



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DIEGO ROCHA DE ABREU

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM USO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA: UMA PERSPECTIVA PARA INTERIORIZAÇÃO DA
ECONOMIA DO H₂V NO CEARÁ. ESTUDO DE CASO EM USINA PILOTO NO
SERTÃO CENTRAL CEARENSE**

FORTALEZA/CE

2024

DIEGO ROCHA DE ABREU

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM USO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA: UMA PERSPECTIVA PARA INTERIORIZAÇÃO DA
ECONOMIA DO H₂V NO CEARÁ. ESTUDO DE CASO EM USINA PILOTO NO
SERTÃO CENTRAL CEARENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A145p Abreu, Diego Rocha de.
Produção de hidrogênio verde com uso de energia solar fotovoltaica: uma perspectiva para interiorização da economia do H2V no Ceará. Estudo de caso em usina piloto no sertão central cearense / Diego Rocha de Abreu. – 2024.
59 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

1. Hidrogênio Verde. 2. Economia do Hidrogênio. 3. Energia Solar. 4. Sertão Cearense. I. Título.

CDD 620.1

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM USO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA: UMA PERSPECTIVA PARA INTERIORIZAÇÃO DA ECONOMIA DO
H2V NO CEARÁ. ESTUDO DE CASO EM USINA PILOTO NO SERTÃO CENTRAL
CEARENSE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovado em 29/07/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Adryane Gorayeb Nogueira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Francisco Nivaldo Aguiar, pela orientação e confiança.

Ao Valdi, secretário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela atenção e ajuda.

Aos colegas do Laboratório em Filmes Finos em Energias Renováveis (LAFER) pela atenção e acolhimento durante os momentos finais da dissertação.

Aos amigo e colegas de trabalho Lindenberg Ferreira do Santos e Marcus Vinícius Silveira Macedo, ex-alunos do programa, que me incentivaram a entrar e a não desistir dessa jornada.

E, sobretudo, agradeço à minha família pelo apoio e incentivo.

RESUMO

O estado do Ceará possui grande potencial de produção de energias renováveis devido sua condição climática e posição geográfica. Devido a esse potencial, o estado tem recebido grandes investimentos para o desenvolvimento de uma economia de Hidrogênio Verde (H2V). Contudo, a princípio, ocorre uma concentração de investimentos na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), o que gera uma desigualdade de desenvolvimento das demais regiões do estado, que também possuem potencial de produção de H2V por meio de energias renováveis, como a solar fotovoltaica, por exemplo. Este estudo analisou um sistema fotovoltaico instalado em um município no sertão central do Ceará em 2020, que utilizou placas *Passivated Emitter and Rear Cell* (PERC) de silício monocristalino, projetado para produzir 7.562 kWh/mês e 90.744 kWh/ano. Foi realizado um levantamento documental sobre as ações do Governo do Ceará relacionadas à economia de hidrogênio verde (H2V), analisando sites governamentais e documentos legislativos. A produção anual de energia da usina foi avaliada, coletando os resultados de energia gerada nos anos de 2022 e 2023. Três cenários foram criados para analisar a produção de energia, destacando-se o cenário otimista com maior geração de 8121,50 kWh/mês. Considerando o uso de um eletrolisador comercial, estimou-se uma produção de 31.673,85-35.734,60m³/mês de H₂, para o cenário de melhor geração de energia. Ao coletar as informações sobre os investimentos na economia do H2V no Ceará, estimou-se um investimento superior a R\$ 186 bilhões e uma expectativa de criação de 11 mil postos de empregos.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Economia do Hidrogênio. Energia Solar. Sertão Cearense.

ABSTRACT

The state of Ceará has significant potential for renewable energy production due to its climatic conditions and geographic location. This potential has attracted substantial investments for the development of a Green Hydrogen (H₂V) economy. However, initially, there is a concentration of investments in the Fortaleza Metropolitan Region (RMF), leading to unequal development in other regions of the state, which also have potential for H₂V production through renewable energies, such as photovoltaic solar power. This study analyzed a photovoltaic system installed in a municipality in the central hinterland of Ceará in 2020, which used Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) monocrystalline silicon panels, designed to produce 7,562 kWh/month and 90,744 kWh/year. A documentary survey was conducted on the actions of the Government of Ceará related to the green hydrogen (H₂V) economy, analyzing government websites and legislative documents. The annual energy production of the plant was evaluated, collecting the energy generated in 2022 and 2023. Three scenarios were created to analyze energy production, with the optimistic scenario showing the highest generation of 8,121.50 kWh/month. Considering the use of a commercial electrolyzer, an estimated production of 31,673.85-35,734.60 Nm³/month of H₂ was projected for the scenario with the best energy generation. By gathering information on investments in the H₂V economy in Ceará, an investment of over R\$ 186 billion and the creation of 11,000 jobs were estimated.

Keywords: Green Hydrogen. Hydrogen economy. Solar Energy. Backlands of Ceará.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Isótopos de átomos de hidrogênio.....	17
Figura 2: Esquema de funcionamento do Sistema Fotovoltaico (SFV).	32
Figura 3:Exemplo de gráfico de geração de energia.	36
Figura 4: Rota prevista para Transnordestina.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relatório de geração de energia – Ano 2022.....	37
Tabela 2: Relatório de geração de energia – Ano 2023.....	38
Tabela 3: Cenários de produção de energia.....	39
Tabela 4: Razão geração por área de placas fotovoltaicas.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características físico-químicas do hidrogênio.....	18
Quadro 2: Diferentes formas de produção de hidrogênio.....	21
Quadro 3: Vantagens e desvantagens dos processos de produção de H ₂	22
Quadro 4: Classificação do hidrogênio por cores.....	28

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Crescimento da capacidade instalada global da energia solar fotovoltaica.	33
Gráfico 2: Produção mensal de energia – Ano 2022.	37
Gráfico 3: Produção mensal de energia – Ano 2023.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEM	<i>Anion Exchange Membrane</i>
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CEGÁS	Companhia de Gás do Ceará
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
H2V	Hidrogênio Verde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFCE	Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
PERC	<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S/A
PIB	Produto Interno Bruto
SFV	Sistema Fotovoltaico
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	Hidrogênio	17
3.1.1	<i>Produção de H₂</i>	19
3.1.2	<i>Classificação do H₂</i>	22
3.1.3	<i>Economia do H₂</i>	29
3.1.4	<i>Economia do H₂ no Ceará</i>	29
3.2	Energia solar.....	31
4	METODOLOGIA	35
4.1	Características da usina	35
4.2	Monitoramento e coleta de dados	35
4.3	Informações sobre a economia do H ₂ V no Ceará	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
6	CONCLUSÃO	43
7	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	44
	REFERÊNCIAS	45
	ANEXO A	51
	ANEXO B	52
	APÊNDICE A.....	56

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), o estado do Ceará, localizado no nordeste brasileiro, é o quarto maior de sua região, em território, com uma área de 148.894,447 km². O clima cearense, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, se caracteriza por dois climas, o tropical úmido e o semiárido, sendo o semiárido o clima predominante no estado (NASCIMENTO *et al*, 2022). O termo semiárido envolve uma referência climática, que marca uma característica do ecossistema desta região, que é o índice de pluviosidade baixa, isto é, menor de 800mm ao ano (TEIXEIRA, 2016).

Grande parte do estado do Ceará faz parte da depressão sertaneja. Conforme Gomes e Andrade (2019) a depressão sertaneja encontra-se entre os planaltos sedimentares ou entre os maciços residuais cristalinos. O período seco tem duração de 6 a 8 meses, tendo as médias térmicas máximas registradas durante os dias situando-se entre 32 e 33°C. Ainda segundo os autores, possui baixa umidade (inferior a 70%) e seu regime pluviométrico é de 400 a 800 milímetros por ano.

Apesar de grande parte do estado cearense possuir clima desfavorável para atividades do primeiro setor da economia, o estado apresenta excelentes condições para produção de energias renováveis. Petry, Ramos e Costa (2020) destacam que o governo do estado do Ceará tem favorecido e atraído investidores no setor das energias renováveis. Assim o Ceará tem conseguido firmar boas oportunidades para desenvolver uma economia de Hidrogênio Verde (H2V) no estado. Almeida e Sabiá (2024) relatam que no Ceará vem sendo realizados muitos investimentos nessa nova energia, onde tem boa implantação, fazendo uso de fontes como a eólica e solar, a qual são abundantes neste território. Os autores ainda destacam que as duas fontes de energia atuam de uma forma complementar, já que a solar tem maior produção durante o dia e a eólica durante a noite. Isso garante uma constância na produção e fornecimento de energia elétrica para a fabricação do hidrogênio verde, reduzindo custos. Outro aspecto positivo é a proximidade com a Europa, que deverá ser o principal destino do hidrogênio verde produzido no Ceará.

Lançado em fevereiro de 2021 pelo Governo do Ceará, Complexo do Pecém, Federação das Indústrias do Ceará (UFC) e Universidade Federal do Ceará (Fiec), o Hub de Hidrogênio Verde do Ceará visa transformar o território cearense em um grande fornecedor global desse tipo de combustível (Ceará, 2022). Ribeiro Filho, Tahim e Veras (2023) relatam que este HUB terá o objetivo de ser um *player* global na produção, armazenagem, distribuição e exportação do produto, considerando as excelentes condições para entrada na economia do Hidrogênio

Verde do estado do Ceará.

O HUB de H2V será instalado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), na cidade de São Gonçalo do Amarante, a 60 quilômetros da capital Fortaleza. Para a produção do H2V, pretende-se o uso da energia elétrica renovável para a alimentação de eletrolisadores, visto que para ser considerado hidrogênio verde as fontes de energia em sua produção devem ser obrigatoriamente renováveis.

É preciso verificar, entretanto, as possibilidades de interiorização da economia do H2V. Ribeiro Filho, Tahim e Veras (2023) reforçam o forte potencial de produção de energia solar. Assim as regiões sertanejas do estado podem possibilitar a interiorização de produção de H2V. Esse processo de interiorização poderá gerar, além de equidade no desenvolvimento econômico e social, oportunidades de transmissão de conhecimento as regiões mais distantes da RMF, visto que a economia do H2V envolve várias áreas de conhecimento devido sua interdisciplinaridade.

Esse estudo analisou a produção de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas em usina instalada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará *campus* Quixadá, no sertão central do Ceará, verificando o potencial de produção de H2V e a perspectiva de uma economia do hidrogênio verde na região.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o potencial de produção de hidrogênio verde (H2V) com uso de energia solar fotovoltaica, a partir de uma usina piloto no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, em funcionamento na cidade de Quixadá e a perspectiva da economia do H2V nessa região.

2.2 Objetivos específicos

- a) Coletar dados, no intervalo de janeiro de 2022 a dezembro de 2023, da produção de energia elétrica a partir de usina solar fotovoltaica instalada no município de Quixadá.
- b) Verificar o potencial de produção de H2V a partir dessa usina, a partir do uso de eletrolisadores.
- c) Coletar informações sobre investimentos na economia de H2V no Ceará.
- d) Delinear uma perspectiva da influência da economia do H2V na região.

3 REVISÃO DA LITERATURA

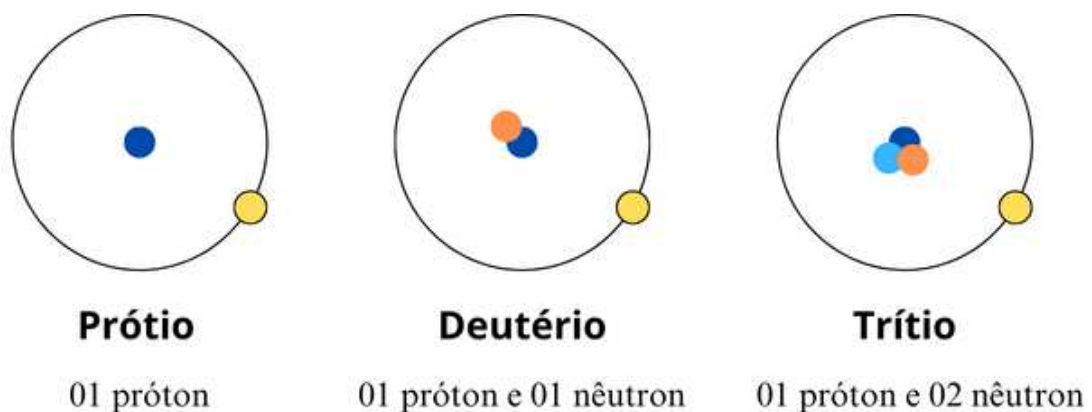
3.1 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais leve e abundante no universo, representando 75% em massa ou 90% em volume de toda a matéria (BRUSSO, 2021; VERFONDERN, 2022). No planeta Terra, ele é o nono elemento químico mais abundante por massa, estando presente na forma de compostos, principalmente como água (H_2O) e hidrocarbonetos. É representado pelo símbolo H e, conforme Prohaska *et al.* (2022) seu peso atômico é $1,0080 \pm 0,0002$, sendo considerado o menos denso dentre os elementos químicos. De acordo com Verfondern (2022) a descoberta do hidrogênio é atribuída ao cientista inglês Henry Cavendish, em 1766, e o seu nome provém do grego *hydrogenes*, que significa “gerador de água”, nome dado em 1773, pelo químico francês Antoine Lavoisier após realizar experimentos semelhantes aos de Cavendish.

