

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**MIGUEL RIGON DAMITZ**

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO RIO GRANDE DO  
SUL COM ENERGIA SOLAR**

**BAGÉ  
2024**

**MIGUEL RIGON DAMITZ**

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO RIO GRANDE DO  
SUL COM ENERGIA SOLAR**

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: Sabrina Neves da Silva

**BAGÉ  
2024**

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) .

D161p Damitz, Miguel

Potencial de produção de hidrogênio verde no Rio Grande do  
Sul / Miguel Damitz.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.

"Orientação: Sabrina Silva".

1. Hidrogênio verde. 2. Energia solar. 3. Rio Grande do  
Sul. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**MIGUEL RIGON DAMITZ**

**POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO RIO GRANDE DO  
SUL COM ENERGIA SOLAR**

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 15 de agosto de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Msc. Daniele Ferreira Lopes  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/08/2024, às 17:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES, Usuário Externo**, em 15/08/2024, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2024, às 15:40, 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 **1482312** e o código CRC **929060DC**.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise detalhada do potencial de produção de hidrogênio verde (H2V) no estado do Rio Grande do Sul, utilizando energia solar fotovoltaica como fonte primária. A investigação se baseia nos dados fornecidos pelo Atlas Solar do Rio Grande do Sul, que detalha a produtividade fotovoltaica média anual das áreas aptas urbanas e não urbanas. Com a crescente demanda por fontes de energia renovável e a necessidade urgente de mitigação das mudanças climáticas, o estudo avalia a viabilidade técnica e econômica da produção de hidrogênio verde, considerando diferentes tipos de eletrolisadores: PEMEL, ALEL e AEMEL. A metodologia adotada inclui a análise da produtividade solar em diversas mesorregiões do Estado, integrando fatores como a taxa de ocupação das áreas aptas e a eficiência dos eletrolisadores. Além de apresentar os cálculos detalhados e as estimativas de produção, o estudo discutiu os impactos ambientais e os benefícios em termos de mitigação das mudanças climáticas. Utilizando a equação de conversão energética, foram calculados os potenciais de produção de hidrogênio para cada região, resultando em valores que demonstram a viabilidade da implementação de tais sistemas em larga escala. Os resultados indicaram que o Rio Grande do Sul possui um potencial teórico de geração de energia solar de “aproximadamente” 1700 TWh/ano considerando a área total apta para geração, o que poderia ser convertido em uma produção de H2V. A análise mostrou que, ao utilizar o eletrolisador tipo PEMEL, a produção poderia atingir até 42,3 milhões de toneladas de H2V por ano podendo resultar em uma redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuindo para a sustentabilidade energética e o cumprimento das metas de descarbonização. Este trabalho concluiu que a produção de H2V no Rio Grande do Sul é tecnicamente viável e ambientalmente benéfica, destacando a necessidade de investimentos em infraestrutura e políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis e a transição para uma economia de baixo carbono. A pesquisa oferece uma contribuição substancial para o campo da engenharia de energia.

Palavras-Chave: Hidrogênio verde, Energia solar fotovoltaica, Sustentabilidade energética, Eletrólise, Mudanças climáticas, Rio Grande do Sul.

## ABSTRACT

This work presents a detailed analysis of the potential for green hydrogen (H<sub>2</sub>V) production in the state of Rio Grande do Sul, using photovoltaic solar energy as the primary source. The investigation is based on data provided by the Solar Atlas of Rio Grande do Sul, which details the average annual photovoltaic productivity of both urban and non-urban suitable areas. With the growing demand for renewable energy sources and the urgent need to mitigate climate change, the study evaluates the technical and economic feasibility of green hydrogen production, considering different types of electrolyzers: PEMEL, ALEL, and AEMEL. The adopted methodology includes analyzing solar productivity across various mesoregions of the state, integrating factors such as the occupancy rate of suitable areas and the efficiency of the electrolyzers. In addition to presenting detailed calculations and production estimates, the study discusses the environmental impacts and benefits in terms of climate change mitigation. Using the energy conversion equation, hydrogen production potentials were calculated for each region, resulting in values that demonstrate the feasibility of implementing such systems on a large scale. The results indicated that Rio Grande do Sul has a theoretical solar energy generation potential of approximately 1700 TWh/year, considering the total suitable area for generation, which could be converted into H<sub>2</sub>V production. The analysis showed that by using the PEMEL-type electrolyzer, production could reach up to 42.3 million tons of H<sub>2</sub>V per year, potentially resulting in a significant reduction in carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, contributing to energy sustainability and the achievement of decarbonization goals. This work concludes that H<sub>2</sub>V production in Rio Grande do Sul is technically feasible and environmentally beneficial, highlighting the need for investments in infrastructure and public policies that encourage the use of renewable energy and the transition to a low-carbon economy. The research offers a substantial contribution to the field of energy engineering.

Keywords: Green hydrogen, Photovoltaic solar energy, Energy sustainability, Electrolysis, Climate change, Rio Grande do Sul.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de produção de H <sub>2</sub> V.....	19
Figura 3 - Célula de eletrólise alcalina.....	27
Figura 4 - Representação da conversão de luz solar em energia elétrica.....	29
Figura 5 - Radiação solar emitida pelo Sol para a Terra.....	30
Figura 6 - Localização das usinas centralizadas.....	34
Figura 7 - Áreas aptas para sistemas fotovoltaicos.....	36
Figura 8 - Mesorregiões.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do hidrogênio por cores pelo processo de produção.....	22
Tabela 2 - Produtividade Fotovoltaica Média.....	40
Tabela 3 - Produção de H <sub>2</sub> por região do estado.....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS

GWh - Gigawatt-hora

kWh - Quilowatt-hora

TWh - Terawatt-hora

kJ - Quilojoule

kW- - Quilowatt

MW - Megawatt

m<sup>3</sup>/h - Metro cúbico por hora

mA/cm<sup>2</sup> - Miliampere por centímetro quadrado

J - Joule

W - Watt

J/s - Joule por segundo

MJ/kg - Mega Joule por quilograma

## LISTA DE SIGLAS

H<sub>2</sub> - Hidrogênio

H<sub>2</sub>V - Hidrogênio Verde

PEMEL - Proton Exchange Membrane Electrolysis

ALEL - Alkaline Electrolysis

AEMEL - Anion Exchange Membrane Electrolysis

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

INEEL - Instituto Nacional de Energia Elétrica

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

WRF - Weather Research and Forecasting Model

PCI - Poder Calorífico Inferior

H<sub>2</sub>O - Água

O<sub>2</sub> - Oxigênio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos.....	14
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
3.1 Produção de Hidrogênio.....	15
3.2 Classificação por cores.....	16
3.2.1 Hidrogênio Cinza.....	16
3.2.2 Hidrogênio Azul.....	17
3.2.3 Hidrogênio Verde.....	18
3.2.4 Hidrogênio Turquesa.....	19
3.2.5 Hidrogênio Amarelo.....	20
3.2.6 Hidrogênio Rosa.....	20
3.2.7 Hidrogênio Marrom.....	20
3.2.8 Hidrogênio Branco.....	21
3.3 Poder calorífico.....	22
3.4 Tipos de eletrolisadores.....	23
3.4.1 Eletrolise de membrana de troca de prótons.....	23
3.4.2 Eletrólise alcalina.....	25
3.4.3 Eletrólise com membrana de troca aniônica.....	27
3.5 Energia Solar Fotovoltaica.....	28
3.5.1 Radiação Solar.....	29
3.5.2 Irradiação e Irradiância.....	31
3.5.3 Efeito fotovoltaico.....	31
3.5.4 Energia solar no Rio Grande do Sul.....	32
3.6 Contexto da matriz energética brasileira e do RS.....	34
3.7 Potencial de produção de energia elétrica no estado do RS.....	35
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
4.2 Estudo de caso.....	37
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
5.1 Potencial total de produção para cada tipo de eletrolisador.....	38
5.1.1 No estado do Rio Grande do Sul.....	38
5.1.2 Potencial de produção por região do Estado.....	39
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A transição para uma economia de baixo carbono é um dos maiores desafios enfrentados pelo mundo contemporâneo, e o hidrogênio verde surge como uma solução promissora para a descarbonização de diversos setores industriais e de transporte. Este trabalho tem como tema o potencial de produção de hidrogênio verde no estado do Rio Grande do Sul, utilizando energia solar fotovoltaica como fonte primária. A escolha do tema se justifica pela necessidade de encontrar alternativas sustentáveis e eficazes para mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões CO<sub>2</sub>.

O estudo delimita-se à análise do potencial de produção de hidrogênio verde no Rio Grande do Sul, considerando a disponibilidade e eficiência das tecnologias de eletrólise e a capacidade de geração de energia solar na região. O objetivo geral é avaliar a viabilidade de produção de hidrogênio verde no estado. Os objetivos específicos incluem: descrever a capacidade da energia solar fotovoltaica como uma fonte de energia limpa e renovável, comparar a produção de hidrogênio verde para diferentes modelos de eletrolisadores e estimar o potencial de produção de hidrogênio verde por região do estado.

A justificativa para a escolha do tema reside na crescente demanda por fontes de energia renováveis e na necessidade de soluções inovadoras para enfrentar os desafios ambientais globais. O Rio Grande do Sul possui um alto potencial de geração de energia solar, que pode ser aproveitado para a produção de hidrogênio verde, contribuindo para a sustentabilidade energética e a redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

A metodologia adotada inclui a análise de dados fornecidos pelo Atlas Solar do Rio Grande do Sul, que detalha a produtividade fotovoltaica média anual das áreas aptas urbanas e não urbanas. Serão utilizados modelos de eletrolisadores, como PEMEL, ALEL e AEMEL, para avaliar a eficiência de conversão de energia solar em hidrogênio. O estudo também considera fatores como a taxa de ocupação das áreas aptas e a eficiência dos eletrolisadores.

A organização deste trabalho é estruturada em capítulos que abrangem desde a definição do tema até a análise dos resultados e considerações finais. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, seguido pelos objetivos gerais e

específicos no segundo capítulo. O terceiro capítulo aborda a revisão bibliográfica, onde são discutidos conceitos fundamentais sobre a produção de hidrogênio, classificação por cores, poder calorífico e tipos de eletrolisadores. A metodologia é detalhada no quarto capítulo, enquanto os resultados e discussões são apresentados no quinto capítulo. Por fim, o sexto capítulo traz as considerações finais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

O trabalho tem como objetivo estudar o potencial de produção de hidrogênio verde no Estado do Rio Grande do Sul utilizando energia solar como fonte primária.

