se utilizaria o silício com junção PN nas células fotovoltaicas (BRAGA, 2008).

#### 2.5.5 Tecnologias Fotovoltaicas

As pesquisas por novos modelos e arranjos no âmbito das energias renováveis vem sendo uma prioridade para o mundo. Ao longo dos anos a fotovoltaica tem se tornado uma fonte viável, sendo uma das energias mais promissoras. No Brasil, as reduções de impostos e taxas, tem sido uma forma do governo brasileiro incentivar a utilização da eletricidade solar fotovoltaica. Desta forma, a busca por melhores materiais e melhor utilização é contínua (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Atualmente, o material mais utilizado nas células fotovoltaicas é o silício (Si), da qual pode ser utilizado de diversas formas: polimorfo, amorfo e cristalino (ALMEIDA, *et al.*, 2015).

A classificação da tecnologia da célula fotovoltaica é feita de acordo com o material e suas características, desta forma há atualmente 3 gerações (fonte):

Primeira geração: utiliza o silício na forma cristalina, subdividindo-se em silício monocristalino e policristalino, essa geração é mais utilizada no mercado devido sua eficiência.

Segunda geração: conhecida como filmes finos.

Terceira geração: a mais eficiente, menor relação custo-watt e o percentual de toxicidade seja baixo.

As células orgânicas, ainda não são uma opção tão viável, mesmo com sua alta taxa de absorção, suas desvantagens não a tornam atrativas para o mercado, como a baixa estabilidade e resistência ao ser comparada com as células feitas com Si (fonte).

## **2.6 Perspectivas e desafios**

Políticas globais estão sendo implementadas para diminuir os custos de produção, distribuição e aplicação do H<sub>2</sub>V. Assim, acredita-se que a necessidade de cumprir as metas de descarbonização pode tornar os eletrolisadores aproximadamente 40% mais baratos até 2030 (MIRANDA, 2022).

Países como o Brasil, com elevado potencial de recursos energéticos renováveis, podem se tornar exportadores de H<sub>2</sub>V, porém ainda não existe um mercado global deste recurso. Atualmente, estão acontecendo negociações de acordos de parceria bilaterais e de definição de mecanismos de mercado pelos países com um perfil importador. Os países da União Europeia, em particular a Alemanha, já demonstraram, pela sua capacidade de iniciativa, necessidade e de liderança, ser uma escolha adequada de parcerias estratégicas face à capacidade do setor elétrico brasileiro e do seu perfil competitivo (CASTRO, 2021).

Dentre os setores que deverão substituir os recursos energéticos não renováveis pelo H<sub>2</sub>V destacam-se a indústria química e petroquímica, de ferro e aço, transportes rodoviários pesados, aviação, transportes marítimos e, obviamente, o próprio setor elétrico (CASTRO, 2021).

Comparando-se com a energia fotovoltaica, há cerca de 25 anos a geração solar tinha um custo alto e era vista como uma fonte de energia apropriada apenas para sistemas isolados e distantes dos centros urbanos, até se popularizar. Mas isso ocorreu devido aos investimentos em ciência, projetos que muitas vezes eram mais custosos do que a economia inicial que

geravam. Hoje, os frutos desse processo são visíveis na popularização da tecnologia e no seu consequente barateamento. Com base neste cenário, o aprendizado com a tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica serve como um espelho para o que pode vir a ser o aproveitamento do H<sub>2</sub>V a longo prazo (MIRANDA, 2022).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia é dividida em duas partes distintas, porém interligadas. Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática para analisar as publicações que relacionam a energia solar fotovoltaica com a produção  $H_2V$ . Para isso, utilizou-se a base de dados *Scopus*. A seguir, apresentou-se um estudo de caso utilizando um projeto para implementação de um sistema de geração de  $H_2V$  utilizando-se o excedente da energia solar gerada na Unipampa.