Não é possível encontrar o hidrogênio em sua forma atômica na natureza, apresentando-se na forma diatômica H_2 . Em condições normais de temperatura e pressão, é um gás diatômico incolor, inodoro, insípido, não tóxico, não corrosivo e não metálico, que em princípio não é fisiologicamente perigoso (VERFONDERN, 2022). Em temperatura ambiente estará na forma gás, sendo o seu ponto de fusão na temperatura de $-259,3^\circ C$ e seu ponto de ebulição de $-252,9^\circ C$ (DAWOOD; ANDA e SHAFIULLAH, 2020).

Qi (2020) relata que o hidrogênio é encontrado em três formas isotópicas, isto é, que contém a mesma quantidade de prótons, mas se diferencia pela quantidade de nêutrons, que são: o hidrogênio prótio, deutério e trítio, conforme ilustra a Figura 01.

Figura 1: Isótopos de átomos de hidrogênio.



Fonte: Autor (2024).

Apesar de apresentar número atômico 01, ou seja, ter sua distribuição eletrônica com subnível mais energético s^1 , característico dos elementos da família 1A da tabela periódica, o hidrogênio não pertence a essa família. Dias (2019) explica que esse enquadramento não ocorre devido o hidrogênio não apresentar características presentes nesse grupo, tornando um elemento único na tabela periódica. Ainda conforme o autor, o hidrogênio pode formar ligações químicas do tipo covalente e iônicas e pode formar ânion e cátion monovalentes. Sua estrutura química permite que se ligue a grande parte dos elementos químico, sendo importante na formação de compostos ácidos e básicos. O Quadro 1: Características físico-químicas do hidrogênio apresenta o resumo das características físico-químicas do hidrogênio molecular.

Quadro 1: Características físico-químicas do hidrogênio

Propriedades	Unidades SI
Equivalências; Hidrogênio sólido, líquido e gás a pressão = 981 mbar e temperatura = 20°C	1kg = 14.104 l = 12.126 m ³
Peso molecular	1,00794
Pressão de vapor a (-252,8°C)	101,283 kPa
Densidade do gás no ponto de ebulição e 1 atm	1,331 kg/m ³
Gravidade específica do gás a 0°C e 1 atm (ar = 1)	0,0696
Volume específico do gás a 21,1°C e 1 atm	11,99 m ³ /kg
Gravidade específica do líquido no ponto de ebulição e 1 atm	0,071
Densidade do líquido no ponto de ebulição e 1 atm	67,76 kg/m ³
Ponto de ebulição em (101,283 kPa)	-252,9°C
Ponto de fusão em (101,283 kPa)	-259,3°C
Temperatura crítica	-239,9°C
Pressão crítica	1296,212 kPa, abs
Densidade crítica	30,12 kg/m ³
Calor latente de fusão no ponto triplo	58,09 kJ/kg
Calor latente de vaporização no ponto de ebulição	445,6 kJ/kg
Solubilidade em água vol/vol a 15,6°C	0,019
Viscosidade do gás diluído a 26 °C (299 K)	9 × 10 ⁻⁶ Pa·s
Difusividade molecular no ar	6,1 × 10 ⁻⁵ m ² /s
Calor específico a pressão constante (Cp)	14,34 kJ/(kg) (°C)
Calor específico a volume constante (Cv)	10,12 kJ/(kg) (°C)
Razão de calores específicos (Cp /Cv)	1,42
Menor valor de aquecimento, com base no peso	120 MJ/kg
Maior poder de aquecimento, com base no peso	141,8 MJ/kg
Menor valor de aquecimento, base de volume em 1 atm	11 MJ/ m ³
Maior valor de aquecimento, base de volume em 1 atm	13 MJ/ m ³
Razão estequiométrica ar-combustível a 27 °C e 1 atm	34,2kg/kg
Limites inflamáveis no ar	4%-75%
Limites explosivos (detonabilidade)	18,2 a 58,9 vol% no ar
Taxa máxima de combustão no ar	2,7 / 3,46 (ms ⁻¹)
Temperatura máxima da chama	1526,85°C
Temperatura de autoignição/no ar	400°C / 571°C

Fonte: Adaptado de Dawood, Anda e Shafiullah (2020).

3.1.1 Produção de H₂

O gás hidrogênio pode ser gerado por vários métodos. Qi (2020) explica que os experimentos do médico suíço Paracelso foram o ponto de partida para a descoberta do hidrogênio. Ao reagir um metal com um ácido forte, Paracelso percebeu a formação de gás como produto da reação. Kendall (2022) relata que em 1671 o químico Robert Boyle realiza um experimento reagindo limalha de ferro em ácido diluído, equalizando a formação do gás, que anos mais tarde foi identificado como um elemento químico distinto por Henry Cavendish. Dias (2019) explica que a obtenção de gás hidrogênio por troca simples ocorre por uma reação na qual um metal não nobre (Me) desloca o hidrogênio presente em um ácido inorgânico (HX), formando um sal qualquer (MeX) e o hidrogênio molecular (H₂). A equação formada do experimento é descrita na Equação 01, abaixo:



Nikolaidis e Poullikkas (2017) explicam que uma variedade de processos está disponível para a produção de H₂ e que, de acordo com as matérias-primas utilizadas, podem ser divididas em duas categorias principais, tecnologias convencionais e renováveis. Os principais métodos de produção de gás hidrogênio são químicos e físico-químicos. Contudo, outras tecnologias de produção estão em desenvolvimento e vem ganhando destaque no cenário mundial. A utilização de tecnologias biológicas está em expansão, visto que a possibilidade de produzir gás hidrogênio com baixo impacto ambiental torna estes métodos atrativos. Dos métodos físicos e/ou químicos destaca-se eletrólise da água, termólise de biomassa ou carvão, reforma a vapor e oxidação de hidrocarbonetos.

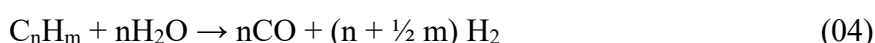
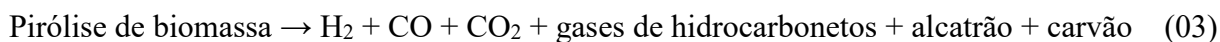
Na produção de hidrogênio pela a eletrólise a matéria prima utilizada é a água. Esse método consiste na inserção de energia elétrica no substrato, rompendo as moléculas de água (H₂O) em moléculas de gás oxigênio (O₂) e gás hidrogênio (H₂), conforme descrito na Equação 02. De acordo com Kumar e Lim (2022), a eletrólise da água é uma técnica eletroquímica de divisão da água para a produção de hidrogênio verde com a ajuda da eletricidade, que é uma tecnologia livre de emissões.



Até o momento, as tecnologias de eletrólise desenvolvidas e comumente usadas são

eletrólise alcalina, com uso de membrana (AEM ou PEM) e células de eletrólise de óxido sólido (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). É importante destacar que o hidrogênio produzido pela eletrólise da água será considerado verde quando a fonte de energia utilizada for renovável, podendo ser classificado por outra cor, caso essa fonte de energia ser originada de fonte não renovável. Estima-se que a eficiência energética desse processo seja de 61-82% (LARA e RICHTER, 2022).

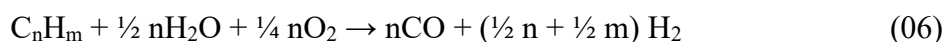
A produção de gás hidrogênio por termólise pode utilizar como matéria-prima o carvão ou biomassa, podendo usar a via por pirólise para a biomassa e a via por gaseificação para ambos os substratos. Termólise consiste em uma decomposição química causada pelo calor. A termólise da biomassa via pirólise consiste no processo termoquímico de geração de óleos líquidos, carvão sólido e compostos gasosos pelo aquecimento da biomassa a uma temperatura de 650–800 K a 0,1–0,5 Mpa (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). Nesse processo os gases de hidrocarbonetos produzidos podem ser reformados a vapor para maior produção de hidrogênio. As etapas individuais do processo de pirólise de biomassa, incluído a reforma de seus produtos, são representadas pelas equações 03, 04 e 05. Estima-se uma eficiência energética de 35-50% (LARA e RICHTER, 2022).



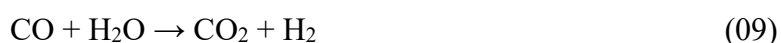
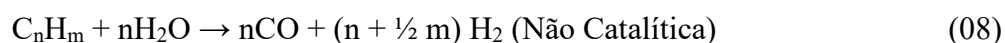
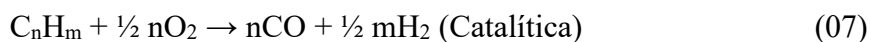
A termólise via gaseificação consiste na conversão termoquímica de biomassa e/ou carvão em um combustível gasoso num meio de gaseificação como ar, oxigênio e/ou vapor. Ocorre em temperaturas entre 500 e 1400°C, com pressões de operação a partir da atmosférica até 33bar, dependendo da escala da planta e da aplicação final do gás de síntese produzido (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). Liu *et al.* (2022) afirma que a gaseificação de biomassa é um processo químico complicado que converte substâncias de biomassa em gás permanente bruto e pequena quantidade de líquido condensável (alcatrão) e carvão sólido. Estima-se uma eficiência energética de 35-50% para biomassa e 74-85% para o carvão (LARA e RICHTER, 2022).

A reforma a vapor é um processo de produção de hidrogênio através de reações em série que consiste basicamente em uma conversão catalítica do hidrocarboneto e vapor em

hidrogênio e óxidos de carbono. As matérias-primas variam de metano, gás natural e outros gases contendo metano até várias combinações de hidrocarbonetos leves, incluindo etano, propano, butano, pentano e nafta leve e pesada (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). A Equação 06 demonstra a reação de reforma de um hidrocarboneto. Sua eficiência energética é estimada em 74-85% (Lara e Richter, 2022).



A oxidação de hidrocarbonetos consiste em processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis. Este processo envolve basicamente a conversão de vapor, oxigênio e hidrocarbonetos em hidrogênio e óxidos de carbono. O processo catalítico que ocorre a cerca de 950°C opera com matéria-prima variando de metano a nafta, enquanto o processo não catalítico ocorre a 1150-1315°C podendo operar com hidrocarbonetos, incluindo metano, óleo pesado e carvão (NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017). O processo pode ser verificado, conforme apresentação nas Equações 07, 08 e 09. Estima-se a eficiência energética de 60-75% (LARA E RICHTER, 2023; NIKOLAIDIS e POULLIKKAS, 2017).



Abaixo o Quadro 2 sintetiza as informações dos principais métodos de produção de gás hidrogênio descrito acima.

Quadro 2: Diferentes formas de produção de hidrogênio.

Matéria-prima	Método de produção	Eficiência energética
Água	Eletrólise alcalina	61-82%
Biomassa	Termólise via pirólise	35-50%
Biomassa	Termólise via gaseificação	35-50%
Carvão	Termólise via gaseificação	74-85%
Hidrocarbonetos	Processo de oxidação parcial de combustíveis fósseis	60-75%
Gás natural	Reforma do metano a vapor	74-85%

Fonte: Adaptado de Lara e Richter (2022).

Nikolaidis e Poullikkas (2017) criaram um quadro para resumir as principais vantagens e desvantagens de cada método de produção de hidrogênio. Abaixo, os resultados são apresentados na Quadro 3.

Quadro 3: Vantagens e desvantagens dos processos de produção de H₂.

Processo	Eficiência (%)	Principais Vantagens	Principais Desvantagens
Reforma a vapor	74–85	Tecnologia mais desenvolvida, infraestrutura existente.	Subproduto CO ₂ , dependência de combustíveis fósseis.
Oxidação parcial	60–75	Tecnologia comprovada, infraestrutura existente.	Subproduto CO ₂ , dependência de combustíveis fósseis.
Pirólise de biomassa	35–50	Neutro em CO ₂ , matéria-prima abundante e barata.	Formação de alcatrão, teor variável de H ₂ devido à disponibilidade sazonal e às impurezas da matéria-prima.
Gaseificação de biomassa	35–50	Neutro em CO ₂ , matéria-prima abundante e barata.	Formação de alcatrão, teor variável de H ₂ devido à disponibilidade sazonal e às impurezas da matéria-prima.
Eletrólise	61-82	Sem poluição, com fontes renováveis, tecnologia comprovada, infraestruturas existentes, matéria-prima abundante, O ₂ é o único subproduto, contribui para a integração das fontes de energias renováveis como opção de armazenamento de eletricidade.	Baixa eficiência geral, altos custos de capital.