### **2.2 Específicos**

- Descrever a capacidade da energia solar fotovoltaica como uma fonte de energia limpa e renovável para a produção de H<sub>2</sub>V no Rio Grande do Sul.
- Comparar a produção de H<sub>2</sub>V para diferentes modelos de eletrolisadores.
- Estimar o Potencial de produção de H<sub>2</sub>V a partir da energia solar fotovoltaica por região do Estado do Rio Grande do Sul.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho aborda de forma simples e direta a produção de hidrogênio, destacando sua importância para a transição para uma economia de baixo carbono. Inicialmente, discute-se a produção de hidrogênio e sua classificação por cores: cinza, azul, verde, turquesa, amarelo, rosa, marrom e branco, cada uma com suas características específicas. O poder calorífico do hidrogênio é ressaltado por sua alta eficiência energética. São descritos os diferentes tipos de eletrolisadores utilizados na produção de hidrogênio verde e suas vantagens. A energia solar fotovoltaica é destacada como uma fonte limpa e competitiva, com avanços tecnológicos que melhoram sua eficiência. Por fim, é abordado o contexto da matriz energética brasileira e o potencial de produção de energia solar no Rio Grande do Sul, enfatizando a oportunidade de integrar energias renováveis na produção de H<sub>2</sub>V e contribuir para a sustentabilidade energética global.

#### 3.1 Produção de Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo e, devido a alta densidade energética, desempenha um papel fundamental na transição energética global. No entanto, ele não está disponível de forma livre na natureza, sendo necessário produzi-lo a partir de outras substâncias, como água e combustíveis fósseis. Portanto, o principal desafio é separar o hidrogênio dos compostos naturais de forma eficiente e econômica (Kumar e Lim, 2022).

A importância do hidrogênio na indústria é significativa. Ele pode ser utilizado como combustível em diversos setores industriais, substituindo combustíveis fósseis e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o hidrogênio pode ser empregado na produção de aço, cimento e produtos químicos, setores que tradicionalmente são grandes emissores de CO<sub>2</sub>. A transição para o hidrogênio não só ajuda a cumprir metas ambientais, mas também pode impulsionar a inovação tecnológica e criar novas oportunidades de mercado (Martín *et al.*, 2021).

O hidrogênio ainda pode trazer benefícios diretos e indiretos. Por exemplo, ele pode ser utilizado em veículos movidos a célula de combustível, que emitem vapor d'água como subproduto, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar nas

idades. Além disso, pode ser uma solução para o armazenamento de energia, permitindo uma maior integração de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, na rede elétrica. Isso pode resultar em uma energia mais limpa e estável para os consumidores (Kovač, Paranos e Marciuš, 2021).

Apesar das vantagens, a produção e utilização do hidrogênio ainda enfrentam desafios, como os altos custos de produção e a necessidade de infraestrutura adequada para armazenamento e distribuição. No entanto, com o aumento dos investimentos e o avanço das tecnologias, espera-se que esses obstáculos sejam superados. Países como Japão, Reino Unido e Estados Unidos já estão desenvolvendo estratégias nacionais para incorporar o hidrogênio verde em suas matrizes energéticas, o que demonstra o potencial e a importância dessa tecnologia para um futuro sustentável (Qazi, 2022).

### **3.2 Classificação por cores**

Conforme mencionado anteriormente, o hidrogênio pode contribuir para a descarbonização da economia global. O alto conteúdo energético, a flexibilidade de obtenção a partir de diferentes fontes e a abundância desse elemento químico são razões pelas quais muitos setores podem se beneficiar dele na chamada economia do hidrogênio. No entanto, quase todo o hidrogênio produzido hoje vem de combustíveis fósseis (principalmente de gás natural via reforma de metano a vapor) e tem uma alta pegada de carbono associada. A produção de hidrogênio de fontes mais ecológicas tem sido uma área de pesquisa intensiva nos últimos anos. A necessidade de categorizar as formas de produzir hidrogênio a partir de cores foi adotada como forma de associar a matéria prima e o método a partir do qual o hidrogênio foi produzido (Incer-Valverde *et al.*, 2023).

Ainda segundo o trabalho supracitado, os autores propõem uma classificação com as cores mais comuns coletadas da literatura que podem ser úteis em uma economia de hidrogênio em larga escala. Contudo, espera-se que o hidrogênio verde se torne o método de produção mais popular e economicamente competitivo com os preços do gás natural até 2050.

#### **3.2.1 Hidrogênio Cinza**

O hidrogênio cinza é produzido principalmente através do processo de

reforma a vapor do metano, utilizando gás natural como matéria-prima. Este método é amplamente utilizado devido à sua eficiência e custo relativamente baixo. No entanto, a produção de hidrogênio cinza resulta em altas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuindo significativamente para o efeito estufa e as mudanças climáticas (Howarth e Jacobson, 2021).

Os impactos ambientais do hidrogênio cinza são consideráveis, uma vez que a reforma a vapor do metano libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, a extração e o transporte do gás natural podem resultar em emissões fugitivas de metano, um gás de efeito estufa ainda mais potente que o CO<sub>2</sub>. Portanto, embora o hidrogênio cinza seja economicamente viável, ele não é uma solução sustentável a longo prazo (Howarth e Jacobson, 2021).

O principal uso do hidrogênio cinza é na indústria química, especialmente na produção de amônia para fertilizantes e na refinação de petróleo. Devido ao seu custo mais baixo, ele é preferido em aplicações onde a sustentabilidade ambiental não é a principal preocupação (Howarth e Jacobson, 2021).

### **3.2.2 Hidrogênio Azul**

O hidrogênio azul é produzido de maneira semelhante ao hidrogênio cinza, mas com a adição de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Este método visa tornar a produção de hidrogênio mais sustentável, capturando até 90% das emissões de carbono geradas durante o processo (Fakher *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens ambientais do hidrogênio azul, ele ainda enfrenta desafios significativos. A captura e armazenamento de carbono são processos caros e complexos, e a eficiência da captura de carbono pode variar. Além disso, a produção de hidrogênio azul ainda depende de combustíveis fósseis, o que significa que não é completamente livre de emissões (Tetteh e Salehi, 2022).

O hidrogênio azul é visto como uma solução de transição para a economia de hidrogênio, sendo utilizado em setores industriais e de energia onde a redução das emissões de carbono é crucial. Ele pode ser uma alternativa viável até que tecnologias de hidrogênio verde se tornem mais acessíveis e amplamente disponíveis (Tetteh e Salehi, 2022).

### 3.2.3 Hidrogênio Verde

O H<sub>2</sub>V, foco deste trabalho, é produzido através da eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis, como solar e eólica, o que resulta em baixas emissões de carbono praticamente nulas. Este processo é visto como uma solução promissora para a descarbonização da economia e a mitigação das mudanças climáticas (Rasayan e Santosh, 2023).

Este método não gera emissões de CO<sub>2</sub>, tornando o hidrogênio verde a opção mais sustentável e ambientalmente amigável (Yu, Wang e Vredenburg, 2021).

Os impactos ambientais do hidrogênio verde são mínimos, uma vez que a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis. No entanto, a produção de hidrogênio verde é atualmente mais cara do que outras formas de hidrogênio, devido aos altos custos associados à infraestrutura de energia renovável e à tecnologia de eletrólise (Yu, Wang e Vredenburg, 2021).

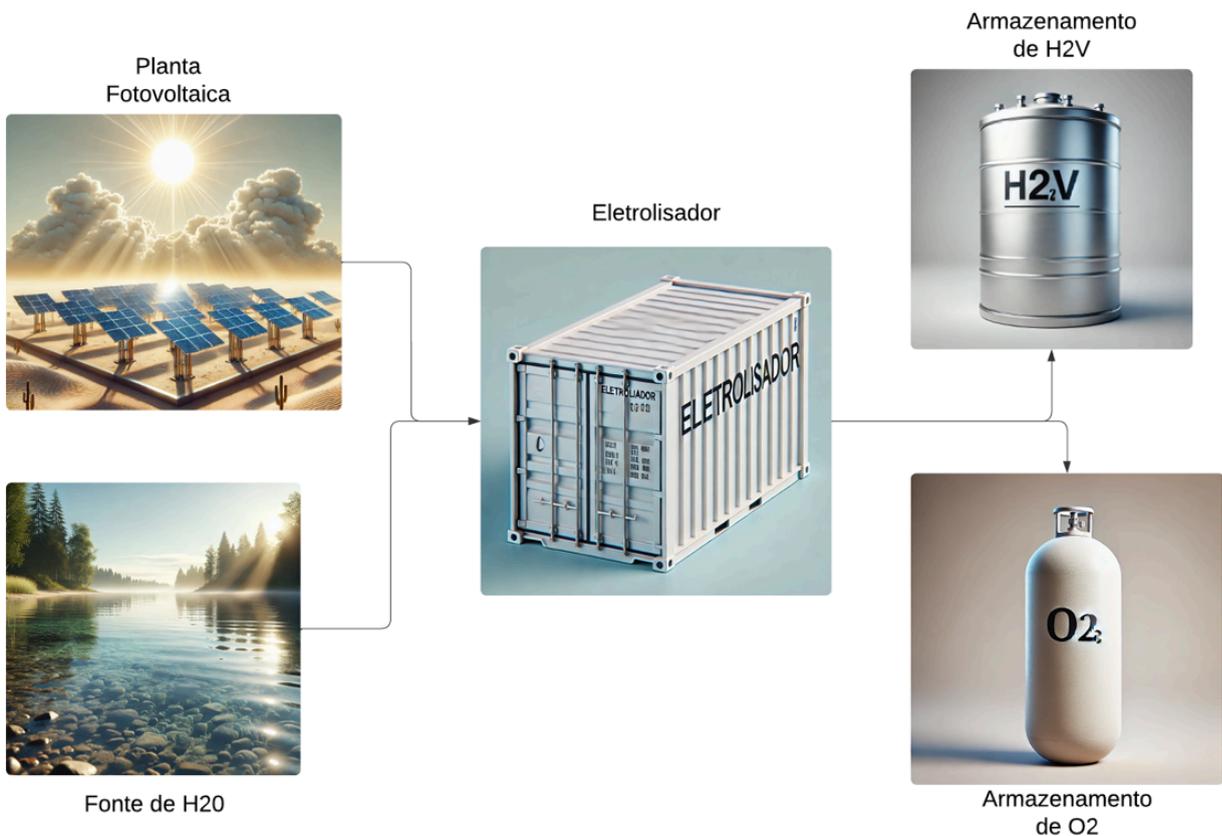
O principal uso do hidrogênio verde é em aplicações onde a sustentabilidade é uma prioridade, como no transporte de veículos a célula de combustível e na geração de energia limpa. À medida que os custos das tecnologias renováveis diminuem, espera-se que o hidrogênio verde se torne mais competitivo economicamente (Yu, Wang e Vredenburg, 2021).

Na figura 1, é ilustrado um processo de produção de H<sub>2</sub>V a partir de energia solar fotovoltaica. Este processo inicia-se com a captação de energia solar através de uma planta fotovoltaica, onde os painéis solares convertem a luz do sol em energia elétrica.