#### 3.1 Revisão Bibliométrica

Na base de dados *Scopus*, buscou-se documentos relacionados com hidrogênio e energia fotovoltaica de uma maneira geral. Os termos utilizados na busca foram “*hydrogen*” and “*photovoltaic*”. Tais palavras poderiam estar contidas no resumo, no título ou nas palavras-chaves das publicações. Como critérios de refinamento, utilizou-se o período de 20 anos (2002-2022), fontes mais relevantes, publicações do Brasil e afiliações.

#### 3.2 Estudo de caso

O estudo de caso foi baseado em um sistema fotovoltaico instalado na Universidade Federal do Pampa, localizada na cidade de Bagé/RS (Figura 18). Da qual a partir do sistema fotovoltaico existe um percentual não utilizado. Pensando nessa sobra elaborou-se um esquema de um sistema composto por painéis solares e eletrolisador, com o intuito de produzir  $H_2V$ .

Figura 18 – Universidade Federal do Pampa, Bagé/RS



Fonte: UNIPAMPA, (2021)

A metodologia utilizada para os equipamentos e sistemas montados foi adaptada de Bezerra *et al.*, (2019) sendo constituída por:

- Painéis solares (Unipampa);
- Reator eletrolítico (Hy-PEM XP2);
- Sistema de compressão (Hy-COMP XT HP).

Reator eletrolítico (HyPEM XP Home) é fabricado pela H2Planet, com capacidade de produção de 12L/h de H<sub>2</sub> e potência elétrica de 960 W. Este eletrolisador é do tipo PEM e, segundo as informações do catálogo, produz H<sub>2</sub> de alta pureza (99,999%). Este equipamento foi selecionado devido à sua potência poder ser suprida pela energia gerada sem a necessidade de complemento energético. A Figura 19 mostra o reator selecionado e a Figura 20 o sistema de compressão.

Figura 19 – Eletrolisador HyPEM XP HOME



Fonte: H2PLANET (2022)

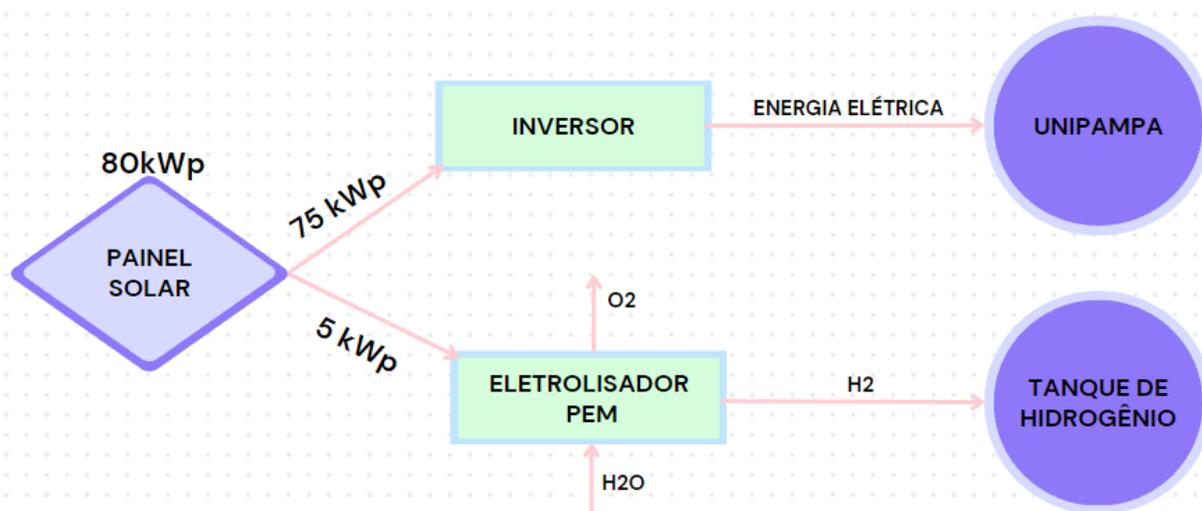
Figura 20 – Sistema de Compressão (Hy-COMP XT HP)



Fonte: H2PLANET

Um fluxograma esquemático é mostrado na Figura 21, demonstrando a composição e funcionamento do projeto.