Fonte: Adaptado de Nikolaidis e Poullikkas (2017).

3.1.2 Classificação do H₂

O gás hidrogênio produzido por métodos convencionais ou inovadores recebe uma classificação a partir das fontes de energia e/ou substrato utilizado em sua produção. Essa classificação é descrita como renovável ou não renovável, quando classificados a partir de seu substrato e através de indicação de cores, quando classificados de acordo com a fonte de energia envolvida e/ou seu processo de produção, permitindo a identificação de sua origem. Esta é a

razão pela qual as tecnologias de geração de hidrogênio são frequentemente classificadas com base em cores diferentes (AJANOVIC, SAYER E HAAS, 2022). Não existe norma ou documento que regulamente a classificação do hidrogênio por cores, o que permite que autores usem classificações distintas para o mesmo método de produção. No Brasil, atualmente, conforme classificação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), existem 09 cores que identificam a origem de produção do gás hidrogênio, sendo elas: preto, marrom, cinza, azul, turquesa, verde, musgo, rosa, amarelo e branco. Contudo, novas classificação por cores surgem a partir da descoberta de novos métodos de produção/exploração de H₂, a citar o hidrogênio laranja.

O hidrogênio marrom e preto é produzido via processo de gaseificação. Considerando a produção a partir do carvão, as cores marrom e preta do hidrogênio referem-se ao tipo de carvão linhita (marrom) e betuminoso (preto) (ARCOS e SANTOS, 2023). O carvão é normalmente gaseificado a temperaturas superiores a 900°C, sob pressões que variam entre 1 e 10 MPa em processos de gaseificação, como gaseificação de leito fixo, gaseificação de leito móvel, gaseificação de leito fluidizado ou gaseificação de fluxo arrastado (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). É um processo estabelecido, usado em muitas indústrias, que converte materiais ricos em carbono em hidrogênio e CO₂ (LARA e RICHTER, 2023). As emissões dos sistemas de produção de hidrogênio baseados no carvão são consideradas significativas (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022), sendo considerado um método de produção de hidrogênio menos ecológico, criando tanto CO₂ como a queima do combustível de origem (ARCOS e SANTOS, 2023).

O hidrogênio cinza é produzido a partir da reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma autotérmica. Embora uma variedade de gases à base de hidrocarbonetos possa ser usada, um combustível comumente utilizado para a produção de hidrogênio é o metano (CH₄). Atualmente, a maior parte do hidrogênio produzido corresponde ao hidrogênio cinza (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). No processo de reforma a vapor, vapor de alta temperatura é usado para reagir quimicamente com combustível de hidrocarboneto formando gás de síntese, uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (ARCOS e SANTOS, 2023). O hidrogênio cinza é produzido pelo método industrial mais comum e amplamente utilizado de reforma a vapor do gás natural, sem qualquer aplicação de métodos ou tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (*Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS*) (PANIC; CUCULIC e CELIC, 2022). O custo da produção de hidrogênio cinza é influenciado pelos preços do gás natural e pelo custo dos créditos de carbono, diminuindo potencialmente a sua competitividade em comparação com outros combustíveis ou técnicas de produção (BHOYAR,

2023). Chew *et al.* (2023) ressaltam que a sustentabilidade do hidrogênio cinza é questionável, uma vez que é responsável por uma elevada intensidade de carbono. O hidrogênio cinza é geralmente usado na indústria petroquímica e na produção de amônia (ARCOS e SANTOS, 2023).

O hidrogênio azul refere-se ao hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis, mas com um sistema de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS). A utilização não é obrigatória para ser qualificado como hidrogênio azul (ARCOS e SANTOS, 2023). Noussan *et al.* (2021) relatam que parece não haver uma definição padrão da taxa de captura de CO₂ necessária para mudar a definição do hidrogênio cinza para o hidrogênio azul. Ainda conforme os autores, a maioria dos estudos cita taxas máximas de captura na faixa de 70% a 95%, dependendo da tecnologia e das etapas em que a captura de CO₂ é aplicada. O CO₂ capturado pode ser comprimido e transportado em gasoduto ou transportado por estrada, ferrovia ou mar para uso em diversas aplicações. Alternativamente, o CO₂ capturado pode ser sequestrado e preso no subsolo como uma solução de armazenamento permanente (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). Os caminhos do hidrogênio azul têm a vantagem de aproveitar a experiência industrial existente a partir do hidrogênio cinza e, em alguns casos, a modernização de centrais existentes pode ser realizada através da adição de sistemas CCS (*Carbon Capture and Storage*) (NOUSSAN *et al.*, 2021). O hidrogênio azul, por outro lado, enfrenta desafios na captura e armazenamento de carbono. Atualmente, a CCS não é 100% eficiente na remoção de emissões, portanto, afetando sua confiabilidade. As tecnologias CCS também consomem muita energia, o que pode ser muito caro (CHEW *et al.*, 2023). O custo potencial da produção de hidrogênio azul possibilitado pelo CCUS é de aproximadamente 50% da produção equivalente de hidrogênio verde, o que torna o hidrogênio azul competitivo em áreas onde o preço dos combustíveis fósseis é relativamente baixo (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). Contudo, devem ser cumpridas condições específicas para garantir um armazenamento eficaz e duradouro de CO₂ (NOUSSAN *et al.*, 2021). Embora as vantagens a longo prazo do hidrogênio azul ainda não sejam claras, o hidrogênio azul é considerado uma via de produção que pode permitir a transição global dos processos convencionais de produção de hidrogênio para o hidrogênio verde e renovável (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022).

O hidrogênio turquesa é produzido por meio da pirólise do metano, onde as saídas primárias do processo são hidrogênio e carbono sólido (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). Arcos e Santos (2023) relatam que pirólise do metano pode ser realizada através de três abordagens: decomposição térmica, decomposição de plasma (conhecida como processo Kvaerner) e decomposição catalítica. No processo, o gás natural é utilizado como matéria-

prima, enquanto o consumo de energia proviria da eletricidade, presumivelmente de fontes de baixo carbono (NOUSSAN *et al.*, 2021). Uma vantagem da decomposição térmica do metano é a ausência de oxigênio, o que evita a formação de óxidos de carbono na etapa de reação. Em vez de óxidos de carbono, o processo produz carbono sólido que pode ser armazenado na forma de carbono filamentosos, nanofibras de carbono ou nanotubos de carbono (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). Conforme Noussan *et al.* (2021), o carbono sólido pode ter utilizações industriais e, portanto, ser visto como um recurso e não como um subproduto. Contudo, Chew *et al.* (2023) destaca que, quanto à sustentabilidade, os processos de hidrogênio turquesa geram carbono sólido e, embora estes processos reduzam as emissões de carbono, o seu valor depende da forma como o carvão sólido é utilizado. Se não houver aceitação no mercado, o carvão sólido será considerado resíduo.

O hidrogênio verde, também frequentemente denominado “hidrogênio limpo”, “hidrogênio renovável” ou “hidrogênio de baixo carbono”, é, por definição, o hidrogênio produzido com eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis (ARCOS e SANTOS, 2023). De acordo com PANIC, CUCULIC e CELIC (2022), inicialmente, o hidrogênio verde referia-se a qualquer hidrogênio produzido a partir de recursos renováveis. Os autores ainda relatam que, com a expansão de novas tecnologias, a terminologia do hidrogênio verde foi adaptada para considerar o potencial impacto das emissões de gases de efeito estufa (GEE), preocupações energéticas ou outros efeitos climáticos gerados pela metodologia de produção. Atualmente, as tecnologias de produção de hidrogênio por energia renovável relativamente maduras incluem a eletrólise da água e a reforma a vapor do biogás (YU; WANG; VREDENBURG, 2021). Três tecnologias principais estão em uso em todo o mundo, que são a eletrólise de óxido sólido, a eletrólise alcalina e a eletrólise com membrana de troca de prótons. A eletrólise alcalina é o método mais desenvolvido tecnicamente e comercialmente disponível para produção de hidrogênio (HUANG; BALCOMBE; FENG, 2023). Para essa via do hidrogênio verde é definida a combinação da geração de energia a partir de fontes renováveis e da eletrólise da água. Ao fornecer eletricidade e água pura a um eletrolisador, são produzidos fluxos de saída de hidrogênio e oxigênio (NOUSSAN *et al.*, 2021). Yu, Wang e Vredenburg (2021) destacam que, com o aumento da produção de eletricidade a partir de fontes renováveis e o seu excesso de capacidade temporariamente barato devido à intermitência solar e eólica, surgiram novas perspectivas para o hidrogênio, especialmente devido à crescente procura para resolver o problema do armazenamento a longo prazo do excesso de eletricidade. Para o hidrogênio verde, os padrões operacionais e os fatores de capacidade das fontes de energia renováveis são os principais estrangulamentos à sua produção

(CHEW *et al.*, 2023). Uma questão adicional relacionada à eletrólise é o consumo de água. O consumo de água pura está geralmente na faixa de 10–15 L por kg de saída de hidrogênio, e a água de entrada precisa ser deionizada. Na ausência de fontes de água doce, as opções incluem a dessalinização da água do mar ou a recuperação de águas residuais (NOUSSAN *et al.*, 2021). Embora a proposta de utilização da água do mar para eletrólise tenha potencial para resolver esta preocupação, a necessidade de investimento adicional para o processo de dessalinização cria outro enigma para o aspecto da equidade (CHEW *et al.*, 2023). Este aspecto pode tornar-se uma barreira crítica no sucesso de projetos de hidrogênio verde em áreas com forte potencial solar, como os desertos (NOUSSAN *et al.*, 2021). Outro ponto crítico descrito por Panchenko *et al.* (2023) é o custo da sua produção, que é atualmente 3 a 6 vezes mais caro do que na produção de hidrogênio cinza e marrom e, conseqüentemente, a produção do hidrogênio verde, até esse momento, representa apenas 5% da produção total de hidrogênio. Contudo, a produção de hidrogênio verde reduzirá as emissões nocivas para a atmosfera, e as regiões com elevado potencial de fontes de energia renováveis e ausência de combustíveis fósseis tornar-se-ão exportadoras deste valioso recurso, bem como utilizá-lo de forma mais intensiva na sua indústria, transporte e economia (PANCHENKO *et al.*, 2023).

O hidrogênio musgo é produzido a partir de reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa com ou sem CCUS (EPE, 2022). Essa classificação é derivada do hidrogênio verde, visto que as rotas de produção seguem a premissa de baixa ou zero emissão de GEE. Esse conceito é reforçado por Squadrito, Maggio e Nicita (2023) ao dizerem que a definição geral de hidrogênio verde deve estar relacionada com a ausência de emissões de CO₂, ou seja, produzido através de tecnologias que utilizam fontes renováveis, ou tecnologias neutras em carbono. Os autores relatam que há possibilidade de produção direta a partir de matérias-primas orgânicas aplicando microrganismos selecionados. As tecnologias aplicáveis, de acordo com o microrganismo específico, são fermentação escura, fotofermentação, fotólise, fermentação com gás CO₂. Ainda conforme os autores, estas tecnologias são muito interessantes porque oferecem a oportunidade de produzir hidrogênio a partir de águas residuais e outros resíduos contendo compostos orgânicos como açúcares, amidos, celulose, acetato, butirato, lactato. Outras tecnologias que utilizam vias biológicas também podem ser classificadas como hidrogênio musgo, a citar as Tecnologias Bioeletroquímicas (TBE), pois utilizam vias semelhantes na produção direta de hidrogênio. Contudo, a classificação de hidrogênio musgo não é reconhecida pela maior parte de pesquisadores, que o classifica apenas como biohidrogênio ou hidrogênio verde.

O hidrogênio amarelo é produzido a partir de fontes de energia da rede elétrica,

compostas por diversas fontes (EPE, 2022). Alguns autores reconhecem o hidrogênio amarelo como sendo produzido através da eletrólise com o uso da energia solar, embora esta designação esteja agora a tornar-se obsoleta (ARCOS e SANTOS, 2023). Para esses autores, o hidrogênio produzido a partir da rede elétrica, composta de várias fontes, é classificado como hidrogênio laranja (INCER-VALVERDE *et al.*, 2023). O custo do hidrogênio amarelo depende fortemente da matriz energética do país e do preço da eletricidade utilizada para alimentar os eletrolisadores. Portanto, cada cenário pode ser diferente, e recomenda-se incluir o custo da eletricidade junto com o custo da produção de hidrogênio (INCER-VALVERDE *et al.*, 2023). Embora o processo de eletrólise não produza emissões de CO₂ por si só, a energia elétrica que alimenta o processo de produção pode atribuir emissões significativas de GEE ao processo global de produção de hidrogênio (PANIC; CUCULIC; CELIC, 2022). As emissões de carbono variam significativamente ao longo do tempo, dependendo das fontes de energia da rede (ARCOS e SANTOS, 2023). Incer-Valverde *et al.* (2023) reforçam que o impacto ambiental do hidrogênio amarelo depende principalmente do mix energético da rede.