Em paralelo, é utilizada uma fonte de água (H<sub>2</sub>O), que é importante para o processo de eletrólise. A energia elétrica gerada pelos painéis solares é então direcionada para o eletrolisador, que é responsável por dividir a molécula de água em seus componentes básicos: H<sub>2</sub> e oxigênio (O<sub>2</sub>).

O hidrogênio produzido, também conhecido como hidrogênio verde, pode ser então armazenado em tanques específicos para H<sub>2</sub>V, prontos para serem utilizados de diferentes formas. O oxigênio resultante do processo de eletrólise é igualmente armazenado, podendo ser utilizado em diversas aplicações industriais.

Figura 1 - Esquema de produção de H<sub>2</sub>V



Fonte: Autor, 2024

### 3.2.4 Hidrogênio Turquesa

O hidrogênio turquesa é produzido através da pirólise do metano, um processo que decompõe o metano em hidrogênio e carbono sólido. Este método não gera emissões de CO<sub>2</sub>, mas ainda depende do gás natural como matéria-prima (Kusoglu, 2021).

Os impactos ambientais do hidrogênio turquesa são menores em comparação com o hidrogênio cinza e azul, pois o carbono é capturado na forma sólida e pode ser utilizado em outras indústrias, como a de materiais de construção. No entanto, a dependência do gás natural ainda representa um desafio em termos de sustentabilidade (Kusoglu, 2021).

O hidrogênio turquesa pode ser utilizado em aplicações industriais e de transporte, oferecendo uma alternativa de baixo carbono para setores que buscam reduzir suas emissões sem comprometer a eficiência e o custo (Kusoglu, 2021).

### **3.2.5 Hidrogênio Amarelo**

O hidrogênio amarelo é produzido através da eletrólise da água, utilizando eletricidade proveniente de fontes nucleares. Este método é semelhante ao hidrogênio verde, mas utiliza energia nuclear em vez de renováveis (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

Os impactos ambientais do hidrogênio amarelo dependem da percepção pública e da gestão dos resíduos nucleares. Embora a energia nuclear não emita CO<sub>2</sub> durante a geração de eletricidade, a gestão dos resíduos nucleares e os riscos associados à segurança são preocupações significativas (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

O hidrogênio amarelo pode ser utilizado em setores onde a energia nuclear já é uma fonte significativa de eletricidade, oferecendo uma opção de hidrogênio de baixo carbono que complementa a infraestrutura existente (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

### **3.2.6 Hidrogênio Rosa**

O hidrogênio rosa é produzido de maneira semelhante ao hidrogênio amarelo, mas especificamente utilizando eletricidade gerada por reatores nucleares de nova geração, que são mais eficientes e seguros (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

Os impactos ambientais do hidrogênio rosa são semelhantes aos do hidrogênio amarelo, com a vantagem adicional de utilizar tecnologias nucleares mais avançadas que podem reduzir os riscos e melhorar a gestão de resíduos (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

O hidrogênio rosa pode ser uma opção viável para países com uma infraestrutura nuclear avançada, oferecendo uma fonte de hidrogênio de baixo carbono que pode ser integrada em várias aplicações industriais e de transporte (Panić, Cuculić e Ćelić, 2022).

### **3.2.7 Hidrogênio Marrom**

O hidrogênio marrom é produzido através da gasificação do carvão, um processo que converte o carvão em gás de síntese, que é então utilizado para produzir hidrogênio. Este método é altamente poluente, gerando grandes quantidades de CO<sub>2</sub> e outros poluentes (Kusoglu, 2021).

Os impactos ambientais do hidrogênio marrom são extremamente negativos, devido às altas emissões de CO<sub>2</sub> e à poluição associada à mineração e queima de carvão. Este método é considerado insustentável e não é uma opção viável para um futuro de baixo carbono (Kusoglu, 2021).

O hidrogênio marrom é utilizado principalmente em regiões onde o carvão é abundante e barato, mas sua utilização está diminuindo devido às preocupações ambientais e à pressão para reduzir as emissões de carbono (Kusoglu, 2021).

### **3.2.8 Hidrogênio Branco**

O hidrogênio branco refere-se ao hidrogênio encontrado na natureza em forma livre, geralmente em depósitos subterrâneos. Este tipo de hidrogênio é raro e ainda não é explorado comercialmente devido às dificuldades técnicas e econômicas associadas à sua extração (Kusoglu, 2021).

Os impactos ambientais do hidrogênio branco são mínimos, pois ele não requer processos industriais para sua produção. No entanto, a viabilidade econômica e técnica da extração de hidrogênio branco ainda é um campo de pesquisa em desenvolvimento (Kusoglu, 2021).

O hidrogênio branco tem o potencial de ser uma fonte de hidrogênio de baixo custo e baixo impacto ambiental no futuro, mas mais pesquisas e desenvolvimento são necessários para explorar essa possibilidade (Kusoglu, 2021).

Em síntese, na Tabela 1 é mostrada a classificação por cores dos tipos de hidrogênio com base na fonte de energia e nas emissões.

Tabela 1- Classificação do hidrogênio por cores pelo processo de produção

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Cinza	Reforma a vapor do metano, utilizando gás natural como matéria-prima, resultando em altas emissões de CO <sub>2</sub> .
Azul	Produzido de maneira semelhante ao hidrogênio cinza, mas com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para reduzir as emissões de CO <sub>2</sub> .
Verde	Produzido através da eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis (solar e eólica), resultando em emissões de carbono praticamente nulas.
Turquesa	Produzido através da pirólise do metano, que decompõe o metano em hidrogênio e carbono sólido, sem gerar emissões de CO <sub>2</sub> .
Amarelo	Produzido através da eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes nucleares.
Rosa	Produzido de maneira semelhante ao amarelo, mas com reatores nucleares de nova geração, que são mais eficientes e seguros.
Marrom	Produzido através da gasificação do carvão, gerando grandes quantidades de CO <sub>2</sub> e outros poluentes.
Branco	Refere-se ao hidrogênio encontrado na natureza em forma livre, geralmente em depósitos subterrâneos, ainda não explorado comercialmente.

Fonte: Autor, 2024

### 3.3 Poder calorífico

O poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio é uma medida crucial para avaliar a eficiência energética desse combustível. O PCI representa a quantidade de energia liberada durante a combustão do hidrogênio, sem considerar a energia contida no vapor de água produzido. Isso é particularmente relevante para aplicações onde a recuperação do calor latente de vaporização não é viável, como em motores de combustão interna e células a combustível. O hidrogênio, com um PCI de aproximadamente 120 MJ/kg, é considerado um dos combustíveis mais eficientes em termos de energia por unidade de massa, superando significativamente outros combustíveis fósseis e biocombustíveis (Singh *et al.*, 2020).

A importância do PCI do hidrogênio se estende a várias áreas, incluindo a

geração de energia e o transporte. Em sistemas de energia, o PCI é utilizado para calcular a eficiência de conversão de energia e para projetar sistemas de armazenamento e distribuição de hidrogênio. No setor de transporte, o PCI é fundamental para determinar a autonomia dos veículos movidos a hidrogênio e para comparar a eficiência energética com veículos movidos a combustíveis tradicionais. Além disso, o PCI é um parâmetro essencial na avaliação do desempenho de novas tecnologias de armazenamento de hidrogênio, como materiais à base de grafeno, que visam melhorar a densidade de armazenamento e a eficiência de liberação de energia (Jain e Kandasubramanian, 2020).

Quando a energia elétrica é convertida em calor, segue-se o princípio da conservação de energia, onde 1 kWh é equivalente a 3.600.000 J. Esse valor é derivado da definição de 1 W como 1 J/s, multiplicado pelo número de segundos em uma hora (3600 segundos) (SOUZA; SILVA; ARAUJO, 2014).

### **3.4 Tipos de eletrolisadores**

#### **3.4.1 Eletrolise de membrana de troca de prótons**

A eletrólise de membrana de troca de prótons (PEMEL) é uma tecnologia avançada para a produção de hidrogênio verde, essencial para a transição para uma economia de baixo carbono. A PEMEL utiliza eletricidade para dividir a água em hidrogênio e oxigênio, sendo particularmente eficaz quando alimentada por fontes de energia renovável, como solar e eólica. Esta tecnologia é valorizada por sua alta eficiência e capacidade de armazenar energia renovável não utilizada para uso posterior, tornando-se uma solução viável para os setores de transporte e energia (Aouali *et al.*, 2017).

Um dos principais desafios da PEMEL é a necessidade de aumentar a densidade de corrente, temperatura e pressão de saída de H<sub>2</sub> para reduzir os custos de produção. Para minimizar esse efeito, foi desenvolvida uma camada de transporte porosa que permite a operação em condições extremas, como 6 A/cm<sup>2</sup>, 90 °C e 90 bar de pressão de saída de H<sub>2</sub>. Esta inovação melhora significativamente a gestão de gás/água no eletrolisador, aumentando a faixa de operação e a eficiência do sistema (Stiber *et al.*, 2021).

A eficiência da produção de hidrogênio verde através da PEMEL também depende do desenvolvimento de materiais catalíticos avançados. Estudos recentes

focaram na modificação de eletrocatalisadores para a reação de evolução de oxigênio, introduzindo materiais magnéticos para melhorar a separação de bolhas de oxigênio na superfície do eletrodo. Esta abordagem resultou em um aumento significativo na densidade de corrente, demonstrando o potencial de melhorias contínuas na eficiência do sistema (Kaya *et al.*, 2021).

Além dos avanços em materiais, a modelagem dinâmica dos sistemas de eletrólise é crucial para otimizar o desempenho sob fontes de energia intermitentes. Modelos dinâmicos genéricos têm sido desenvolvidos para prever o comportamento do eletrolisador em diferentes temperaturas e condições operacionais, permitindo uma melhor compreensão e controle dos parâmetros críticos do sistema (Sood *et al.*, 2020).

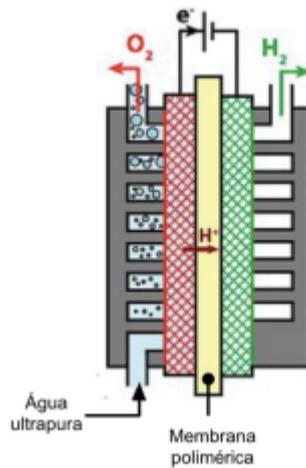
A produção de hidrogênio verde através da PEMEL é uma área de pesquisa ativa, com esforços contínuos para reduzir os custos e aumentar a eficiência. A introdução de membranas revestidas com catalisadores e a construção de dispositivos de célula empilhada têm mostrado resultados promissores, com sistemas de eletrólise de 20 kW alcançando uma eficiência energética de 82,9% a uma densidade de corrente de 1000 mA/cm<sup>2</sup> e temperatura de 70 °C (Zhang *et al.*, 2021).