Figura 21 - Esquematização do sistema composto por painéis solares e eletrolisador



Fonte: Autora, (2023)

Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se como base um modelo proposto por Bezerra *et al.* (2019). A partir dele foi elaborada uma metodologia similar na Universidade.

Segundo informações da Coordenação Administrativa do Campus Bagé, há 80 kilowatt-pico (kWp) de painéis instalados, onde 75 kWp vai para o inversor para gerar energia solar para Unipampa. Assim, restam 5 kWp disponíveis para uso na eletrólise para produzir H<sub>2</sub>V. Salienta-se que, kWp significa o máximo de energia produzida, em condições ideais, sendo medido por meio da potência de um painel fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos comerciais têm eficiências em torno de 20%, podendo ser ligeiramente abaixo ou acima disso. Ou seja, cerca de 20% da energia recebida do sol vai ser transformada em energia elétrica (Canal Solar, 2020).

No caso da eletrólise, considerou-se 60% de eficiência. Conforme mencionado na Revisão da Literatura, eficiência de um eletrolisador é de 55% a 70% (BEZERRA *et al.*, 2019).

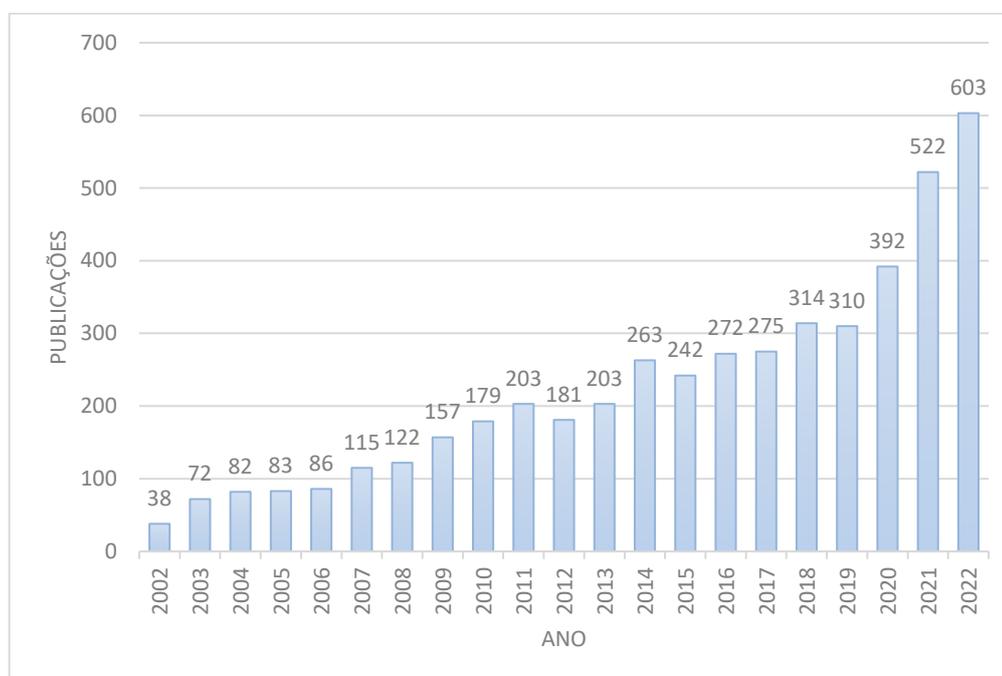
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Revisão Bibliométrica

Foram publicados 4714 documentos com os filtros utilizados. Destes 57 são de instituições brasileiras.