O hidrogênio produzido por energia nuclear recebe a classificação pelas cores rosa, roxo e vermelho. O hidrogênio rosa é produzido com a eletrólise da água a partir da eletricidade de uma usina nuclear. Também foi considerado que o hidrogênio rosa é obtido usando energia nuclear e calor por meio de eletrólise combinada e divisão termoquímica da água (ARCOS e SANTOS, 2023). Conforme Incer-Valverde *et al.* (2023) a classificação do hidrogênio vermelho e rosa foram divididos de acordo com o processo empregado para produzir o hidrogênio: termólise/termoquímica e eletrólise, respectivamente. A produção de hidrogênio a partir da energia nuclear tem as vantagens de não produzir gases de efeito estufa, utilizar a água como matéria-prima, além de alta eficiência e larga escala (HUANG; BALCOMBE; FENG, 2023). O hidrogênio rosa e vermelho não têm emissões diretas de carbono, mas têm outros impactos ambientais críticos decorrentes da radiação, da gestão de resíduos e do risco de acidentes (INCER-VALVERDE *et al.*, 2023). A sustentabilidade do hidrogênio rosa também é duvidosa. Como o hidrogênio rosa é alimentado por instalações nucleares, a eliminação de resíduos radioativos sem o tratamento adequado contaminará o ambiente e será perigosa para a saúde humana (CHEW *et al.*, 2023). Arcos e Santos (2023) destacam que a eletricidade ou o calor proveniente da energia nuclear são mais baratos do que a eletricidade proveniente de fontes verdes, assim, o preço do hidrogênio rosa é inferior ao do hidrogênio verde. Contudo, Panic, Cuculic e Celic (2022) ressaltam que o fornecimento limitado de urânio-235 e os obstáculos técnicos impedem as expansões em grande escala da energia nuclear, o que pode inibir a produção de hidrogênio de base nuclear a longo prazo.

O hidrogênio branco, também chamado de dourado, é captado a partir da extração de hidrogênio natural ou geológico. Sua captação é feita por meio de perfuração em depósitos de reservatórios de hidrogênio subterrâneos que ocorrem naturalmente (AIMIKHE e EYANKWARE, 2023). Arcos e Santos (2023) sugerem algumas hipóteses para sua formação, sendo a desgaseificação do hidrogênio do núcleo da Terra, a reação da água com rochas ultrabásicas (isto é, serpentização) ou com agentes redutores no manto, a radiólise natural (isto é, a dissociação da água por urânio ou plutônio) e a decomposição de matéria orgânica. Apesar do surgimento do hidrogênio branco poder ser complementar às outras gamas de cores do H₂, ainda há algumas incertezas em torno da formação, ocorrência e longevidade do hidrogênio no subsolo em diferentes profundidades (STALKER *et al.*, 2022). Devido ao baixo nível de investigação sobre o tema, ainda é difícil avaliar os recursos mundiais de hidrogênio branco (ARCOS e SANTOS, 2023).

O hidrogênio laranja é mais comumente produzido pela redução da água a hidrogênio após a oxidação anóxica e abiótica do óxido ferroso (FeO) em óxido férrico (Fe₂O₃) de cor laranja (OSSELIN *et al.*, 2022). Contudo, o H₂ laranja é classificado como não renovável, pois esgota os recursos de óxido de ferro formados há milhões de anos (BORETTI, 2023).

O Quadro 4 faz um resumo das classificações do hidrogênio, identificando seu substrato principal e processo.

Quadro 4: Classificação do hidrogênio por cores.

Classificação	Substrato	Processo
Preto	Carvão betuminoso	Gaseificação
Marrom	Carvão linhita	Gaseificação
cinza	CH ₄	Reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma autotérmica
Azul	combustíveis fósseis com CCUS	Reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma autotérmica
Turquesa	CH ₄	Pirólise
Verde	Água	Eletrólise
Musgo	Biomassa e resíduos sólidos e líquidos	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa com ou sem CCUS
Amarelo	Água	Eletrólise com eletricidades de matriz combinada
Rosa	Água	Eletrólise e Termólise com energia nuclear
Laranja	Óxido ferroso (FeO)	Oxidação anóxica e abiótica
Branco	H ₂	Natural

Fonte: Autor (2024).

3.1.3 Economia do H₂

Após inúmeras considerações, o hidrogênio, devido às suas excelentes propriedades, emergiu como um futuro portador de energia sustentável ideal e esperançoso (ABE *et al.*, 2019). Assim, o conceito de uma economia do hidrogênio pode ser descrito como a utilização do hidrogênio como transportador de energia para diferentes setores que complementam a eletricidade (YAP e MCLELLAN, 2023). Um sistema onde o hidrogênio é o principal transportador de energia é chamada de Economia do Hidrogênio ou Sistema Energético do Hidrogênio (ABE *et al.*, 2019).

A visão original de uma economia do hidrogênio foi conceituada numa altura em que as preocupações com o esgotamento dos combustíveis fósseis face ao crescimento exponencial da utilização global de energia primária e aos níveis crescentes de poluição associados se destacam (YAP e MCLELLAN, 2023). Abe *et al.*, (2019) ressaltam que o conceito de empregar hidrogênio como transportador de energia data de mais de dois séculos atrás, mas foi acentuado após a crise energética global da década de 1970 e com os avanços tecnológicos na década de 1980.

O conceito de economia do hidrogênio gira em torno da produção, armazenamento, transporte, aplicação e formulação de políticas de hidrogênio (KAR, HARICHANDAN; ROY, 2022). O hidrogênio pode ser produzido por diversas tecnologias e utilizar matérias primas renováveis e não renováveis. Ele é geralmente armazenado nas formas de gás pressurizado, líquido criogênico e material de estado sólido resultante de ligações físicas ou químicas (ARMITHAN e PERERA, 2022). O hidrogênio tem uma ampla gama de uso potencial na indústria (como matéria-prima e meio de armazenamento), transporte (como combustível), energia (como transportador de energia) e também na construção (KAR, HARICHANDAN; ROY, 2022). Dillman e Heinonen (2022) ressaltam que formulação da política para a economia de hidrogênio deve visar a produção sustentável, com metas bem definidas que permitam contemplar as especificidades locais, respeitando aspectos sociais, econômicos e ambientais.

A economia do hidrogênio é um aspecto multidimensional que requer uma maior colaboração entre pesquisadores, instituições e países (KAR, HARICHANDAN; ROY, 2022). A implementação de novas tecnologias energéticas de hidrogênio depende, entre outras coisas, da economia de cada país e dos objetivos e cenários de longo prazo incluídos nas suas estratégias, políticas, programas de pesquisa e desenvolvimento e roteiros nacionais (CADER, KONECZNA; OLCZAK, 2021).

3.1.4 Economia do H₂ no Ceará

O Estado do Ceará localizado na região costeira do Nordeste do Brasil possui uma extensão territorial de 148.894,447 km², o que representa 1,74% do território brasileiro. Com população de cerca de 8,795 milhões, no ano de 2022, o IDH no Estado, em 2023, foi de 0,734 colocando-se na posição 12^o no ranking nacional (IBGE, 2023). Apesar de possuir 4% da população brasileira, o estado representou apenas 2,1% do PIB nacional em 2022. Considerando o ranking de PIB *per capita* nacional, o Ceará está na 24^a posição entre os entes federados. Esses dados refletem a concentração de renda no Estado e índices de pobreza.

A produção de combustíveis fósseis no estado do Ceará não é significativa e a eletricidade vem de outros estados federais do Brasil (DO SACRAMENTO *et al.*, 2008). O Ceará possui condições abundantes de produção de hidrogênio gerado através de energias solar e eólica, sem contar uma rede madura de dutos de gás natural com perspectivas de extensão (PATRÍCIO *et al.*, 2012). A exploração de fontes renováveis de energia no estado do Ceará resultará no aumento do produto interno bruto local, na redução da poluição ambiental e consequentemente no aumento da qualidade de vida da população desse estado (DO SACRAMENTO *et al.*, 2008).

Atualmente, os esforços de implantação de usinas de H₂V estão concentrados na região litorânea do Estado. Como esperado, os municípios litorâneos do estado do Ceará são aqueles com melhor potencial para produção de hidrogênio com energia eólica, com valores superiores a 198 toneladas/km²/ano (ESTEVEES *et al.*, 2015). Outro fator favorável é a logística para exportação através dos portos marítimos, que possibilitarão o escoamento da produção para outros Estados do país e/ou outros países.

O Ceará foi o primeiro estado do Brasil a explorar a energia eólica (DO SACRAMENTO *et al.*, 2008). A maior parte dos parques eólicos instalados e ainda a serem instalados no Estado do Ceará estão ou estarão no litoral desse estado. Por outro lado, o estado do Ceará tem um potencial significativo para explorar a energia solar contabilizando que a radiação solar média diária em um metro quadrado é de cerca de 5 kWh que é de longe uma das mais altas do território brasileiro (ESTEVEES *et al.*, 2015).

Por serem fontes de energia intermitentes, as energias solar e eólica não estão disponíveis nas ocasiões mais necessárias. Portanto, para agregar valor a estas energias renováveis seria viável e conveniente armazená-las em períodos fora de ponta e de baixa procura (PATRÍCIO *et al.*, 2012). Conforme Esteves *et al.* (2015) na região da Ibiapaba, no Sudoeste e principalmente nos Inhamuns e no Sertão Central do Ceará, encontram-se os municípios com melhor potencial de produção ultrapassando as estimadas 181 toneladas/km²/ano de hidrogênio solar.

Outro ponto favorável ao estado do Ceará é a condição de logística de transporte do gás hidrogênio dentro do estado. Patrício *et al.* (2012) relatam que existe uma rede de gasodutos de gás natural no Estado do Ceará que oferece condições para a injeção parcial de hidrogênio. Ainda conforme os autores, o Estado do Ceará possui mais de 160 km de gasodutos de gás natural, e que toda a infraestrutura logística de gás natural do Estado pode ser gradativamente adaptada à economia do hidrogênio desde que, devido a certas semelhanças entre os dois gases, a transição exija investimentos relativamente baixos.

Apesar das vantagens descritas acima, um desafio para produção de H2V no Estado do Ceará será a disponibilidade de água para realização da eletrólise. Ainda que se tenha desenvolvido políticas e programas para a otimização da captação, gestão e disponibilidade desse recurso no Estado, ter a concorrência entre o atendimento da população e a produção de hidrogênio pode ser um impedimento para a possibilidade de interiorizar usinas de H2V.

Uma política sobre a exploração e demais ações da economia do H2V é necessária para que o desenvolvimento seja sustentável em todas as camadas associada. A lei estadual nº 18.459/2023, publicada em 11 de setembro de 2023, implementou a política do hidrogênio verde, sustentável e seus derivados no âmbito do estado do Ceará, definindo quais são os conceitos, fundamentos, objetivos e seus alcances, com foco no desenvolvimento baseado na diversificação e ampliação da matriz energética e na redução de carbono (GUIMARÃES, 2023). A lei criou, ainda, o Conselho Estadual de Governança e Desenvolvimento da Produção de Hidrogênio Verde, Sustentável e seus Derivados, com competência para discutir estratégias, definir diretrizes e ações voltadas ao incentivo à cadeia de produção de hidrogênio verde, sustentável e seus derivados no Estado, contribuindo com o desenvolvimento da economia de baixo carbono (CEARÁ, 2023).

Logo, o Ceará tem condições de reduzir consideravelmente o atual cenário de dependência energética, aumentando o número de opções internas de fornecimento de energia elétrica, causando impactos positivos na economia local (SACRAMENTO *et al.*, 2013). A expectativa é que no futuro todos os combustíveis fósseis consumidos pelo Estado do Ceará sejam substituídos pelo hidrogênio renovável (PATRÍCIO *et al.*, 2012).

3.2 Energia solar

Energia solar refere-se à energia proveniente do sol que é convertida em diferentes formas de energia utilizáveis, como eletricidade ou calor, por meio de tecnologias e dispositivos específicos. Essa forma de energia é abundante, renovável e limpa, tornando-a uma fonte importante de energia sustentável. Maka e Alabid (2022) entendem que a energia solar é uma

tecnologia amiga do ambiente, uma grande fonte de energia e uma das mais significativas fontes de energia renovável e verde. Desempenha um papel substancial na obtenção de soluções energéticas de desenvolvimento sustentável.