A tecnologia PEMEL enfrenta desafios relacionados ao custo dos materiais e à eficiência operacional. No entanto, a pesquisa contínua em novos materiais e técnicas de otimização está pavimentando o caminho para a comercialização em larga escala. A combinação de eletrolisadores PEM com fontes de energia renovável oferece uma solução sustentável e eficiente para a produção de hidrogênio verde, essencial para alcançar as metas de descarbonização (Chen *et al.*, 2022).

Em resumo, a eletrólise de membrana de troca de prótons é uma tecnologia chave para a produção de hidrogênio verde, com avanços significativos em materiais, modelagem e eficiência operacional. A eficiência média para a produção de hidrogênio verde utilizando sistemas PEMEL pode alcançar até 82,9% sob condições otimizadas (Zhang *et al.*, 2021).

Na Figura 2, é ilustrado o processo de eletrólise utilizando a tecnologia PEMEL

Figura 2 - Célula de eletrólise tipo PEMEL



Fonte: Moura *et al.* (2024)

### 3.4.2 Eletrólise alcalina

A eletrólise alcalina (ALEL) é uma das tecnologias mais eficientes para a produção industrial de hidrogênio verde. Estudos recentes demonstram que eletrolisadores alcalinos podem operar em modos dinâmicos, absorvendo flutuações de energia provenientes de fontes renováveis. Um exemplo é um eletrolisador industrial com capacidade de produção de hidrogênio de 50 m<sup>3</sup>/h, que opera com eficiência energética competitiva e alta pureza de H<sub>2</sub> (>99,5%) (Chang *et al.*, 2021).

A aplicação de soluções de hidróxido de zinco alcalino tem mostrado potencial para aumentar a eficiência da eletrólise alcalina. Em um estudo, a utilização de soluções de zincato de sódio e potássio em NaOH e KOH, respectivamente, resultou em uma taxa de evolução de hidrogênio significativamente maior em comparação com eletrolisadores alcalinos convencionais. Este avanço pode ser crucial para reduzir os custos de produção de hidrogênio (Horri *et al.*, 2019).

A temperatura de operação também é um fator crítico na eficiência dos sistemas de eletrólise alcalina. Modelos numéricos indicam que temperaturas operacionais mais altas aumentam a eficiência do sistema, especialmente em regiões de alta densidade de corrente. A otimização da temperatura e da densidade de corrente pode levar a uma redução substancial nos custos operacionais (Jang *et al.*, 2021).

Uma abordagem inovadora para reduzir o consumo de energia na geração de hidrogênio é a eletrólise anfotérica ácido/alcalina. Este método utiliza uma solução ácida para a produção de hidrogênio e uma solução alcalina para a evolução de oxigênio, separadas por uma membrana. Esta configuração reduz a polarização dos eletrodos e aumenta a taxa de produção de hidrogênio, além de diminuir o consumo de energia em cerca de 30% (Lei *et al.*, 2019).

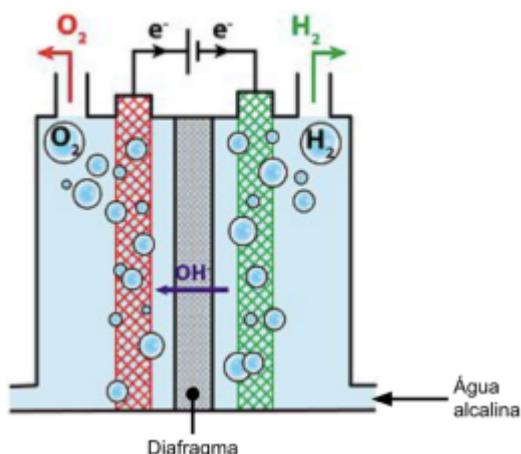
Outra estratégia promissora é a substituição da reação de evolução de oxigênio (OER) pela reação de oxidação de glicerol (GOR) no ânodo. Esta substituição pode reduzir significativamente a voltagem necessária para a eletrólise, aumentando a eficiência do sistema. Um eletrolisador híbrido ácido/alcalino utilizando esta abordagem mostrou alta eficiência faradaica para a produção de H<sub>2</sub> e formiato (Liu *et al.*, 2022).

A comparação entre eletrolisadores com eletrólitos ácidos e alcalinos revela que os eletrolisadores alcalinos, com catalisadores à base de níquel e separadores mais finos, podem ser mais eficientes do que os sistemas ácidos com catalisadores de irídio e platina. Esta diferença de desempenho é atribuída principalmente à maior difusividade dos gases no eletrólito ácido (Schalenbach *et al.*, 2016).

Em resumo, a eletrólise alcalina continua a ser uma tecnologia viável e eficiente para a produção de hidrogênio verde, especialmente com avanços em soluções eletrolíticas, otimização de temperatura e novas abordagens de eletrólise. A eficiência média para a produção de H<sub>2</sub> verde em sistemas de eletrólise alcalina varia entre 65% e 73,1% (Chang *et al.*, 2021).

Na Figura 3, é ilustrado o processo de eletrólise utilizando a tecnologia AMEL.

Figura 3 - Célula de eletrólise alcalina



Fonte: Moura *et al.* (2024)

### 3.4.3 Eletrólise com membrana de troca aniônica

A tecnologia de eletrólise com membrana de troca aniônica (AEMEL) tem se destacado como uma solução promissora para a produção de hidrogênio verde, utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis. A AEMEL combina as vantagens das tecnologias de eletrólise de membrana de troca de prótons (PEM) e de eletrólise alcalina convencional, ao mesmo tempo que elimina algumas de suas desvantagens. A principal vantagem da AEMEL é a possibilidade de utilizar componentes menos caros, como catalisadores de metais não preciosos e materiais de aço, o que pode reduzir significativamente os custos de produção (Lindquist *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de catalisadores à base de metais de transição tem sido um foco importante na pesquisa de AEMEL. Esses catalisadores são essenciais para melhorar a eficiência das reações de evolução de hidrogênio (HER) e de oxigênio (OER). A otimização desses materiais é crucial para aumentar a durabilidade e a atividade catalítica, o que, por sua vez, pode reduzir os custos de fabricação e facilitar a comercialização da tecnologia AEMEL (Sulaiman, Wong e Loh, 2021).

Além dos catalisadores, a membrana de troca aniônica é um componente crítico que influencia diretamente a eficiência da eletrólise. As membranas poliméricas sólidas alcalinas têm sido investigadas por sua capacidade de separar os eletrodos, transferir íons e atuar como barreiras ao fluxo de elétrons. A caracterização dessas membranas, incluindo sua capacidade de troca iônica,

condutividade iônica e estabilidade química e mecânica, é fundamental para o avanço da tecnologia AEMEL (Zakaria e Kamarudin, 2021).

A eficiência da produção de hidrogênio em AEMEL também depende de vários parâmetros operacionais, como a concentração do eletrólito, a taxa de fluxo do eletrólito e a temperatura de operação. Estudos mostram que a otimização desses parâmetros pode levar a um aumento significativo na produção de hidrogênio e na eficiência energética do sistema. Por exemplo, a produção de hidrogênio pode atingir uma eficiência energética de 69,64% sob condições operacionais otimizadas (Azam *et al.*, 2023).

### **3.5 Energia Solar Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica converte a luz solar diretamente em eletricidade através de células fotovoltaicas. Esta tecnologia tem se destacado como altamente competitiva em termos de custo e desempenha um papel crucial na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo significativamente para a descarbonização global. Como uma fonte de energia limpa e renovável, a energia solar fotovoltaica não emite gases de efeito estufa durante a geração de eletricidade, além de possuir componentes sem partes móveis, o que reduz a necessidade de manutenção.

Adicionalmente, os contínuos avanços tecnológicos têm melhorado a eficiência dos sistemas e reduzido os custos de produção e instalação, tornando a energia solar fotovoltaica uma opção viável e sustentável para atender às demandas energéticas futuras. Esses avanços incluem a utilização de novos materiais, como compostos de perovskita, e a implementação de técnicas inovadoras de fabricação, que aumentam a eficiência das células fotovoltaicas e diminuem os custos associados (Victoria *et al.*, 2021).

De acordo com a figura 4, o processo de forma resumida pode ser descrito como a conversão da luz solar em energia elétrica por meio de placas solares instaladas no telhado. Essas placas são compostas por várias células fotovoltaicas, que são os principais componentes responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade.

Figura 4 - Representação da conversão de luz solar em energia elétrica



Fonte: Autor, 2024

### 3.5.1 Radiação Solar

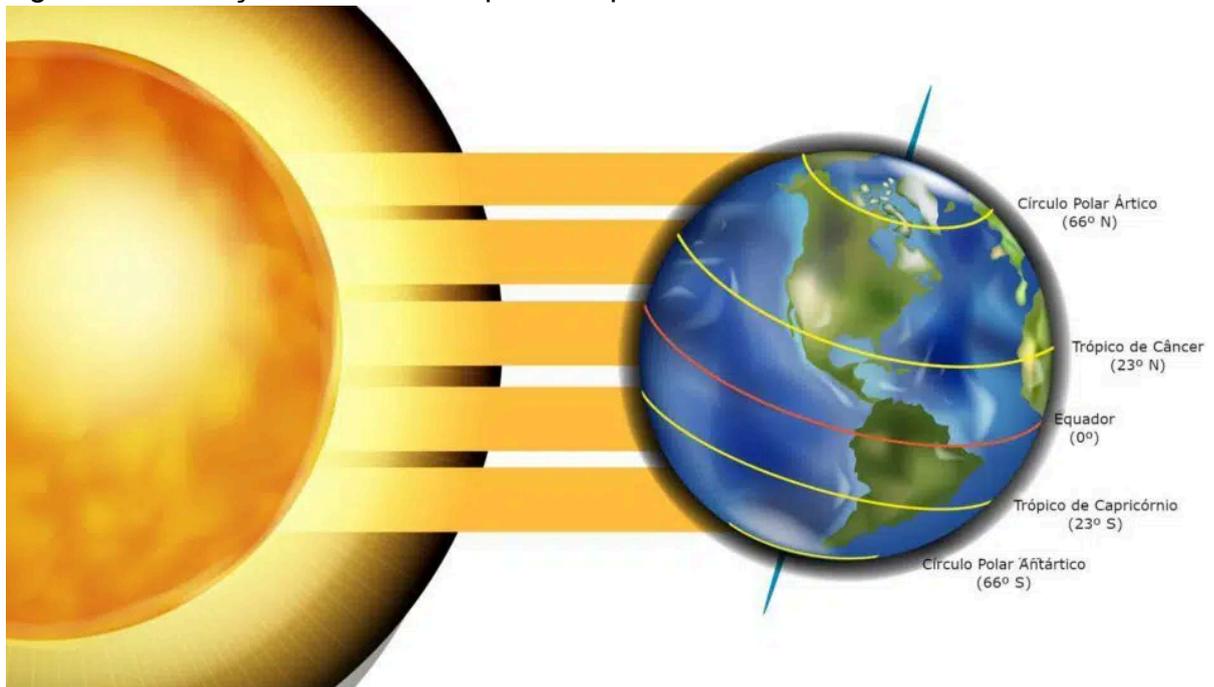
A radiação solar é a energia emitida pelo sol na forma de ondas eletromagnéticas, abrangendo uma ampla gama de comprimentos de onda, desde o ultravioleta até o infravermelho. Essa energia é fundamental para diversas aplicações em engenharia, especialmente na geração de energia limpa e sustentável. A utilização da radiação solar para a produção de eletricidade e calor tem se mostrado uma alternativa promissora frente à crescente demanda energética e aos problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis (Kasaeian *et al.*, 2020).