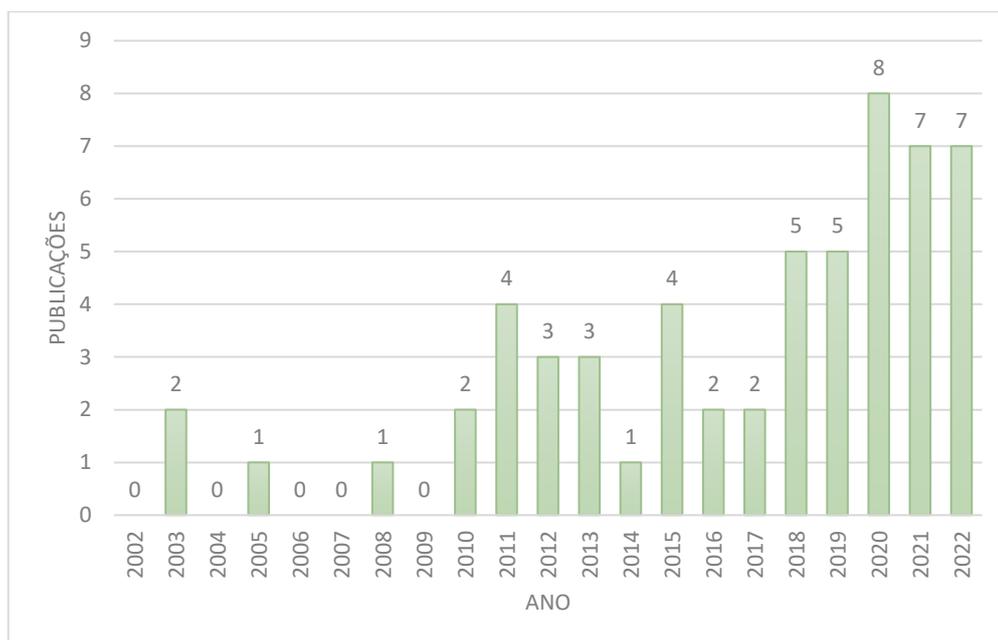
Nos Gráficos 5 e 6 são mostradas, respectivamente, a quantidade de artigos por ano, desde 2002 até 2022 no mundo e no Brasil. Percebe-se claramente a tendência de aumento no número de publicações nessa área, mostrando que é um tema atual, ou seja, um motor de desenvolvimento da área.

Gráfico 5 – Publicações no mundo



Fonte: Autora (2023)

Gráfico 6 - Publicações no Brasil

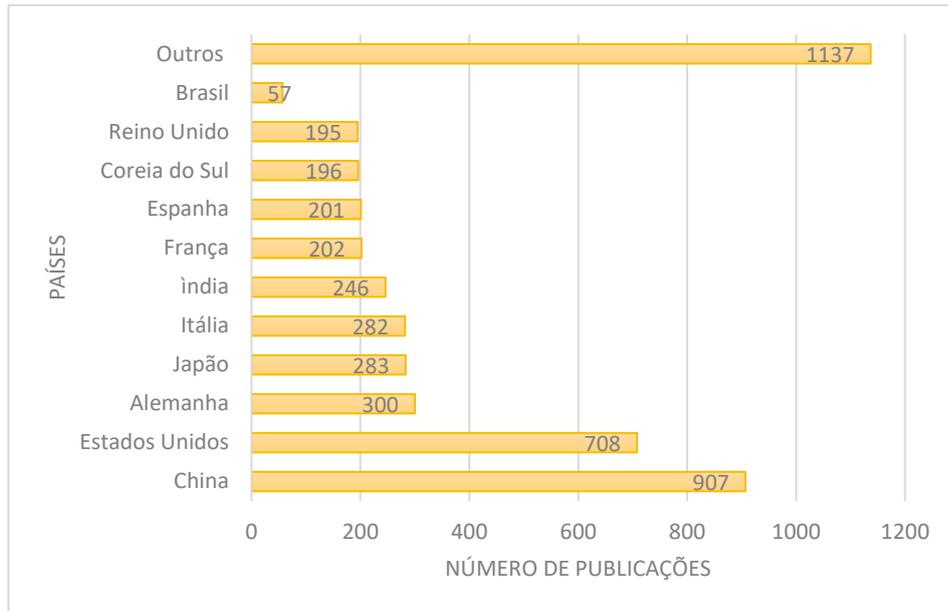


Fonte: Autora (2023)

Com relação ao Brasil, fica evidente como são poucos trabalhos sobre o tema, podendo ser uma área de estudo ainda incipiente e que pode ser mais explorada.