Em geral, a tecnologia de energia solar ativa pode ser agrupada em duas categorias: tecnologia fotovoltaica e tecnologia solar térmica. Nos últimos anos, a tecnologia fotovoltaica que envolve o uso de semicondutores para converter a luz solar diretamente em energia elétrica tornou-se uma opção altamente desejável (KABIR *et al.*, 2018). Os sistemas fotovoltaicos convertem a energia do sol em eletricidade através da utilização de painéis solares. Estes dispositivos fotovoltaicos tornaram-se rapidamente a opção mais barata para nova geração de eletricidade em vários locais do mundo devido à sua implantação onipresente (MAKA e ALABID, 2022). Estas abordagens já foram comprovadas e são amplamente praticadas em todo o mundo como alternativas renováveis às tecnologias convencionais não hídricas (KABIR *et al.*, 2018).

3.2.1 Energia solar fotovoltaica

Rabaia *et al.* (2020) explicam que um sistema solar fotovoltaico normalmente consiste em conjuntos e combinações de painéis fotovoltaicos, um controlador de carga, um inversor de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), medidor de energia, disjuntor e, o mais importante, uma bateria ou um conjunto de baterias dependendo do tamanho do sistema. A Figura 2 mostra um esquema geral de um sistema fotovoltaico. O painel fotovoltaico gera saída em CC que é regulada pelo controlador de carregamento e armazenada na bateria. Quando necessária, a energia armazenada na bateria é então invertida para CA através do inversor (CC/CA) para alimentar cargas em CA ou, de outra forma, alimenta diretamente uma carga CC. Um medidor de energia é usado para registrar e medir o fluxo de eletricidade que alimenta a carga.

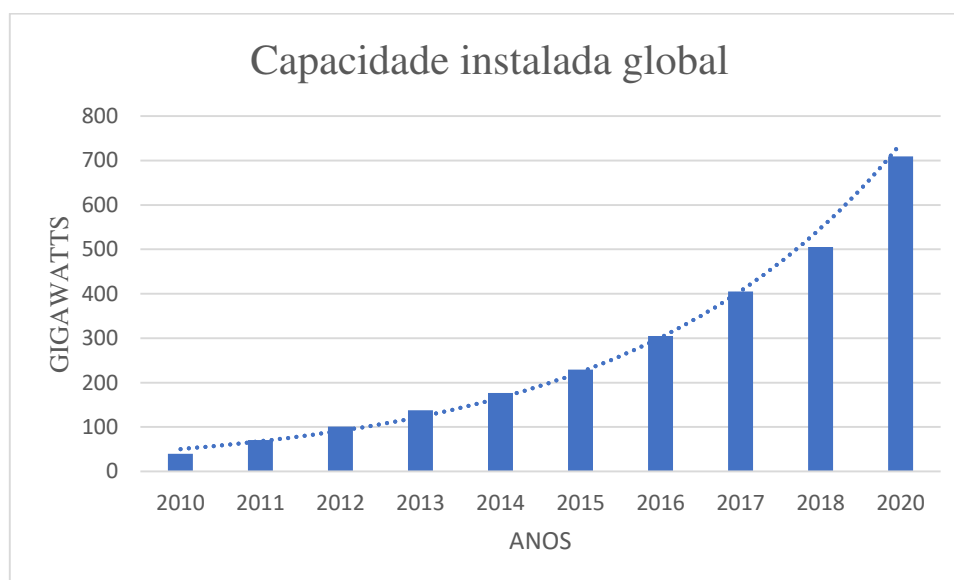
Figura 2: Esquema de funcionamento do Sistema Fotovoltaico (SFV).



Fonte: Adaptado de Moraes (2021).

A geração de energia solar fotovoltaica desempenha um papel significativo e crescente em muitos países. A capacidade instalada de energia solar em todo o mundo tem sido rapidamente aumentada para atender às demandas energéticas. O mercado global anual de energia solar fotovoltaica aumentou consideravelmente, chegando em 2018 a atingir a capacidade instalada total de 505 GW. A capacidade instalada da tecnologia fotovoltaica de 2010 a 2020 aumentou de 40.334 para 709.674 MW (MAKA e ALABID, 2022; HAMED e ALSHARE, 2022). Essa evolução é demonstrada através do Gráfico 1.

Gráfico 1: Crescimento da capacidade instalada global da energia solar fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de Hamed e Alshare (2022).

Na década mais recente, o custo de produção de módulos fotovoltaicos caiu drasticamente, proporcionando-lhes não só acessibilidade, mas por vezes tornando-os a forma de energia mais barata (MAKA E ALABID, 2022). Kabir *et al.* (2018) destaca que políticas, investimentos e apoios (tais como financiamento de pesquisas) de várias organizações governamentais e não governamentais para tecnologias solares ajudaram a construir uma base sólida para a exploração deste sistema de energia renovável.

A energia solar é considerada uma fonte de energia não poluente, confiável e limpa. Ao contrário de outras fontes de energia, a sua utilização não é acompanhada pela libertação de gases nocivos, por exemplo óxidos de C/N/S e/ou compostos orgânicos voláteis (COV) e partículas como fuligem, negro de fumo, metais e partículas (KABIR *et al.*, 2018). Outro destaque, conforme Maka e Alabid (2022), é que os arranjos fotovoltaicos têm

vida útil de 30 anos e vêm em vários tons com base no tipo de material utilizado em sua produção. Contudo, as usinas solares fotovoltaicas têm impacto no meio ambiente. Este impacto varia dependendo do tamanho e tipo das usinas solares (HAMED E ALSHARE, 2022). Os autores citam que a implantação de usinas fotovoltaicas impacta a biodiversidade do local instalado, alteram o uso e cobertura do solo e influenciam no microclima da região, além de trazer impactos visuais e estéticos.

Em relação a produção de hidrogênio renovável, o sistema fotovoltaico (SFV) é considerado a tecnologia mais adequada para a produção de hidrogênio a partir da energia solar combinada com a eletrólise da água. Os painéis fotovoltaicos produzem eletricidade para alimentar o sistema de eletrólise, que permite a extração dos gases oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) da água (BENGHANEM *et al.*, 2023). Outra importante atuação do SFV está relacionada nos processos de dessalinização da água. O método mais típico para a tecnologia de dessalinização solar fotovoltaica usada para dessalinizar água do mar ou água salgada é a eletrodialise. Esta técnica emprega eletricidade de corrente contínua para remover o sal do mar ou da água salgada (MAKA E ALABID, 2022). Esse é um importante uso para o SFV, pois considerando que a água é um recurso escasso e que é comum a condição de água com grande concentração de sais em regiões mais áridas, permitiria que não ocorresse a concorrência do uso de água potável para produção de hidrogênio por eletrolise alcalina nessas regiões.

4 METODOLOGIA

4.1 Características da usina

A cidade de Quixadá está situada no sertão central do estado do Ceará, no Nordeste do Brasil. A cidade fica a cerca de 160 quilômetros ao sul da capital do estado, Fortaleza. Está localizada na mesorregião Sertões Cearenses e na microrregião do Sertão de Quixeramobim. Quixadá tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 4° 58' 41" Sul, Longitude: 39° 1' 8" Oeste. O sistema fotovoltaico usado para este estudo de casa está localizado no Instituto Federal do Ceará *campus* Quixadá e foi instalado no ano de 2020. A usina é composta por placas de módulo fotovoltaico de silício monocristalino com tecnologia PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*) de 72 células, instalado nos telhados das edificações presentes no campus. Este sistema foi projetado para a produção estimada de 7.562,00 kWh por mês e uma média de geração 90.744,00 kWh por ano, com uma variação na faixa de 15% para mais ou para menos. As placas fotovoltaicas ocupam uma área total de 281,87 m², divididas em 143 módulos de 390 Wp, 01 inversor de 15,0 kW e 01 inversor de 30 kW. Estão contidas algumas proteções nos inversores para CC e CA. As proteções CC são: AFCI & 2014 NEC Ready; medição de isolamento CC; fusível CC – 1000V 15 A; chave seccionadora 1000V/1100V 16A; proteção às falhas com tela de interrupção; proteção de polaridade reversa CC; proteção de falha de aterramento com monitoramento de interrupção de isolamento e dispositivo de proteção contra surtos Tipo II (DPS CC). As proteções referente a CA, são: Anti-ilhamento, que desconecta o gerador da rede, sem qualquer retardo intencional, em caso de falta de tensão oriunda da rede de distribuição; Sistema de check de sincronismo, que monitora as grandezas no lado do consumidor e no lado da concessionária visando o sincronismo das mesma; Relé de sobre e sub frequência, que monitora a frequência no local onde estão instalados, considerando a medição de tensão em uma janela de amostragem de no mínimo 1 (um) ciclo; Relé de sub e sobretensão, para evitar aberturas indevidas nos equipamentos de proteção, por motivos de desequilíbrio de tensão, ou inversão de sequência de fases; Proteção de curto de saída; Proteção de sobrecorrente de saída e Dispositivo de proteção contra surtos Tipo II (DPS CA). As especificações técnicas da placas fotovoltaicas e inversores são apresentadas no Anexo A.

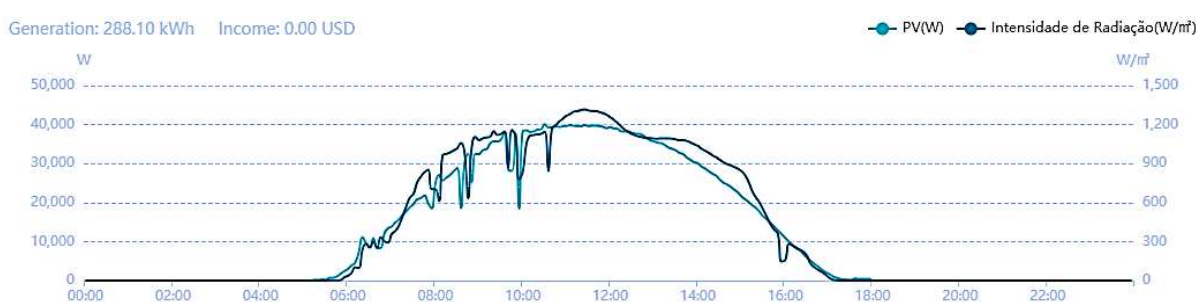
4.2 Monitoramento e coleta de dados

O monitoramento foi realizado de forma remota através de software do fabricante dos inversores, GOODWE, que disponibiliza dados como tensões, correntes, potências e geração de energia, além de indicar outras variáveis, como temperatura, vento e irradiação

através de sensores. As especificações técnicas dos sensores são apresentadas no Anexos B.

O software GOODWE está disponível para acesso através do site do fabricante dos inversores, permitido o acesso por meio de qualquer dispositivo com acesso à internet. As medições são realizadas a cada 01 minuto e são registradas no software, gerando um gráfico em tempo real, que apresenta a energia gerada em W e a intensidade de radiação em W/m^2 . Abaixo, a Figura 03 apresenta um exemplo de gráfico de geração de energia e radiação realizada no dia 09/10/2023.

Figura 3:Exemplo de gráfico de geração de energia.



Fonte: GOODWE (2024)

O sistema disponibiliza relatórios com a média de produção de energia mensal e anual, bem como a intensidade de radiação. Coletaram-se os dados de geração no intervalo de tempo de janeiro de 2022 a dezembro de 2023. O intervalo escolhido deve-se ao início da estabilização dos sistemas de monitoramento e controle de armazenamentos de dados, que até então, estavam com dificuldade em transmitir as informações para a rede de internet. Os dados coletados foram a energia média produzida em cada mês, no intervalo descrito acima.

4.3 Informações sobre a economia do H2V no Ceará

Foi realizado um levantamento documental das ações do Governo do estado do Ceará para identificar como está sendo desenvolvido as políticas referentes a economia de H2V. Buscou-se em sites oficiais da gestão do governo estadual e de portais de notícias e informações e documentos oficiais que tratam dos assuntos vinculados à economia de H2V no estado. Foram coletadas as informações sobre os memorandos e pré-contratos firmados entre governo do estado e empresas, estimativas de recursos a serem investidos, oportunidades de novos postos de trabalhos e as regiões beneficiadas por essas ações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

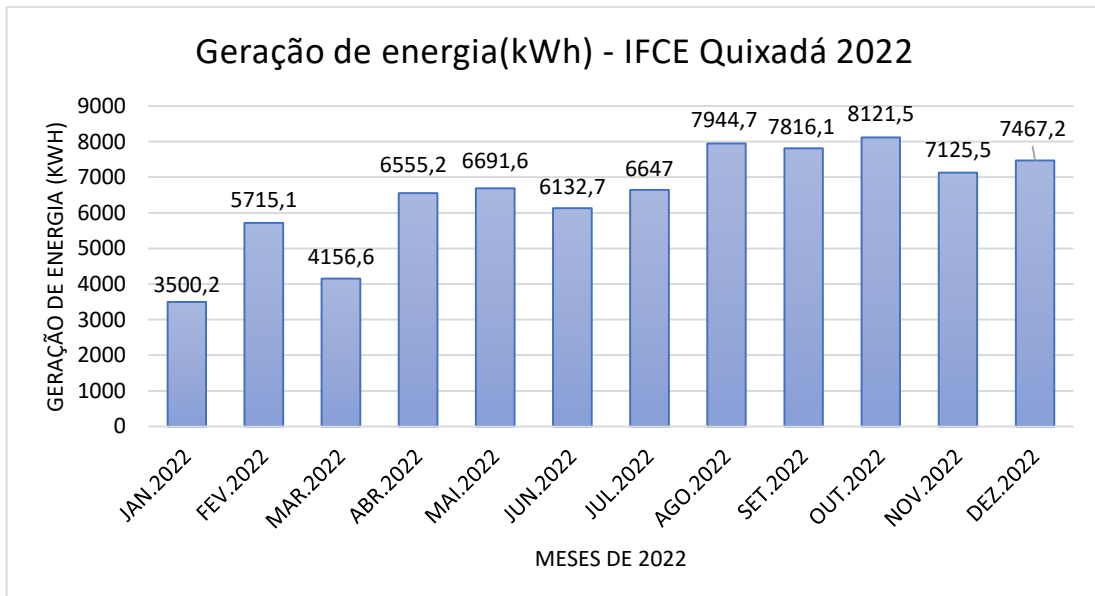
As medições de geração de energia foram coletadas pelo sistema GOODWE de forma instantânea, registrando o total gerado no dia. Assim o sistema informa a quantidade média de energia gerada no mês. Os dados obtidos são apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2. A partir das tabelas foram gerados os Gráfico 2 e Gráfico 3.