No campo da engenharia, a radiação solar é aproveitada por meio de diferentes tecnologias, como coletores solares, painéis fotovoltaicos e sistemas de concentração solar. Os coletores solares, por exemplo, são dispositivos que capturam a energia térmica do sol para aquecer fluidos, que podem ser utilizados em processos industriais ou para a geração de eletricidade em sistemas de ciclo Rankine orgânico. Já os painéis fotovoltaicos convertem diretamente a luz solar em eletricidade, sendo amplamente utilizados em instalações residenciais, comerciais e em grandes usinas solares (Kasaeian *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020).

Os sistemas de concentração solar, como as torres solares e os coletores parabólicos, utilizam espelhos ou lentes para concentrar a radiação solar em um ponto focal, aumentando a temperatura e a eficiência da conversão energética. Esses sistemas são particularmente eficazes em regiões com alta incidência solar e são capazes de gerar grandes quantidades de energia elétrica, além de serem integrados a sistemas de armazenamento térmico para fornecer energia de forma contínua, mesmo durante a noite ou em dias nublados (Kasaeian *et al.*, 2020).

Na figura 5, é ilustrado uma forma genérica de como as ondas eletromagnéticas chegam ao planeta Terra.

Figura 5 - Radiação solar emitida pelo Sol para a Terra



Fonte: Definição, Importância, Tipos e Efeitos no Planeta. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/radiacao-solar/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

### 3.5.2 Irradiação e Irradiância

A irradiação e a irradiância são conceitos fundamentais na engenharia e na geração de energia, especialmente no contexto de tecnologias que envolvem a manipulação de materiais e a conversão de energia.

A irradiação refere-se ao processo pelo qual um material é exposto à radiação, que pode ser de diferentes tipos, como laser, íons ou partículas subatômicas. Este processo é amplamente utilizado para modificar as propriedades dos materiais, como a introdução de defeitos estruturais ou a alteração das características elétricas e mecânicas. Por exemplo, a irradiação com laser tem sido utilizada para a engenharia de materiais de eletrodos, permitindo a fabricação precisa de heteroestruturas e a construção de arquiteturas de eletrodos integrados, essenciais para processos eletroquímicos em supercapacitores e baterias recarregáveis (Hu *et al.*, 2020).

Por outro lado, a irradiância é uma medida da potência da radiação recebida por unidade de área, geralmente expressa em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Este conceito é crucial na geração de energia solar, onde a previsão precisa da irradiância solar é vital para o planejamento e a operação eficiente de sistemas fotovoltaicos (Kumari e Toshniwal, 2021).

Em resumo, tanto a irradiação quanto a irradiância desempenham papéis cruciais na engenharia e na geração de energia. A irradiação permite a modificação controlada de materiais para melhorar seu desempenho em aplicações energéticas, enquanto a irradiância é uma medida essencial para a eficiência dos sistemas de energia solar. A pesquisa contínua nessas áreas promete avanços significativos na tecnologia de energia sustentável e na durabilidade dos materiais em ambientes extremos (Hu *et al.*, 2020; Kumari e Toshniwal, 2021).

### 3.5.3 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico que ocorre em materiais semicondutores, onde a absorção de luz resulta na geração de uma corrente elétrica. Este efeito é a base de funcionamento das células fotovoltaicas, também conhecidas como células solares, que convertem a energia luminosa em energia elétrica.

O processo começa com a absorção de fótons pela célula fotovoltaica. Quando um fóton com energia suficiente atinge o material semicondutor, ele excita um elétron, promovendo-o da banda de valência para a banda de condução, criando assim um par elétron-lacuna, conhecido como exciton. A eficiência deste processo depende da capacidade do material em absorver a luz e gerar excitons de forma eficaz (Sampaio e Gonzalez, 2022).

Após a geração do exciton, o próximo passo é a dissociação deste par em portadores de carga livre, ou seja, elétrons e lacunas. Este processo geralmente ocorre na interface entre dois materiais diferentes dentro da célula, como um doador e um aceitador de elétrons. A interface cria um campo elétrico interno que ajuda a separar os portadores de carga. Este campo elétrico é crucial para evitar a recombinação dos portadores de carga, que resultaria na perda de energia (Sampaio e Gonzalez, 2022).

Finalmente, os portadores de carga livres são coletados pelos eletrodos da célula fotovoltaica, gerando uma corrente elétrica. Os elétrons são coletados pelo eletrodo negativo (cátodo) e as lacunas pelo eletrodo positivo (ânodo). Este fluxo de elétrons através de um circuito externo é o que gera a eletricidade utilizável. A eficiência deste processo pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a qualidade dos materiais, a estrutura da célula e as condições de operação, como a intensidade da luz e a temperatura (Francisco *et al.*, 2023).

Em resumo, o efeito fotovoltaico envolve a absorção de luz, a geração de excitons, a dissociação dos excitons em portadores de carga livre e a coleta desses portadores para gerar uma corrente elétrica. Este processo é fundamental para a operação das células solares e a conversão de energia solar em eletricidade (Sampaio e Gonzalez, 2022; Francisco *et al.*, 2023).

#### **3.5.4 Energia solar no Rio Grande do Sul**

A geração de energia centralizada refere-se à produção de eletricidade em grandes usinas, como hidrelétricas, termelétricas ou nucleares, que distribuem energia através de uma rede de transmissão para os consumidores finais. Este modelo tradicional de geração de energia tem sido amplamente utilizado devido à sua capacidade de produzir grandes quantidades de eletricidade de forma eficiente e controlada. No entanto, este sistema também apresenta desvantagens, como as

perdas significativas de energia durante a transmissão e a vulnerabilidade a falhas em larga escala.

Em contraste, a geração de energia descentralizada envolve a produção de eletricidade próxima ao ponto de consumo, utilizando fontes renováveis como solar, eólica ou biomassa. Este modelo pode reduzir as perdas de transmissão e aumentar a resiliência do sistema energético, pois a produção é distribuída e menos suscetível a interrupções. Além disso, a descentralização permite uma maior independência energética para os consumidores e pode ser mais sustentável ambientalmente, uma vez que depende menos de combustíveis fósseis e grandes infraestruturas.

A implementação da geração de energia descentralizada, entretanto, pode apresentar desafios técnicos e econômicos. A integração de múltiplas fontes de energia renovável requer sistemas avançados de gerenciamento e armazenamento de energia para garantir a estabilidade e a continuidade do fornecimento. Além disso, os custos iniciais de instalação podem ser elevados, embora a longo prazo os benefícios econômicos e ambientais tendam a compensar esses investimentos iniciais (Fonseca *et al.*, 2021).

No Rio Grande do Sul, a geração de energia solar centralizada tem demonstrado um crescimento significativo. De acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL, até o dia 31 de julho de 2024, o estado conta com um total de 69 usinas solares centralizadas como mostrado na figura 6, somando uma potência instalada de 35.461,16 kW, distribuídas por todo o território gaúcho. A figura 6 mostra a localização das usinas centralizadas no Estado.

Figura 6 - Localização das usinas centralizadas



Fonte: Sistemas de Informações de Geração da Aneel, 31/07/2024

As usinas descentralizadas no estado do Rio Grande do Sul têm mostrado um crescimento expressivo, refletindo a tendência global de diversificação das fontes de energia e descentralização da produção energética. Segundo dados do painel de geração distribuída da ANEEL, até o dia 31 de julho de 2024, o estado possui um total de 315.073 unidades geradoras descentralizadas. Estas unidades, distribuídas por diversas regiões do estado, somam uma potência instalada de 2.884.103,88 kW.

### 3.6 Contexto da matriz energética brasileira e do RS

O Brasil possui uma matriz energética diversificada, com uma forte presença de fontes renováveis, como a energia hidrelétrica, eólica e solar. A produção de hidrogênio verde, que utiliza eletricidade gerada a partir de fontes renováveis para a eletrólise da água, representa uma oportunidade para o país aproveitar ainda mais seus recursos naturais. Estudos indicam que o Brasil tem um grande potencial para a produção de hidrogênio a partir de energia eólica, especialmente utilizando a

capacidade excedente de parques eólicos. A produção de hidrogênio pode ajudar a resolver o problema do excesso de energia, armazenando-a para uso posterior e garantindo maior segurança energética (Nadaleti, Santos e Lourenço, 2020).

Em comparação com outros países, o Brasil ainda está em fase inicial no desenvolvimento de uma estratégia clara para o hidrogênio. Enquanto países como Chile e Colômbia já possuem estratégias definidas e estão atraindo investimentos, o Brasil precisa acelerar seus esforços para não perder oportunidades de investimento. No entanto, o potencial do Brasil é reconhecido devido à sua capacidade de gerar energia renovável a baixo custo, o que pode tornar o hidrogênio verde competitivo no mercado global (Macedo, Peyerl e Filho, 2023).

A previsão para os próximos anos é que o hidrogênio verde se torne uma parte significativa da matriz energética brasileira. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 do Brasil já considera a expansão da energia eólica offshore e a produção de hidrogênio verde como prioridade. Estudos de caso indicam que regiões como Rio de Janeiro e Espírito Santo são locais favoráveis para a instalação de parques eólicos offshore, que podem ser integrados à produção de hidrogênio verde (Paula *et al.*, 2023).

Apesar do grande potencial, a produção de hidrogênio verde no Brasil enfrenta desafios significativos, como os altos custos da cadeia de produção e a falta de uma estratégia nacional clara. No entanto, as oportunidades são vastas, especialmente se o país conseguir atrair investimentos e desenvolver tecnologias para reduzir os custos de produção. A integração de energias renováveis, como a eólica, na produção de hidrogênio pode diversificar ainda mais a matriz energética e contribuir para a economia circular (Nadaleti, Santos e Lourenço, 2020).