China, Estados Unidos e a Alemanha concentram o maior número de publicações na área. O Brasil está na 12ª posição. Um gráfico comparativo é mostrado no Gráfico 7.

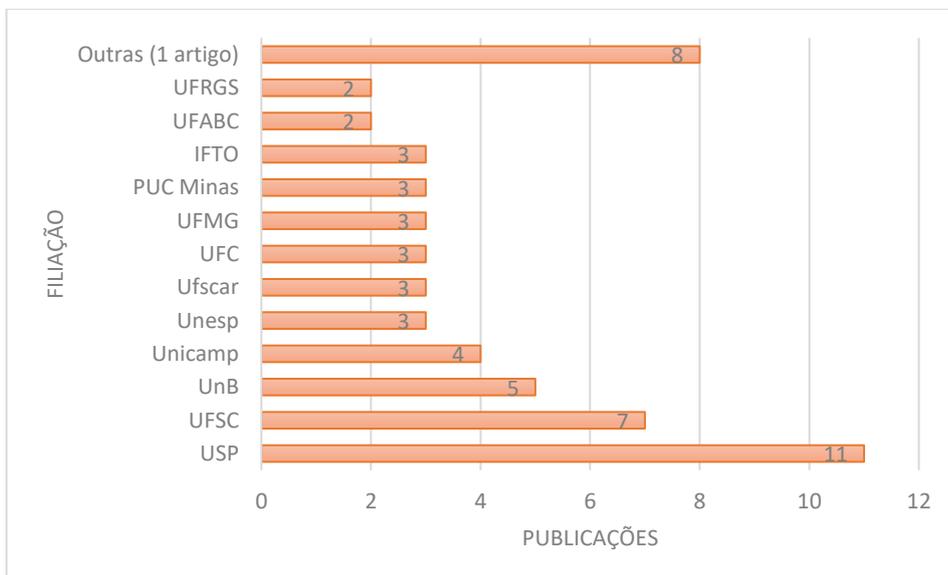
Gráfico 7 - Número de Publicações por País



Fonte: Autora (2023)

Dentre as instituições brasileiras, a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade de Brasília (UnB), tiveram mais publicações na área conforme mostrado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Publicação por Filiação

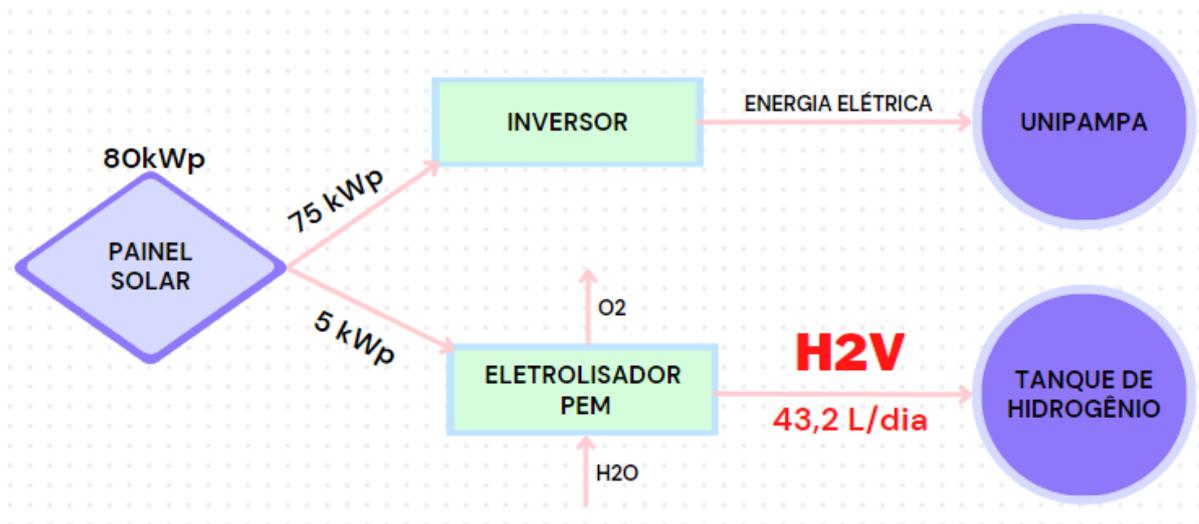


Fonte: Autora (2023)