Tabela 1: Relatório de geração de energia – Ano 2022.

Data	Geração de energia(kWh)
JAN.2022	3500.2
FEV.2022	5715.1
MAR.2022	4156.6
ABR.2022	6555.2
MAI.2022	6691.6
JUN.2022	6132.7
JUL.2022	6647
AGO.2022	7944.7
SET.2022	7816.1
OUT.2022	8121.5
NOV.2022	7125.5
DEZ.2022	7467.2
TOTAL	77873.4

Fonte: GOODWE (2024)

Gráfico 2: Produção mensal de energia – Ano 2022.



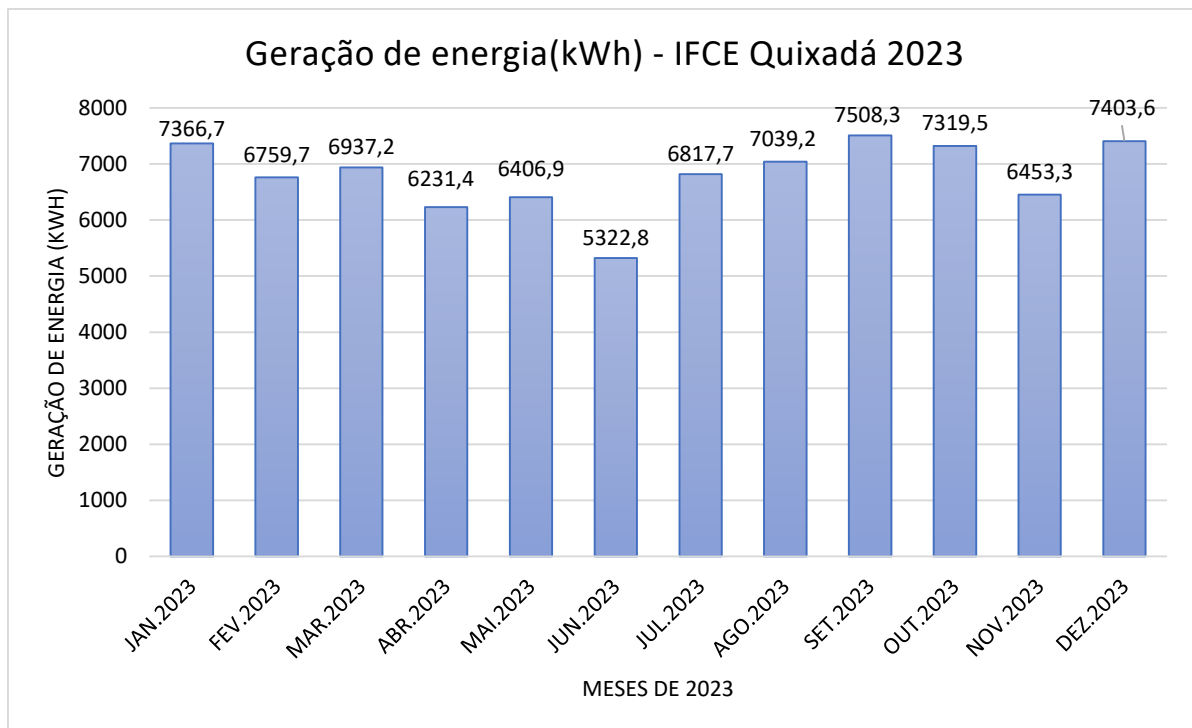
Fonte: GOODWE (2024)

Tabela 2: Relatório de geração de energia – Ano 2023.

Data	Geração de energia(kWh)
JAN.2023	7366.7
FEV.2023	6759.7
MAR.2023	6937.2
ABR.2023	6231.4
MAI.2023	6406.9
JUN.2023	5322.8
JUL.2023	6817.7
AGO.2023	7039.2
SET.2023	7508.3
OUT.2023	7319.5
NOV.2023	6453.3
DEZ.2023	7403.6
TOTAL	81566.3

Fonte: GOODWE (2024)

Gráfico 3: Produção mensal de energia – Ano 2023.



Fonte: GOODWE (2024)

A usina foi projetada para uma produção anual de 90.744,00 kWh por ano, com uma variação na faixa de 15% para mais ou para menos. Ao analisarmos os dados acima, verifica-se que a quantidade de energia produzida durante os anos de 2022 e 2023 estão dentro da faixa estimada, o que demonstra a confiabilidade na estimativa de produção e na maturidade e segurança de dados para projetar usinas para funcionamento na região onde o estudo foi

realizado.

Verifica-se, também, que os meses com melhores desempenhos são os do intervalo que vão de julho a dezembro. Esse resultado já era esperado, visto que no primeiro semestre do ano é o período com maior pluviosidade do estado. Em especial, os meses de agostos, setembro e outubro possuem o melhor desempenho, demonstrando maior produção de energia.

A partir dos dados de produção de energia coletados, criou-se três cenários para analisar a produção de H₂V no município de Quixadá. Os dois primeiros cenários criados, pessimista e otimista, consideram os meses de menor e maior produção de energia, respectivamente, e o outro considera a média de produção dos meses no intervalo de janeiro de 2022 a dezembro de 2023. O resultado é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Cenários de produção de energia.

Cenário	Geração de energia(kWh)/mês
Pessimista	3500,20
Otimista	8121,50
Média	6643,32

Fonte: Autor (2024)

Considerando os cenários apresentados na Tabela 3, estimou-se a geração de energia por área de cobertura. Esse fator é importante, visto que para uma produção de H₂V viável será necessário estimar a área ocupação para construção de uma usina. O fator de ocupação de área foi definido por meio da razão entre geração de energia e a área total de placas fotovoltaica da usina estudada. O resultado é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Razão geração por área de placas fotovoltaicas.

Cenário	Fator (kWh/mês*m²)
Pessimista	12,42
Otimista	28,81
Média	23,57

Fonte: Autor (2024)

Ao considerar o uso de um eletrolisador comercial, onde o consumo de energia para realizar a eletrolise seja 3,9-4,4 kWh/Nm³, estima-se que serão produzidos em cada cenário: 13.650,78-15.400,88Nm³/mês para o pessimista; 31.673,85-35.734,60Nm³/mês para o otimista; 25.908,95-29.230,61Nm³/mês para o médio. Essas quantidades são estimadas e vão variar dependendo dos fatores do processo de eletrólise, como eficiência do equipamento, tipo

de eletrodos, armazenamento dentre outros.

Esses resultados revelam que a usina piloto possui desempenho de produção de energia elétrica bem consolidado, conforme esperado nos estudos preliminares do projeto. Assim, a partir dos dados encontrados é possível validar o potencial de produção de H2V com o uso de energia solar fotovoltaicas, por meio da eletrólise da água.

Em 07 de setembro de 2023 foi publicado a Lei Estadual N° 18.459, que institui a política estadual do hidrogênio verde, sustentável e seus derivados no âmbito do estado do Ceará e cria o Conselho Estadual de governança e desenvolvimento para produção de hidrogênio verde, sustentável e seus derivados. Esta lei é um marco legal que conceitua e fundamenta a exploração e desenvolvimento da produção, do transporte e do armazenamento do hidrogênio verde, bem como descreve os objetivos da Política Estadual do Hidrogênio Verde, Sustentável e seus Derivados. Com isso, o estado do Ceará formaliza sua intenção no desenvolvimento de política voltada a economia do H2V.

Outra ação realizada pelo Governo do estado é a assinatura de Memorandos de entendimento (MoU – sigla em inglês) com empresas da área de produção, armazenamento e transporte de H2V e produtos da eletrólise da água, bem como fornecedores de equipamentos, agentes de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e capacitação de mão-de-obra. Conforme anunciado pela Secretária do Meio Ambiente e Mudança Climática (SEMACE), até o primeiro semestre de 2024, já foram assinados 37 MoU. Ainda conforme o órgão, 06 pré-contratos com empresas ligadas a economia de H2V foram assinados até junho de 2024. O Apêndice A apresenta as empresas que assinaram os memorandos junto ao Governo Estadual.

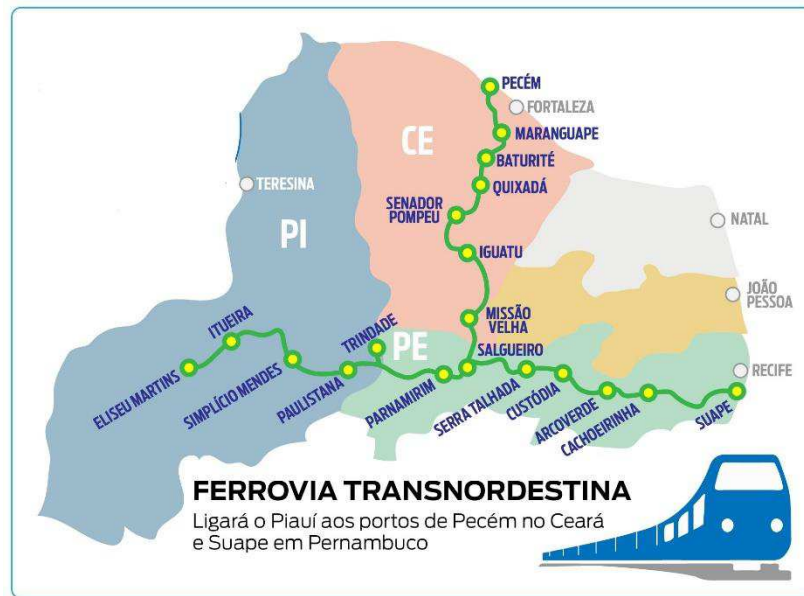
Ao verificar as informações disponíveis sobre as intenções de instalações das empresas que firmaram acordo com o governo estadual, percebeu-se que, em sua grande maioria, a intenção de instalação será na região do complexo do Porto do Pecém, em São Gonçalo do Amarante. Isso ocorre devido a facilidade de escoamento da produção do H2V, reduzindo os custos logísticos. Contudo, concentra maior parte dos investimentos previstos em uma única região, reduzindo as oportunidades de acesso a empregos e desenvolvimento socioeconômico e tecnológico das demais regiões que poderiam se beneficiar desses investimentos.

Ao somar todos os investimentos anunciados nas divulgações dos MoU's e pré-contratos, conforme fontes presentes no Apêndice A, percebeu-se investimentos financeiros que superam o valor de R\$ 186 bilhões, e a estimativa de geração de 11 mil empregos. É importante observar que, apesar de todo investimento e geração de empregos estimados, não há equidade dessas ações à todas as regiões do estado. É compreensível, nesse primeiro momento, que a

economia do H2V foque na demanda de exportação para outros estados e países, favorecendo sua instalação na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Contudo, é necessário que se desenvolvam políticas públicas que incentivem a interiorização da economia do hidrogênio verde às regiões mais internas do estado. Para que haja uma distribuição de oportunidades mais justas e com equidade, as demais regiões deverão ser contempladas com os investimentos e incentivos que permitam o desenvolvimento da economia do H2V e seus derivados.