### **3.7 Potencial de produção de energia elétrica no estado do RS**

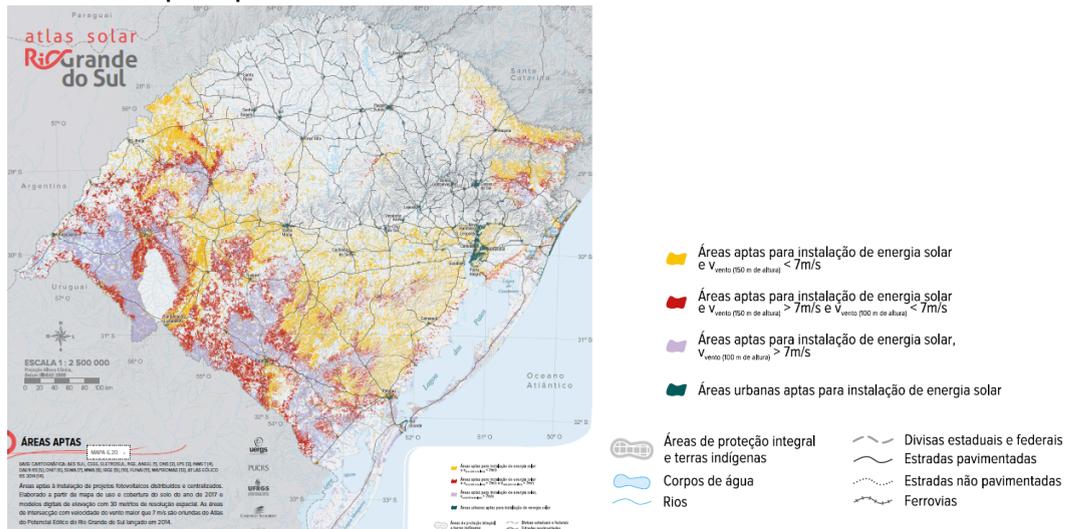
O Atlas Solar do Rio Grande do Sul apresenta uma análise detalhada do potencial de produção de energia elétrica a partir de fontes fotovoltaicas no estado. Com base nos dados coletados e ajustados pelo modelo meteorológico de mesoescala WRF, o estado possui um significativo potencial energético solar.

O cálculo do potencial fotovoltaico do Rio Grande do Sul levou em consideração a taxa de ocupação das áreas aptas para a instalação de painéis solares. O estudo identificou que o potencial teórico de produção de energia solar no

estado é da ordem de 1700 TWh/ano, valor que representa aproximadamente 2,7 vezes a produção de energia elétrica de todo o Brasil em 2017 (SECRETARIA DE MINAS E ENERGIA DO RIO GRANDE DO SUL, 2018).

A figura 7 mostra as áreas aptas e não aptas para implantação de sistemas fotovoltaicos.

Figura 7 - Áreas aptas para sistemas fotovoltaicos



Fonte: Adaptado, Atlas Solar do Rio Grande do Sul, 2018

## 4 METODOLOGIA

### 4.2 Estudo de caso

Objetivo:

- Calcular o potencial de produção de hidrogênio verde utilizando diferentes tipos de eletrolisadores e suas eficiências.

Procedimentos:

- Selecionar três tipos de eletrolisadores para o estudo: citados no item 3.4.
- Coletar dados sobre a eficiência de conversão de cada tipo de eletrolisador.
- Utilizar balanço energético para converter potencial de produção de energia elétrica em H<sub>2</sub>.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Potencial total de produção para cada tipo de eletrolisador

#### 5.1.1 No estado do Rio Grande do Sul

Segundo Moura, Silveira e Lamas, o valor calorífico inferior (LHV) do hidrogênio (H<sub>2</sub>) é de 120.000 kJ/kg, e o valor calorífico de 1 kWh é de 3600 kJ. Com base nesses dados, é possível formular a equação para o cálculo da quantidade de H<sub>2</sub> produzido a partir da energia elétrica utilizada no processo.

$$m_{H_2} = \frac{E \cdot \eta_{Ele}}{PCI_{H_2} / PC_{kWh}} \quad (1)$$

Onde:

- $m_{H_2}$  é a massa de hidrogênio.
- $PCI_{H_2}$  é o valor calorífico inferior do H<sub>2</sub>.
- $PC_{kWh}$  é o valor calorífico de 1 kWh.
- $\eta_{Ele}$  é a eficiência do eletrolisador
- $E$  é a energia elétrica total em kWh.

Para o eletrolisador tipo PEMEL, a eficiência é de 82,9% (0,829). O potencial de geração de energia elétrica no Rio Grande do Sul é de 1,70E+12 kWh. Aplicando a equação 1, temos:

$$m_{H_2} = \frac{1,7 \times 10^{12} \text{ kWh} \cdot 0,829}{(120.000 \text{ kJ/kg}) / (3600 \text{ kJ/kWh})} = 4,23 \times 10^{10} \text{ kg}$$

Portanto, o potencial de produção de hidrogênio é de 42,3 milhões de toneladas (4,23E+07 toneladas).

Repetindo o mesmo processo e alterando apenas a eficiência do eletrolisador, temos os seguintes resultados para os diferentes tipos de eletrolisadores:

- Eletrolisador tipo ALEL: com eficiência de 65% (0,65), a produção total é de:

$$m_{H_2} = \frac{1,7 \times 10^{12} \text{ kWh} \cdot 0,65}{(120.000 \text{ kJ/kg}) / (3600 \text{ kJ/kWh})} = 3,32 \times 10^{10} \text{ kg}$$

Portanto, o potencial de produção aproximado de hidrogênio é de 33,2 milhões de toneladas (3,32E+07 toneladas).

- Eletrolisador tipo AMEL: com eficiência de 69,64% (0,6964), a produção total é de:

$$m_{H_2} = \frac{1,7 \times 10^{12} \text{ kWh} \cdot 0,6964}{(120.000 \text{ kJ/kg}) / (3600 \text{ kJ/kWh})} = 3,55 \times 10^{10} \text{ kg}$$

Portanto, o potencial de produção aproximado de hidrogênio é de 35,5 milhões de toneladas (3,55E+07 toneladas).

O valor de 1700 TWh/ano utilizado para calcular o potencial de produção de hidrogênio verde no Rio Grande do Sul foi derivado do Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Este valor representa o potencial teórico de geração de energia elétrica a partir de fontes fotovoltaicas no estado, abrangendo tanto usinas distribuídas quanto usinas centralizadas. O cálculo foi realizado considerando a taxa de ocupação das áreas aptas para a instalação de painéis solares, utilizando dados ajustados pelo modelo meteorológico de mesoescala Weather Research and Forecasting Model (WRF) e validados com dados solarimétricos de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

### 5.1.2 Potencial de produção por região do Estado

A referência utilizada para o potencial de produção de energia solar por região foram os dados da tabela 7.2 do Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Esta tabela fornece informações detalhadas sobre a produtividade fotovoltaica média anual para áreas aptas urbanas e para 1% das áreas aptas não urbanas. Os autores consideraram apenas 1% das áreas aptas não urbanas devido ao uso intensivo destas áreas para agricultura, tornando inviável a destinação exclusiva para geração de energia. A partir dessas informações, foram determinados os valores de

produtividade média anual por mesorregião, conforme os dados apresentados na tabela 7.2, página 99 do atlas, resumidos na Tabela 2.

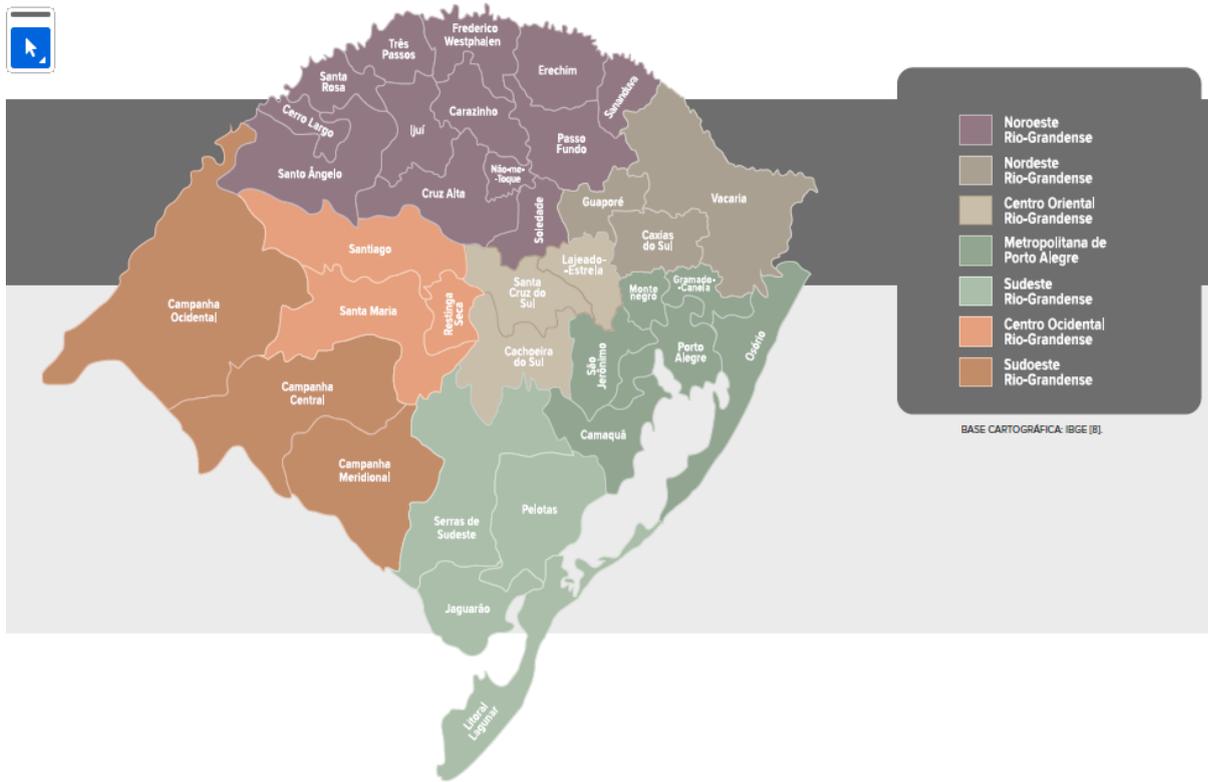
Tabela 2 - Produtividade Fotovoltaica Média

Mesorregião	Área Apta Urbana [GWh/ano]	Área Apta não Urbana [GWh/ano]
Centro Ocidental Rio-Grandense	265,10	1.828,20
Centro Oriental Rio-Grandense	412,40	407,40
Metropolitano de Porto Alegre	2.242,00	1.116,90
Nordeste Rio-Grandense	641,80	1.107,10
Noroeste Rio-Grandense	1.187,50	898,00
Sudeste Rio-Grandense	400,60	3.654,10
Sudoeste Rio-Grandense	347,90	8.000,60
<b>Total</b>	<b>5.497,30</b>	<b>17.012,30</b>

Fonte: Atlas Solar do Rio Grande do Sul, 2018. Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, Empresa Camargo-Schubert, INMET.

As mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul são divididas em sete, a saber: Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Metropolitano de Porto Alegre, Nordeste Rio-Grandense, Noroeste Rio-Grandense, Sudeste Rio-Grandense e Sudoeste Rio-Grandense. Estas mesorregiões estão distribuídas geograficamente conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Mesorregiões



Fonte: Adaptado Atlas Solar do Rio Grande do Sul, 2018. Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, Empresa Camargo-Schubert, INMET.

Com base nos dados de produtividade fotovoltaica média anual apresentados na Tabela 2 e aplicando diferentes eficiências de eletrolisadores, é possível calcular o potencial de produção de hidrogênio (H<sub>2</sub>) por região do estado do Rio Grande do Sul utilizando a equação 1. Utilizando a equação 1, foram calculados os potenciais de produção de hidrogênio para cada região, considerando as diferentes eficiências dos eletrolisadores tipo PEMEL, ALEL e AEMEL. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Produção de H2 por região do estado

Mesorregião	Área Apta Urbana			Área Apta não Urbana		
	Produtivida de de H2 [toneladas] (PEMEL)	Produtivida de de H2 [toneladas] (ALEL)	Produtivida de de H2 [toneladas] (AEMEL)	Produtivida de de H2 [toneladas] (PEMEL)	Produtivida de de H2 [toneladas] (ALEL)	Produtivida de de H2 [toneladas] (AEMEL)
Centro Occidental Rio- Grandense	6.593,04	5.169,45	5.538,47	45.467,33	35.649,90	38.194,75
Centro Oriental Rio- Grandense	10.256,39	8.041,80	8.615,86	10.132,04	7.944,30	8.511,40
Metropolita no de Porto Alegre	55.758,54	43.719,00	46.839,86	27.777,30	21.779,55	23.334,27
Nordeste Rio- Grandense	15.961,57	12.515,10	13.408,49	27.533,58	21.588,45	23.129,53
Noroeste Rio- Grandense	29.533,13	23.156,25	24.809,25	22.333,26	17.511,00	18.761,02
Sudeste Rio- Grandense	9.962,92	7.811,70	8.369,34	90.877,47	71.254,95	76.341,46
Sudoeste Rio- Grandense	8.652,27	6.784,05	7.268,33	198.974,92	156.011,70	167.148,54
<b>Total</b>	<b>136.717,85</b>	<b>107.197,35</b>	<b>114.849,59</b>	<b>423.095,90</b>	<b>331.739,85</b>	<b>355.420,97</b>

Fonte: Autor, 2024

Os dados apresentados na Tabela 3 fornecem uma visão do potencial de produção de H2V por diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul, utilizando energia solar fotovoltaica como fonte primária. A análise desses dados revela variações no potencial de produção de hidrogênio entre as diferentes mesorregiões, refletindo as diferenças na produtividade fotovoltaica média anual das áreas aptas urbanas e não urbanas.

Para as áreas aptas urbanas, a região Metropolitana de Porto Alegre destaca-se como a área com o maior potencial de produção de hidrogênio verde, com uma produtividade de H2 de 55.758,54 toneladas utilizando eletrolisador tipo PEMEL. Este elevado potencial pode ser atribuído à concentração de grandes centros urbanos na região.

Já para as áreas aptas não urbanas, a região Sudoeste Rio-Grandense apresenta o maior potencial de produção de hidrogênio verde, com uma

produtividade de H<sub>2</sub> de 198.974,92 toneladas também sendo utilizado eletrolisador tipo PEMEL. A vasta disponibilidade de áreas não urbanas aptas para a instalação de painéis solares, juntamente com o alto potencial solar, contribuem significativamente para o elevado potencial desta região.

A análise dos dados também revela que as áreas aptas não urbanas possuem, em geral, um potencial de produção de hidrogênio significativamente maior em comparação com as áreas urbanas. Isso se deve à maior disponibilidade de espaço e à menor competição por uso do solo, permitindo a instalação de grandes quantidades de painéis solares.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados apresentados neste estudo, a energia solar fotovoltaica demonstrou ser uma fonte de energia limpa e renovável altamente eficaz para a produção de H<sub>2</sub>V no estado do Rio Grande do Sul. A capacidade da energia solar para gerar H<sub>2</sub>V alinha-se perfeitamente com as metas globais de redução de emissões de CO<sub>2</sub> e mitigação das mudanças climáticas. O uso da energia solar fotovoltaica não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também promove a sustentabilidade energética e a autonomia regional.

Ao comparar diferentes modelos de eletrolisadores, constatou-se que o eletrolisador tipo PEMEL apresenta a maior eficiência na produção de hidrogênio, seguido pelos eletrolisadores tipo AEMEL e ALEL. A maior eficiência do PEMEL torna-o a opção preferencial, especialmente em regiões com alta disponibilidade de energia solar, como é o caso do Rio Grande do Sul. A análise detalhada dos modelos de eletrolisadores se torna algo básico para orientar futuras decisões sobre investimentos e implementação de tecnologias de eletrólise mais eficientes e econômicas.

O potencial de produção de H<sub>2</sub>V a partir da energia solar fotovoltaica foi estimado para diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul, considerando áreas aptas urbanas e não urbanas. A análise revelou que a região Metropolitana de Porto Alegre possui o maior potencial nas áreas urbanas, devido à concentração de grandes centros urbanos e à infraestrutura existente. Especificamente, a produção de hidrogênio nesta região é estimada em 55.758,54 toneladas utilizando eletrolisadores tipo PEMEL.

Nas áreas aptas não urbanas, a região Sudoeste Rio-Grandense destacou-se como a área com maior potencial de produção, com uma estimativa de 198.974,92 toneladas de hidrogênio por ano com o uso de eletrolisadores tipo PEMEL. Este elevado potencial é atribuído à uma maior área disponível para a instalação de painéis solares e potencial de produção de energia solar, tornando-a uma ótima escolha para a produção de H<sub>2</sub>V.

Outras regiões também apresentaram potenciais significativos. A região Nordeste Rio-Grandense, por exemplo, apresentou um potencial considerável tanto em áreas urbanas quanto não urbanas, com produtividades de 15.961,57 toneladas e 27.533,58 toneladas, respectivamente. Já a região Sudeste Rio-Grandense

mostrou um grande potencial em áreas não urbanas, com uma produção estimada em 90.877,47 toneladas de hidrogênio por ano.

Em suma, a energia solar fotovoltaica no Rio Grande do Sul possui um potencial teórico de geração de aproximadamente 1700 TWh/ano, considerando 100% das áreas aptas do estudo presente no Atlas Solar do Rio Grande do Sul o que poderia ser convertido em milhões de toneladas de hidrogênio verde, dependendo da eficiência dos eletrolisadores utilizados. Este estudo conclui que a produção de hidrogênio verde no estado é tecnicamente viável e ambientalmente benéfica. A implementação de políticas públicas e investimentos em infraestrutura são essenciais para maximizar este potencial. Incentivos para a instalação de painéis solares, desenvolvimento de tecnologias de eletrólise e criação de um mercado consolidado para o hidrogênio verde são fundamentais para aproveitar plenamente o potencial identificado. Parcerias público-privadas e a atração de investimentos internacionais também são estratégias importantes para impulsionar a produção de H<sub>2</sub>V no Rio Grande do Sul.

Assim, o estado do Rio Grande do Sul está bem posicionado para se tornar um líder na transição para uma economia de baixo carbono, contribuindo significativamente para a sustentabilidade energética e a redução das emissões de carbono.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOUALI, F.; BECHERIF, M.; RAMADAN, H.; EMZIANE, M.; KHELLAF, A.; MOHAMMEDI, K. Analytical modelling and experimental validation of proton exchange membrane electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, p. 1366-1374, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.03.101>.

ATILHAN, S.; PARK, S.; EL-HALWAGI, M.; ATILHAN, M.; MOORE, M.; NIELSEN, R. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 31, p. 100668, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2020.100668>.

AZAM, A.; RAGUNATHAN, T.; ZULKEFLI, N.; MASDAR, M.; MAJLAN, E.; YUNUS, R.; SHAMSUL, N.; HUSAINI, T.; SHAFFEE, S. Investigation of Performance of Anion Exchange Membrane (AEM) Electrolysis with Different Operating Conditions. *Polymers*, v. 15, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15051301>.

CHANG, Z.; WANG, J.; ZHIBO, R.; YU, Z.; WANG, P. Wind-powered 250 kW electrolyzer for dynamic hydrogen production: A pilot study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.08.029>.

CHEN, Z.; GUO, L.; PAN, L.; YAN, T.; HE, Z.; LI, Y.; SHI, C.; HUANG, Z.; ZHANG, X.; ZOU, J. Advances in Oxygen Evolution Electrocatalysts for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers. *Advanced Energy Materials*, v. 12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.202103670>.

DONGLIANG, W.; WENLIANG, M.; HUAIRONG, Z.; GUIXIAN, L.; YONG, Y.; HONGWEI, L. Green hydrogen coupling with CO<sub>2</sub> utilization of coal-to-methanol for high methanol productivity and low CO<sub>2</sub> emission. *Energy*, v. 231, p. 120970, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120970>.

FAKHER, S.; TAMER, S.; ELTOHAMY, M.; ABDELATY, B.; ALI, M. Blue Hydrogen Production from Oil Using Partial Oxidation and Aquathermolysis. *All Days*. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.56952/arma-2023-0200>.

FONSECA, J.; COMMENGE, J.; CAMARGO, M.; FALK, L.; GIL, I. Multi-criteria optimization for the design and operation of distributed energy systems considering sustainability dimensions. *Energy*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118989>.

FRANCISCO, S.; SILVA, M.; CAVADAS, B.; SEIXAS, T. Exploring photovoltaic effect through simple experiments. *Physics Education*, 58, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/acf5be>.

HORRI, B.; CHOOLAEI, M.; CHAUDHRY, A.; QAALIB, H. A highly efficient hydrogen generation electrolysis system using alkaline zinc hydroxide solution. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.03.048>.

HOSSEINI, S.; WAHID, M. Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*, v. 44, p. 4110-4131, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.4930>.

HOWARTH, R.; JACOBSON, M. How green is blue hydrogen?. *Energy Science & Engineering*, 9, 1676 - 1687, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ese3.956>.

HU, H.; LI, Q.; LI, L.; TENG, X.; FENG, Z.; ZHANG, Y.; WU, M.; QIU, J. Laser Irradiation of Electrode Materials for Energy Storage and Conversion. *Matter*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.05.001>.

JAIN, V.; KANDASUBRAMANIAN, B. Functionalized graphene materials for hydrogen storage. *Journal of Materials Science*, p. 1-39, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04150-y>.

JANG, D.; CHOI, W.; CHO, H.; CHO, W.; KIM, C.; KANG, S. Numerical modeling and analysis of the temperature effect on the performance of an alkaline water electrolysis system. *Journal of Power Sources*, v. 506, p. 230106, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.230106>.