## 4.2 Estudo de caso

Tendo-se a disponibilidade de 1 kWp para eletrólise gerados pelos painéis fotovoltaicos (20% de 5 kWp) e um período de funcionamento de 8 horas diárias tem-se disponível 8 kWh por dia ou 160 kWh por mês. O eletrolisador funciona por um período de 6 horas diárias, período de permanência no Campus. Sendo a potência elétrica do eletrolisador igual a 960 W (0,96 kW), consumiria 5,76 kWh diariamente ou 115,2 kWh por mês, isto é, 72% da energia disponível (72% de 160 kWh). A produção de H<sub>2</sub> será de 7,2 L/h, considerando-se a eficiência de 60%. Assim, diariamente pode-se produzir 43,2 L de H<sub>2</sub> por dia ou 864 L mensalmente.

Figura 22 – Fluxograma da produção diária de hidrogênio



Fonte: Autora, 2023

Figura 23 - Produção diária de hidrogênio Campus Bagé

Módulo Fotovoltaico	Eletrolisador	Produção de Hidrogênio Verde
Período de funcionamento de 8h diárias  Disponibilidade de 1 kWp >>>> 20% de 5 kWp  Disponível <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diariamente: 8 kWh</li> <li>• Mensalmente: 160 kWh</li> </ul> > 120 dias úteis/mês	Período de funcionamento de 6h diárias  Potência Elétrica: 0,96 kW  Consumiria: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diariamente: 5,76 kWh</li> <li>• Mensalmente: 115,2 kWh</li> </ul> > 115,2 kWh representa 72% de 160 kWh disponível	O eletrolisador é capaz de produzir 12L/h, considerando uma eficiência de 60%: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 7,2 L/h</li> </ul> Resultando: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diariamente: 43,2 L</li> <li>• Mensalmente: 864 L</li> </ul>

O  $H_2$  e o  $O_2$  gasosos gerados na eletrólise serão armazenados e poderão ser utilizados, por exemplo, em células a combustível compondo sistema descentralizado de geração de energia, em conjunto com os painéis fotovoltaicos, para a Universidade.

É importante ressaltar que, um dos pontos que mais impactam a ampliação da produção eletrolítica de  $H_2$ , é o consumo energético. Contudo, nesta pesquisa foi demonstrado que utilizando-se o excedente de energia solar é possível produzir  $H_2V$  de forma limpa e renovável. Claro que outros aspectos ainda devem ser considerados em um projeto, tais como uma análise econômica. Mesmo assim, vale ressaltar a importância de políticas de incentivo às fontes renováveis, com auxílios governamentais à produção de  $H_2V$  podendo tornar uma alternativa atrativa para investidores.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve por objetivo realizar uma revisão bibliométrica da literatura buscando por trabalhos que estão sendo publicados no Brasil e no mundo que relacionam sobre produção de H<sub>2</sub>V com energia fotovoltaica e elaborar um projeto de produção de H<sub>2</sub>V tendo como fonte de energia o excedente gerado em instalações fotovoltaicas da UNIPAMPA Campus Bagé. Com base nos objetivos propostos considerou-se que:

- Este trabalho ofereceu uma breve análise da difusão dos estudos na área de H<sub>2</sub>V gerado por fonte fotovoltaica no Brasil e no mundo, para contribuir com pesquisas científicas futuras e em andamento nesse tema.
- Observou-se uma tendência de crescimento de pesquisas relacionadas ao tema escolhido nos últimos anos, e mais autores brasileiros passaram a publicar artigos sobre o assunto.
- Durante a pesquisa foi possível verificar que a radiação do sol pode contribuir de diversas maneiras com a economia de energia, inclusive na produção de H<sub>2</sub>V por eletrólise.
- Diante do exposto acima e considerando-se a disponibilidade mensal de 160 kWh por mês, que corresponde ao excedente de energia gerado pelo sistema fotovoltaico instalado no Campus Bagé, estimou-se uma geração de 864 L por mês de de H<sub>2</sub>V o qual poderá ser utilizado, por exemplo, em células a combustível compondo sistema descentralizado de geração de energia, em conjunto com os painéis fotovoltaicos, para Universidade.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Principais estatísticas mundiais de energia**. Paris: Agência Internacional de Energia, 2016.
- ALEXANDRE, Alan Michell Barros. **Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas**. 2012.
- ALMEIDA, Eliane et al. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. *Engenharias online*, Belo Horizonte, 2015.
- ALMEIDA, Renata Ribeiro Guedes de et al. **Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica**. *Rev Principia*, v. 1, n. 34, p. 84-92, 2017.
- ARÁN CARRIÓN, J.; ESPÍN ESTRELLA A, F.; AZNAR DOLS F.; ZAMORANO TORO, M.; RODRÍGUEZ, M.; RAMOS RIDAO A. **Environmental Decision-Support Systems for Evaluating the Carrying Capacity of Land Areas: Optimal Sites Selection for GridConnected Photovoltaic Power Planets**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, pp. 2358–2380. 2008.
- BARBOSA FILHO, Wilson Pereira et al. **Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, p. 628-642, 2015.
- BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio Verde: Nasce um gigante no setor de energia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1109>. Acesso em: 1 dez 2022.
- BONDARIK, Roberto; PILATTI, Luiz Alberto; HORST, Diogo José. **Uma visão geral sobre o potencial de geração de energias renováveis no Brasil**. *Interciencia*, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BORBA, Ricardo Augusto; NOVAK, Luis Henrique. **Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes: Aspectos Positivos e Desafios**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado. 2018.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008.

CÂMARA DE COPMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Carga de energia deve crescer em média 3,4% ao ano no período de 2022 a 2026.** CCEE notícias, 2021. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/carga-de-energia-deve-crescer-em-media-3-4-ao-ano-no-periodo-de-2022-a-2026#:~:text=Para%20o%20período%202022-2026,no%20Produto%20Interno%20Bruto%20-%20PIB>. Acesso em: 25 jan. 2023.

CANAL SOLAR. **Potência ou eficiência: o que é mais importante no módulo FV.** Canal solar, 2020. Disponível em: [encurtador.com.br/cMN37](https://www.canalsolar.com.br/cMN37). Acesso em 27 jan. 2023.

CAPURSO, T; STEFANIZZI, M; TORRESI, M; CAMPOREALE, S.m. **Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition.** Energy Conversion and Management, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898>. Acesso em: 30 jan. 2023.

CASTRO, Nivalde De; SANTOS, Vitor; AQUINO, Thereza. **O Brasil e as estratégias da Alemanha para o Hidrogênio Verde.** GESEL, 2021. Disponível em: [https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/23\\_Castro301.pdf](https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/23_Castro301.pdf). Acesso em: 23 nov. 2022.

COLLOT, Anne-gaëlle. **Matching gasification technologies to coal properties.** International Energy Agency-Clean Coal Centre, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516205001229>. Acesso em: 31 jan. 2023.

DENG, Wei; PEI, Wei; YI, Yin; ZHUANG, Ying; KONG, Li. **Study on enhancing hydrogen production potential from renewable energy in multi-terminal DC system.** CEEGE, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721006351>. Acesso em: 11 jan. 2023.

DOMENICO, Michele Di. **Gaseificação mineral brasileiro na presença de ortossilicato de lítio visando a produção aumentada de hidrogênio.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/122608/325600.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#:~:text=Enquanto%20a%20matriz%20energética%20representa,a%20geração%20de%20energia%20elétrica>. Acesso em: 12 jan. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Nova Técnica: Bases Para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>. Acesso em: 12 jan. 2023.

FILHO, Hélio Nunes Souza *et al.* **Produção de hidrogênio (Power to Gas) e suas aplicações na matriz energética.** VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/973/973>. Acesso em: 02 jan. 2023.