Ao observar, sob uma perspectiva socioeconômica, os investimentos anunciados pelo governo poderiam gerar oportunidades para o desenvolvimento de comunidades localizadas em regiões sertanejas do estado. Investir na economia do H2V permite, além de oportunidades ligadas diretamente ao ciclo produtivo de hidrogênio e seus derivados, o desenvolvimento e transferência de conhecimento. Por se tratar de um assunto interdisciplinar, as energias renováveis ganham relevância no meio acadêmico e de pesquisa. Cria-se a possibilidade de integrar o meio produtivo com o da pesquisa e desenvolvimento, proporcionando o aprimoramento de processos e tecnologias para maior eficiência de geração de energias renováveis. Os insumos produzidos podem ser utilizados para abastecer a cadeia produtiva dentro da própria região, criando oportunidades de instalações de indústrias além de fortalecer o comércio local. Ou ainda, escoar a produção do H2V e os derivados da eletrólise para abastecer outras regiões ou países, utilizando rotas logísticas existentes ou desenvolvidas para essa finalidade. Especificamente para o município de Quixadá, é possível aproveitar a rota de abastecimento de gás natural pela Companhia de Gás do Ceará (CEGAS), que poderia utilizar dessa logística para transportar os produtos da eletrólise para RMF. Outra rota logística, em perspectiva futura, para escoamento seria por meio ferroviário, uma vez que consta no planejamento da expansão da ferrovia Transnordestina a interligação entre o Complexo do Porto do Pecém a outras regiões do estado e entre estados vizinhos. A Figura 04 apresenta a perspectiva da rota da ferrovia Transnordestina concluída. Há, ainda, a possibilidade de transporte rodoviário, pois a distância entre o Porto do Pecém e Quixadá, considerando a malha viária do estado, é de 203 km. A logística de transporte de H2V mostra-se um potencial gerador de oportunidades de empregos e renda, sabendo que sua abrangência vai desde o estudo de escoamento, além de construção, manutenção e operação destas vias.

Figura 4: Rota prevista para Transnordestina.



Fonte: Adaptado de Eugênio (2023).

Contudo, é válido destacar que, para que se tenha eficiência no desenvolvimento de comunidades utilizando a economia do H2V, estudos de impactos ambientais e sociais devem ser realizados, de modo a prever como essas localidades serão afetadas pela implantação desta uma economia. Verificar a viabilidade econômica e socioambiental da economia do hidrogênio verde direcionará os recursos de modo a otimizar as oportunidades de desenvolvimento local e proporcionará maior segurança de investimento.

6 CONCLUSÃO

Os dados coletados indicam uma uniformidade na produção de energia elétrica por meio da usina fotovoltaica avaliada. Criou-se três cenários para a geração de energia elétrica por meio de placas solares fotovoltaicas, sendo a geração de 3.500,20 kWh/mês para o pessimista, 8.121,50 kWh/mês para o otimista e 6.643,32 kWh/mês para o médio, para uma área de 281,87 m² de placas fotovoltaicas. Utilizando como referência um eletrolisador comercial, estimou-se a produção de hidrogênio de 13.650,78 - 15.400,88Nm³/mês para o pessimista, 31.673,85 - 35.734,60Nm³/mês para o otimista, 25.908,95 - 29.230,61Nm³/mês para o médio. Assim, mostra-se que os três cenários de produção de H₂, com o uso de energia solar fotovoltaica, são potencialmente promissores.

Observou-se que, apesar de o Estado possuir uma lei que dá partida a Política Estadual do Hidrogênio Verde e que em seu conteúdo incentive o desenvolvimento de forma a contemplar a participação integral de todos municípios, há uma forte preferência pela Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para a implantação das empresas ligadas a economia do H₂V. Para uma melhor distribuição de investimentos, em específico à região sertaneja, é necessário que o governo estadual desenvolva políticas públicas que incluam os municípios de fora da RMF, reconhecendo as suas características locais e os seus potenciais produtivos de energias renováveis, além de aproveitar as rotas logísticas, existente e previstas, para escoar os produtos destinados a exportação. Assim, será possível distribuir com maior equidade os ganhos gerados pela economia do hidrogênio verde a todo estado, gerando oportunidades para a economia local, além do desenvolvimento tecnológico e intelectual de todas regiões.

7 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O estado do Ceará possui várias macrorregiões que possuem características específicas, que podem contribuir para economia do hidrogênio verde. É preciso, contudo, verificar as políticas públicas e ações que estão sendo desenvolvidas a essas regiões para incluí-las no HUB do H₂. Outros fatores importantes a serem observados são os impactos socioambientais gerados pela implantação de usinas de produção de H₂V nessas regiões, visto que cada uma pode utilizar fontes renováveis distintas.

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se o estudo de promoção de justiça energética ao estado cearense utilizando energia solar fotovoltaico, os impactos socioeconômicos com a produção de H₂V à comunidades interioranas do estado, e oportunidades geradas pela economia do hidrogênio verde em comunidades sertanejas.

REFERÊNCIAS

ABE, J.O.; POPOOLA, A.P.I.; AJENIFUJA, E.; POPOOLA, O.M.. Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 44, n. 29, p. 15072-15086, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>.

ACHEAMPONG, Alex O.; OPOKU, Eric Evans Osei. Energy justice, democracy and deforestation. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 341, p. 118012, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118012>.

AIMIKHE, Victor Joseph; EYANKWARE, Oghenegare Emmanuel. Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: a mini review. **Journal Of Energy Research And Reviews**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 64-79, 24 abr. 2023. Sciencedomain International. <http://dx.doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i4272>.

AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R.. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 47, n. 57, p. 24136-24154, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>.

ALMEIDA, Maria Elenice Feitosa de; SABIÁ, Rodolfo José. HIDROGÊNIO VERDE E A SUSTENTABILIDADE DO PLANETA: POTENCIALIDADES NO CEARÁ.. In: . Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/sustentare-wipis-2023-311985/762439-HIDROGENIO-VERDE-E-A-SUSTENTABILIDADE-DO-PLANETA---POTENCIALIDADES-NO-CEARA>. Acesso em: 29/07/2024

AMIRTHAN, T.; PERERA, M.s.A.. The role of storage systems in hydrogen economy: a review. **Journal Of Natural Gas Science And Engineering**, [S.L.], v. 108, p. 104843, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104843>.

ARCOS, Jose M. Marín; SANTOS, Diogo M. F.. The Hydrogen Color Spectrum: techno-economic analysis of the available technologies for hydrogen production. **Gases**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 25-46, 3 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/gases3010002>.

BENGHANEM, Mohamed *et al.* Hydrogen Production Methods Based on Solar and Wind Energy: a review. **Energies**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 757, 9 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en16020757>.

BHOYAR, Anshul R.. The Hydrogen (Future and Perspective). **International Journal Of Advanced Research In Science, Communication And Technology**, [S.L.], p. 784-796, 28 ago. 2023. Naksh Solutions. <http://dx.doi.org/10.48175/ijarsct-12787>.

BORETTI, Alberto. A correct perspective for hydrogen from engineered diagenesis. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 48, n. 58, p. 21981-21984, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.102>.

BOUZAROVSKI, Stefan; SIMCOCK, Neil. Spatializing energy justice. **Energy Policy**, [S.L.], v. 107, p. 640-648, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.064>.

BRUSSO, Barry C.. Electrochemistry and the Development of the Hydrogen Fuel Cell [History]. **Ieee Industry Applications Magazine**, [S.L.], v. 27, n. 5, p. 8-13, set. 2021. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mias.2021.3086965>.

CADER, Justyna; KONECZNA, Renata; OLCZAK, Piotr. The Impact of Economic, Energy, and Environmental Factors on the Development of the Hydrogen Economy. **Energies**, [S.L.], v. 14, n. 16, p. 4811, 7 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14164811>.

CEARÁ. Joanna Cruz. Casa Civil. **Hub de Hidrogênio Verde: Governo do Ceará assina Memorandos de Entendimento com empresas a serem instaladas no Complexo do Pecém**. 2022. Disponível em: <https://www.casacivil.ce.gov.br/2022/05/02/hub-de-hidrogenio-verde-governo-do-ceara-assina-memorandos-de-entendimento-com-empresas-a-serem-instaladas-no-complexo-do-pecem/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

CEARÁ. **Lei nº 18.346, de 31 de maio de 2023**. Institui a Política Estadual do Hidrogênio Verde, Sustentável e seus Derivados. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 31 maio 2023. Disponível em: <<https://www.doe.ce.gov.br>>. Acesso em: 07 out. 2024.

CEARÁ. **Lei nº 18459, de 07 de setembro de 2023**. Institui A Política Estadual do Hidrogênio Verde, Sustentável e Seus Derivados no Âmbito do Estado do Ceará e Cria O Conselho Estadual de Governança e Desenvolvimento da Produção de Hidrogênio Verde, Sustentável e Seus Derivados. Fortaleza, CE, 11 set. 2023.

CHEW, Yick Eu; CHENG, Xin Hui; LOY, Adrian Chun Minh; HOW, Bing Shen; ANDIAPPAN, Viknesh. Beyond the Colours of Hydrogen: opportunities for process systems engineering in hydrogen economy. **Process Integration And Optimization For Sustainability**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 941-950, 15 mar. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41660-023-00324-z>.

DAWOOD, Furat; ANDA, Martin; SHAFIULLAH, G.M.. Hydrogen production for energy: an overview. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 45, n. 7, p. 3847-3869, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.

Dias, Diogo Lopes. **Hidrogênio**. 2019. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/hidrogenio.htm>. Acesso em: 15 fev. 2024.

DILLMAN, K.J.; HEINONEN, J.. A ‘just’ hydrogen economy: a normative energy justice assessment of the hydrogen economy. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 167, p. 112648, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112648>.

DO SACRAMENTO, E; A SALES,; DELIMA, L; VEZIROGLU, T. A solar–wind hydrogen energy system for the Ceará state – Brazil. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 33, n. 20, p. 5304-5311, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.032>.

ESTEVES, N.B.; SIGAL, A.; LEIVA, E.P.M.; RODRÍGUEZ, C.R.; CAVALCANTE, F.s.A.; LIMA, L.C. de. Wind and solar hydrogen for the potential production of ammonia in the state of Ceará – Brazil. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 40, n. 32, p. 9917-9923, ago. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.044>.

GUIMARÃES, Lanuzza. **Lei Estadual do Ceará institui a política do hidrogênio verde, sustentável e seus derivados.** 2023. Disponível em: <https://ramaral.com/ambiental/lei-estadual-do-ceara-institui-a-politica-do-hidrogenio-verde-sustentavel-e-seus-derivados/#:~:text=A%20lei%20estadual%20n%C2%BA%2018.459,diversifica%C3%A7%C3%A3o%20e%20amplia%C3%A7%C3%A3o%20da%20matriz>. Acesso em: 30 abr. 2024.

HAMED, Tareq A.; ALSHARE, Aiman. Environmental Impact of Solar and Wind energy- A Review. **Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 1-23, jun. 2022. SDEWES Centre. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0387>.

HEFFRON, Raphael J.; MCCAULEY, Darren. The concept of energy justice across the disciplines. **Energy Policy**, [S.L.], v. 105, p. 658-667, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.018>.

HUANG, Junbo; BALCOMBE, Paul; FENG, Zongxian. Technical and economic analysis of different colours of producing hydrogen in China. **Fuel**, [S.L.], v. 337, p. 127227, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127227>.

INCER-VALVERDE, Jimena; KORAYEM, Amira; TSATSARONIS, George; MOROSUK, Tatiana. “Colors” of hydrogen: definitions and carbon intensity. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 291, p. 117294, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>.

JENKINS, Kirsten e H; SOVACOOOL, Benjamin K; MOUTER, Niek; HACKING, Nick; BURNS, Mary-Kate; MCCAULEY, Darren. The methodologies, geographies, and technologies of energy justice: a systematic and comprehensive review. **Environmental Research Letters**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 043009, 30 mar. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd78c>.

KABIR, Ehsanul; KUMAR, Pawan; KUMAR, Sandeep; ADELODUN, Adedeji A.; KIM, Ki-Hyun. Solar energy: potential and future prospects. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 82, p. 894-900, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.

KAR, Sanjay Kumar; HARICHANDAN, Sidhartha; ROY, Biswajit. Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: an analysis of current findings and roadmap ahead. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 47, n. 20, p. 10803-10824, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.137>.

KUMAR, S. Shiva; LIM, Hankwon. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. **Energy Reports**, [S.L.], v. 8, p. 13793-13813, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.127>.

LABELLE, Michael Carnegie; BUCATă, Roxana; STOJILOVSKA, Ana. Radical energy justice: a green deal for romanian coal miners?. **Journal Of Environmental Policy & Planning**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 142-154, 22 out. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1523908x.2021.1992266>.

LAMPIS, Andrea *et al.* Justiça energética e geração distribuída fotovoltaica em São Paulo. In:

JACOBI, Pedro Roberto *et al* (org.). **Governança Ambiental na Macrometrópole face à Variabilidade Climática**. São Carlos: Rima, 2022. Cap. 19. p. 353-377. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.iee.usp.br/sites/default/files/anexo/publicacao//Governanca-Ambiental-na-Macrometropole-Paulista-Face-a-Variabilidade-Climatica.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos Naea**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 414-436, 27 abr. 2023. Universidade Federal do Para. <http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v26i1.12746>.