KASAEIAN, A.; BELLOS, E.; SHAMAEIZADEH, A.; TZIVANIDIS, C. Solar-driven polygeneration systems: Recent progress and outlook. *Applied Energy*, 264, 114764, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114764>.

KAYA, M.; DEMIR, N.; REES, N.; EL-KHAROUF, A. Magnetically modified electrocatalysts for oxygen evolution reaction in proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.03.203>.

KOVAČ, A.; PARANOS, M.; MARCIUŠ, D. Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 10016-10035, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.11.256>.

KUMAR, S. Shiva; LIM, Hankwon. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. *Energy Reports*, Volume 8, 2022, Pages 13793-13813. ISSN 2352-4847. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>.

KUMARI, P.; TOSHNIWAL, D. Deep learning models for solar irradiance forecasting: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128566, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128566>.

KUSOGLU, A. Chalkboard 1 - The Many Colors of Hydrogen. *The Electrochemical Society Interface*. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/2.f12214if>.

LEI, Q.; WANG, B.; WANG, P.; LIU, S. Hydrogen generation with acid/alkaline amphoteric water electrolysis. *Journal of Energy Chemistry*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2018.12.022>.

LINDQUIST, G.; OENER, S.; KRIVINA, R.; MOTZ, A.; KEANE, A.; CAPUANO, C.; AYERS, K.; BOETTCHER, S. Performance and Durability of Pure-Water-Fed Anion Exchange Membrane Electrolyzers Using Baseline Materials and Operation. *ACS applied materials & interfaces*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06053>.

LIU, B.; WANG, G.; FENG, X.; DAI, L.; WEN, Z.; CI, S. Energy-saving H<sub>2</sub> production from a hybrid acid/alkali electrolyzer assisted by anodic glycerol oxidation. *Nanoscale*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d2nr02689a>.

LIU, D.; LEI, C.; WU, K.; FU, Q. A Multidirectionally Thermoconductive Phase Change Material Enables High and Durable Electricity via Real-Environment Solar-Thermal-Electric Conversion. *ACS Nano*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c06680>.

MACEDO, S.; PEYERL, D.; FILHO, D. Brazilian hydrogen economy development. *Revista Brasileira de Energia*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v29i2.800>.

Martín, M.; Nava, B.; Parra, R.; Lorenzo, F. THE ROLE OF GREEN HYDROGEN IN THE ENERGY TRANSITION OF THE INDUSTRY. *DYNA*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.6036/9890>.

Moura, C.; Silveira, J.; Lamas, W. Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 31585-31598, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.198>.

MOURA, Lawrence César Medeiros Araújo de. Modelo funcional de um sistema para produção de hidrogênio verde. Orientador: Dr. Mário Orestes Aguirre González. 2024. 153f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

Mohammadnia, A.; Rezania, A.; Ziapour, B.; Sedaghati, F.; Rosendahl, L. Hybrid energy harvesting system to maximize power generation from solar energy. *Energy Conversion and Management*, 205, 112352, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112352>.

Muthusamy, P.; Arivudainambi, J. Evaluation of Solar Photovoltaic Cells using the DEMATEL Method. *Renewable and Nonrenewable Energy*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.46632/rne/1/2/5>.

NADALETI, W.; SANTOS, G.; LOURENÇO, V. Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H<sub>2</sub> and electricity in Brazil and in the Rio Grande do Sul state: energy planning and avoided emissions within a circular economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.226>.

PAULA, K.; PUMALLOCLA, H.; POURAKBARI-KASMAEI, M.; MELO, J.; FALCÃO, D. Mapping the Optimal Sites for Offshore Wind Power Plants and Green Hydrogen Production: South and Southeast Brazilian Case Study. 2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISIE51358.2023.10227990>.

PANIĆ, I.; CUCULIĆ, A.; ĆELIĆ, J. Color-Coded Hydrogen: Production and Storage in Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse10121995>.

Qazi, U. Future of Hydrogen as an Alternative Fuel for Next-Generation Industrial Applications; Challenges and Expected Opportunities. *Energies*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15134741>.

Radiação solar: definição, importância, tipos e efeitos no planeta. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/radiacao-solar/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

RAZI, F.; DINCER, I. A critical evaluation of potential routes of solar hydrogen production for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, p. 121582, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121582>.

RECHBERGER, K.; SPANLANG, A.; CONDE, A.; WOLFMEIR, H.; HARRIS, C. Green Hydrogen-Based Direct Reduction for Low-Carbon Steelmaking. *Steel Research International*, v. 91, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/srin.202000110>.

SAMPSON, P.; GONZALEZ, M. A review on organic photovoltaic cell. *International Journal of Energy Research*, 46, 17813 - 17828, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.8456>.

SARKER, A.; AZAD, A.; RASUL, M.; DOPPALAPUDI, A. Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. *Energies*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16031556>.

SCHALENBACH, M.; TJARKS, G.; CARMO, M.; LUEKE, W.; MUELLER, M.; STOLTEN, D. Acidic or Alkaline? Towards a New Perspective on the Efficiency of Water Electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 163, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/2.0271611JES>.

SINGH, V.; YADAV, S.; SEN, R.; DAS, D. Concomitant hydrogen and butanol production via co-digestion of organic wastewater and nitrogenous residues. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, p. 24477-24490, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.282>.

SISTEMA de Informações de Geração da ANEEL. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzd kNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5Yz AxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 31 jul. 2024.

SOOD, S.; PRAKASH, O.; BOUKERDJA, M.; DIEULOT, J.; OULD-BOUAMAMA, B.; BRESSEL, M.; GEHIN, A. Generic Dynamical Model of PEM Electrolyser under Intermittent Sources. *Energies*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13246556>.

SOUZA, R. S.; SILVA, A. P. B.; ARAUJO, T. S. James Prescott Joule e o equivalente mecânico do calor: reproduzindo as dificuldades do laboratório. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 3, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000300009>.

STIBER, S.; BALZER, H.; WIERHAKE, A.; WIRKERT, F.; ROTH, J.; ROST, U.; BRODMANN, M.; LEE, J.; BAZYLAK, A.; WAIBLINGER, W.; GAGO, A.; FRIEDRICH, K. Porous Transport Layers for Proton Exchange Membrane Electrolysis Under Extreme Conditions of Current Density, Temperature, and Pressure. *Advanced Energy Materials*, v. 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.202100630>.

SULAIMAN, R.; WONG, W.; LOH, K. Recent developments on transition metal-based electrocatalysts for application in anion exchange membrane water electrolysis. *International Journal of Energy Research*, v. 46, p. 2241-2276, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.7380>.

TETTEH, D.; SALEHI, S. The Blue Hydrogen Economy: A Promising Option for the Near-To-Mid-Term Energy Transition. *Journal of Energy Resources Technology*. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4055205>.

VICTORIA, M.; HAEGEL, N.; PETERS, I.; SINTON, R.; JÄGER-WALDAU, A.; CAÑIZO, C.; BREYER, C.; STOCKS, M.; BLAKERS, A.; KAIZUKA, I.; KOMOTO, K.; SMETS, A. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2021.03.005>.

YU, M.; WANG, K.; VREDENBURG, H. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.04.016>.

ZAKARIA, Z.; KAMARUDIN, S. A review of alkaline solid polymer membrane in the application of AEM electrolyzer: Materials and characterization. *International Journal of Energy Research*, v. 45, p. 18337-18354, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.6983>.

ZHANG, X.; ZHANG, W.; YANG, W.; LIU, W.; MIN, F.; MAO, S.; XIE, J. Catalyst-coated proton exchange membrane for hydrogen production with high pressure water electrolysis. *Applied Physics Letters*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0060150>.

## ANEXOS



## POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO RIO GRANDE DO SUL

Miguel Rigon Damitz, discente de graduação, Universidade Federal do Pampa,  
Campus Bagé

Sabrina N. da Silva, docente (orientadora), Universidade Federal do Pampa,  
Campus Bagé

E-mail: [migueldamitz.aluno@unipampa.edu.br](mailto:migueldamitz.aluno@unipampa.edu.br)

O Rio Grande do Sul (RS) é um dos estados mais promissores do Brasil para a produção de hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V) utilizando energia solar fotovoltaica como fonte primária. A necessidade de alternativas sustentáveis para mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> justifica a escolha do tema. Este estudo inclui a análise detalhada do potencial de produção de H<sub>2</sub>V no RS, baseada nos dados do Atlas Solar do Rio Grande do Sul, que fornecem a produtividade fotovoltaica média anual das áreas aptas urbanas e não urbanas. Considerando diferentes tipos de eletrolisadores, como PEMEL (Proton Exchange Membrane Electrolysis), ALEL (Alkaline Electrolysis) e AEMEL (Anion Exchange Membrane Electrolysis), foi possível avaliar a eficiência da conversão de energia solar em hidrogênio. Comparando a produção de H<sub>2</sub>V pela área total apta para geração com a produção baseada nas áreas aptas urbanas e 1% das áreas aptas não urbanas, o potencial teórico de geração de energia solar no RS é de aproximadamente 1700 TWh/ano. Utilizando a eficiência do eletrolisador tipo PEMEL, a produção de H<sub>2</sub>V poderia atingir até 42,3 milhões de toneladas por ano. Considerando áreas aptas urbanas e 1% das áreas aptas não urbanas, a região Metropolitana de Porto Alegre destaca-se nas áreas aptas urbanas devido à presença de grandes centros urbanos, enquanto a região Sudoeste Rio-Grandense apresenta o maior potencial nas áreas aptas não urbanas, com a produção de H<sub>2</sub>V nessas áreas específicas podendo atingir aproximadamente 8.652,27 toneladas por ano nas áreas urbanas e 198.974,92 toneladas por ano nas áreas não urbanas (1%). A produção de H<sub>2</sub>V utilizando energia solar fotovoltaica é tecnicamente viável e ambientalmente benéfica. A implementação de políticas públicas e investimentos em infraestrutura são essenciais para maximizar este potencial. Incentivos para a instalação de painéis solares, desenvolvimento de tecnologias de eletrólise e a criação de um

mercado consolidado para o hidrogênio verde são indispensáveis para aproveitar plenamente o potencial identificado. Além de promover a sustentabilidade ambiental, a adoção de tecnologias de energia renovável pode promover a autonomia energética regional e impulsionar a inovação tecnológica. A utilização de hidrogênio verde pode ser aplicada em diversos setores, incluindo transporte, indústria e geração de energia, contribuindo para a descarbonização da matriz energética. Em conclusão, o estudo demonstra que o Rio Grande do Sul está bem posicionado para se tornar um líder na produção de hidrogênio verde no Brasil. A combinação de um alto potencial de geração de energia solar com tecnologias avançadas de eletrólise oferece uma solução eficaz para a transição para uma economia de baixo carbono, destacando a importância de investimentos estratégicos em energias renováveis.

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde, Energia solar fotovoltaica, Sustentabilidade energética, Eletrólise, Mudanças climáticas, Rio Grande do Sul.