KNOB, Daniel. **Geração de Hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica.** Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/en.php>. Acesso em: 06 dez. 2022.

MARIGLIANO, Giuseppe; BARBIERI, Giuseppe; DRIOLI, Enrico. **Effect of energy transport on a palladium: based membrane reactor for methane steam reforming process.** *Catalysis Today*, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920586101002681>. Acesso em: 31 jan. 2023.

MIRANDA, Amanda. **UFSC Produzirá hidrogênio verde em projeto em parceria em Cooperação Alemã.** UFSC, 2022. Disponível em: <https://noticias.ufsc.br/2022/06/ufsc-produzira-hidrogenio-verde-em-projeto-em-parceria-com-cooperacao-alema/>. Acesso em: 17 jan. 2023.

OFFICE ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **Hydrogen fuel basics: hydrogen and fuel cell technologies office.** Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>. Acesso em: 21 jan 2023.

PAIVA, Suelya Da Silva Medonça De. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável.** Repositório UFRN, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47548/1/Producaohidrogenioverde\\_Paiva\\_2022.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/47548/1/Producaohidrogenioverde_Paiva_2022.pdf). Acesso em: 07 jan. 2023.

PERAZZOLI, Débora Lia; GOBBI, Eduardo Felga; TIEPOLO, Gerson Maximo. **Proposta de critérios norteadores e requisitos mínimos para licenciamento ambiental de usinas fotovoltaicas no Brasil.** *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 25, n. 2, p. 333-344, 2020.

PEREIRA, Carlos Augusto Arentz; ESCOLANO, Tania Oliveira; PASTORE, Vitor Ottoni. **Avaliação de aptidão técnica e socioambiental para implantação de parques solares fotovoltaicos com sistema de informação geográfica-SIG**. Revista Internacional de Ciências, v. 10, n. 2, p. 23-42, 2020.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

RIFKIN, Jeremy. **A economia do hidrogênio**. 1. ed. São Paulo: M. Books, 2003.

RODRIGUEZ, Jenny *et al.* **A irradiância solar: conceitos básicos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 40, 2018.

SILVA, Leandro Cardoso. **Otimização da produção de hidrogênio pela reforma a vapor do metano em reator com membrana laboratorial**. Universidade federal de Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15113/1/Leandro.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023

SOUZA, Vivian Passos De. **Reforma a vapor do metano sobre catalisadores de Pt-Ni/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Efeito das condições de síntese e do Teor da Pt nas propriedades de oxi-redução, estruturais e catalíticas**. Universidade Federal de São Carlos, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3908/4054.pdf?sequence=1#:~:text=A%20reforma%20a%20vapor%20é,frente%20a%20outros%20mais%20ativos..> Acesso em: 22 jan. 2023.

TORRES, Camila Dos Santos. **Eletrodos para produção de hidrogênio por eletrólise a partir de glicerina e sacarosa**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/115270/000956430.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 jan. 2023.

UNFCCC. **United Nations Framework Convention on Climate Change Convenção. 21º Conference of the Parties**. Acordo de Paris, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/cop21/>. Acesso em: Acesso em: 20 jan. 2023.

Universidade Federal do Pampa. **Processo seletivo Unipampa 2021: conheça o Campus Bagé**. Disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/ingresso/2021/04/05/processo-seletivo-unipampa-2021-conheca-o-campus-bage/>. Acesso em: 02 fev 2023

VILLALVA, Marcelo Gradella. GAZOLI, Jonas, Rafael. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2021

WANDERLEY, Augusto César Fialho. **Perspectivas de inserção da energia solar fotovoltaica na geração de energia elétrica no Rio Grande do Norte**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

XU, Xianxian; ZHOU, Quan; YU, Dehai. **The future of hydrogen energy: Bio-hydrogen production technology**. International Journal of Hydrogen Energy, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.261>.. Acesso em: 20 dez. 2022.

\_\_\_\_\_. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 10 jan. 2023.

\_\_\_\_\_. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 50 anos. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 10 jan. 2022.

\_\_\_\_\_. Programa Nacional do Hidrogênio. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2023.