LIU, Zhibin; ZHAO, Chuankai; CAI, Longhao; LONG, Xinman. Steady state modelling of steam-gasification of biomass for H₂-rich syngas production. **Energy**, [S.L.], v. 238, p. 121616, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.121616>.

MAKA, Ali O M; ALABID, Jamal M. Solar energy technology and its roles in sustainable development. **Clean Energy**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 476-483, 1 jun. 2022. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/ce/zkac023>.

MORAES, Caio. **Uma Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos**. 2021. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/sistemas-fotovoltaicos/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

NASCIMENTO, Renan Loureiro Xavier *et al*. **CADERNO DE CARACTERIZAÇÃO ESTADO DO CEARÁ**. Brasília: Codevasf, 2022. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-do-rocha/publicacoes>. Acesso em: 29 jul. 2024.

NIKOLAIDIS, Pavlos; POULLIKKAS, Andreas. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 67, p. 597-611, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.

NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; HAFNER, Manfred. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 298, 31 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su13010298>.

OSSELIN, F.; SOULAINÉ, C.; FAUGUEROLLES, C.; GAUCHER, E. C.; SCAILLET, B.; PICHAVANT, M.. Orange hydrogen is the new green. **Nature Geoscience**, [S.L.], v. 15, n. 10, p. 765-769, out. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9>.

PANCHENKO, V.A.; DAUS, Yu.V.; KOVALEV, A.A.; YUDAEV, I.V.; LITTI, Yu.V.. Prospects for the production of green hydrogen: review of countries with high potential. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 48, n. 12, p. 4551-4571, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.084>.

PANIĆ, Ivan; CUCULIĆ, Aleksandar; ĆELIĆ, Jasmin. Color-Coded Hydrogen: production and storage in maritime sector. **Journal Of Marine Science And Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 1995, 14 dez. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse10121995>.

PATRÍCIO, R.A.; SALES, A.D.; SACRAMENTO, E.M.; LIMA, L.C. de; VEZIROGLU, T.N..

Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará – Brazil. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 37, n. 9, p. 7355-7364, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.146>.

PETRY, Paola Mercadante; RAMOS, Karina Ninni; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros. A EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E O DESENVOLVIMENTO LOCAL: uma proposição de abordagem. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 9, p. 22, 29 maio 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202022-43>.

PROHASKA, Thomas; IRRGEHER, Johanna; BENEFIELD, Jacqueline; BÖHLKE, John K.; CHESSON, Lesley A.; COPLEN, Tyler B.; DING, Tiping; DUNN, Philip J. H.; GRÖNING, Manfred; HOLDEN, Norman E.. Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report). **Pure And Applied Chemistry**, [S.L.], v. 94, n. 5, p. 573-600, 1 maio 2022. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/pac-2019-0603>.

QI, Z. Hydrogen H₂. **Proton Exchange Membrane Fuel Cells**, [S.L.], p. 145-182, 16 dez. 2013. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/b15499-11>.

QIAN, Yu; XU, Zeshui; GOU, Xunjie; IKARE, Marinko. A survey on energy justice: a critical review of the literature. **Economic Research-Ekonomiska Istraživanja**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 1-30, 22 dez. 2022. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1331677x.2022.2155860>.

RABAIA, Malek Kamal Hussien; ABDELKAREEM, Mohammad Ali; SAYED, Enas Taha; ELSAID, Khaled; CHAE, Kyu-Jung; WILBERFORCE, Tabbi; OLABI, A.G.. Environmental impacts of solar energy systems: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 754, p. 141989, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>.

RIBAS, Vinicius Eduardo; SIMÕES, André Felipe. (In)Justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do brasil. **Revista Brasileira de Energia**, [S.L.], v. 26, n. 4, p. 51-62, 16 dez. 2020. Revista Brasileira de Energia. <http://dx.doi.org/10.47168/rbe.v26i4.580>.

SACRAMENTO, E.M. do; CARVALHO, Paulo C.M.; LIMA, L.C. de; VEZIROGLU, T.N.. Feasibility study for the transition towards a hydrogen economy: a case study in brazil. **Energy Policy**, [S.L.], v. 62, p. 3-9, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.071>.

SCHLOSBERG, David (2007). *Defining Environmental Justice: Theories, Movements, and Nature*. Oxford University Press UK.

SQUADRITO, Gaetano; MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino. The green hydrogen revolution. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 216, p. 119041, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2023.119041>.

STALKER, Linda; TALUKDER, Asrar; STRAND, Julian; JOSH, Matthew; FAIZ, Mohinudeen. Gold (hydrogen) rush: risks and uncertainties in exploring for naturally occurring hydrogen. **The Appea Journal**, [S.L.], v. 62, n. 1, p. 361-380, 13 maio 2022. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/aj21130>.

SUN, Yunpeng; WANG, Jin; WANG, Xiuhui; WEI, Xinyu. Achieving energy justice and common prosperity through green energy resources. **Resources Policy**, [S.L.], v. 81, p. 103427, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103427>.

VAN UFFELEN, Nynke. Revisiting recognition in energy justice. **Energy Research & Social Science**, [S.L.], v. 92, p. 102764, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2022.102764>.

VERFONDERN, Karl. Hydrogen fundamentals. **Hydrogen Safety For Energy Applications**, [S.L.], p. 1-23, 2022. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-820492-4.00001-4>.

YAP, Jiazhen; MCLELLAN, Benjamin. A Historical Analysis of Hydrogen Economy Research, Development, and Expectations, 1972 to 2020. **Environments**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 11, 6 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/environments10010011>.

YU, Minli; WANG, Ke; VREDENBURG, Harrie. Insights into low-carbon hydrogen production methods: green, blue and aqua hydrogen. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 46, n. 41, p. 21261-21273, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.016>.

ANEXO A

Características técnicas dos painéis

Fabricante	JA SOLAR
Modelo	JAM72S09-390/PR
Potência nominal – Pn [W]	390 W
Tensão de circuito aberto – Voc [V]	49,35 V
Corrente de curto circuito – Isc [A]	10,22 A
Tensão de máxima potência – Vpmp [V]	40,21 V
Corrente de máxima potência – Ipmp [A]	9,70 A
Eficiência [%]	19,8%
Comprimento [m]	996 mm
Largura [m]	1979 mm
Peso [kg]	22,3 kg
Quantidade	143
Potência do gerador [kWp]	55,77

Fonte: Orrico (2020).

Características técnicas do inversor

Fabricante	GoodWe	GoodWe
Modelo	GW15KN-MT	GW30K-MT
Quantidade	1	1
Entrada		
Potência nominal – Pn [kW]	15 kW	30 kW
Máxima potência na entrada CC – Pmax-cc [kW]	19,5 kW	39 kW
Máxima tensão CC – Vcc-máx [V]	1100 V	1100 V
Máxima corrente CC – Icc-máx [A]	22/11	31,3/31,3/31,3
Máxima tensão MPPT – Vpmp-máx [V]	850 V	860 V
Mínima tensão MPPT – Vpmp-min [V]	480 V	470 V
Tensão CC de partida – Vcc-part [V]	180 V	180 V
Quantidade de Strings/MPPT	2/1	2/2/2
Quantidade de entradas MPPT	2	3
Saída		
Potência nominal CA – Pca [kW]	15 kW	30 kW
Máxima potência na saída CA – Pca-máx [kW]	16,5 kW	33 kW
Máxima corrente na saída CA – Imáx-ca [A]	24 A	48 A
Tensão nominal CA – Vnon-ca [V]	380 V	380 V
Frequência nominal – Fn [Hz]	60 Hz	60Hz
Máxima tensão CA – Vca-máx [V]	380	400
Mínima tensão CA – Vca-min [V]	380	380
THD de corrente [%]	<2%	<3%
Fator de potência	1	1
Tipo de conexão – número de fases + neutro + terra	Trifásico (3 ϕ /N/ PE)	Trifásico (3 ϕ /N/ PE)
Eficiência máxima [%]	98,3%	98,8%

Fonte: Orrico (2020).

Total solar radiation sensor



Technical parameters

Spectral range: 0.3~3 μ m

Measuring range: ■ 0~2000W/m²

Accuracy: $\pm 5\%$ (0~1500W/m²), $\pm 10\%$ (1500~2000W/m²)

Resolution ratio: 1W/m²

Power supply: ■ DC 12V

Output in the form: ■ RS485

Instrument line length: ■ Standard: 2.5 meters

Load capacity: current type $RL \leq 250\Omega$

voltage type $RL \geq 1K\Omega$

Response time: <45s

Temperature characteristics: < $\pm 0.08\%$ °C

Cosine response: < $\pm 10\%$ (solar elevation angle of 10°)

Non-linear : < $\pm 2\%$

Annual gradient: < $\pm 2\%$

Work environment: Temperature -50°C~85°C

humidity $\leq 100\%RH$

Weight: sensor 420 g.

Fonte: Orrico (2020).

Atmospheric temperature sensor



Technical parameters

Measuring range: $-50 \sim 100^{\circ}\text{C}$

Accuracy: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Resolution ratio: 0.1°C

Power supply: ■ DC 12V

Output in the form: ■ RS485

Load capacity: current type $R_L \leq 300\Omega$

voltage type $R_L \geq 1\text{K}\Omega$

Work environment: Temperature $-50^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$

humidity $\leq 100\%RH$

Fonte: Orrico (2020).

Patch temperature sensor



Technical parameters

Measuring range: ■ -50 ~ 100 °C

Accuracy: ±0.5 °C

Resolution ratio: 0.1 °C

Power supply: ■ DC 12V

Output in the form: ■ RS485

Instrument line length: ■ Standard: 5 meters

Load capacity: current type $RL \leq 250 \Omega$

voltage type $RL \geq 1K \Omega$

Working temperature: - 50 °C ~ 80 °C

Relative humidity: 0 ~ 100%

Product weight: 125g probe

Product power consumption: 0.24mW

Fonte: Orrico (2020).

APÊNDICE A

Empresa	Data de assinatura	Fonte
Enegix Energy	19/02/2021	https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/outras-fontes/enegix-energy-assina-memorando-com-governo-do-ceara-para-construir-maior-planta-de-hidrogenio-verde-do-mundo
White Martins/Linde	29/10/2021	https://focus.jor.br/ceara-assina-memorando-para-producao-de-hidrogenio-verde-com-linde-white-martins/
Qair	06/07/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/07/06/governo-do-ceara-e-qair-brasil-assinam-acordo-para-desenvolvimento-de-projetos-de-energias-renovaveis-com-investimento-de-us-695-bilhoes-e-geracao-de-2-600-empregos/
Fortescue (Pré-contrato)	07/07/2021	https://parquetecnologico.ufc.br/pt/ufc-participa-da-assinatura-de-memorando-entre-governo-do-ceara-e-fortescue-future-para-implantacao-de-usina-de-h2v/
Eneva	13/10/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/10/13/novos-memorandos-de-entendimento-fortalecem-o-hub-do-hidrogenio-verde-no-ceara/
Diferencial	13/10/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/10/13/novos-memorandos-de-entendimento-fortalecem-o-hub-do-hidrogenio-verde-no-ceara/
Hytron	13/10/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/10/13/novos-memorandos-de-entendimento-fortalecem-o-hub-do-hidrogenio-verde-no-ceara/
H2helium	13/10/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/10/13/novos-memorandos-de-entendimento-fortalecem-o-hub-do-hidrogenio-verde-no-ceara/
Neoenergia	20/09/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/09/20/governo-do-ceara-e-neoenergia-assinam-memorando-para-projeto-de-transporte-publico-movido-a-hidrogenio-verde/
Engie	15/10/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/10/15/governo-do-ceara-assina-decimo-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-verde/
Transhydrogen Alliance	27/10/2021	https://www.adece.ce.gov.br/2021/10/27/hidrogenio-verde-em-roterda-governo-do-ceara-assina-memorando-que-preve-investimento-de-2-bilhoes-de-dolares/
Total Eren	08/12/2021	https://megawhat.energy/economia-e-politica/empresas/ceara-assina-acordo-com-totaleren-para-hub-de-hidrogenio-verde-no-porto-de-pecem/
AES Brasil (Pré-contrato)	13/12/2021	https://www.ceara.gov.br/2021/12/13/hub-do-hidrogenio-verde-com-14-memorando-de-entendimento-assinado-ceara-amplia-a-capacidade-de-producao-do-combustivel-do-futuro/
Cactus Energia Verde (Pré-contrato)	07/02/2022	https://www.adece.ce.gov.br/2022/02/08/hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-do-memorando-de-entendimento-entre-governo-do-ceara-e-cactus-energia-verde/
Casa dos Ventos (Pré-contrato)	07/02/2022	https://www.adece.ce.gov.br/2022/02/08/hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-do-memorando-de-entendimento-entre-governo-do-ceara-e-cactus-energia-verde/
H2 Green Power	17/03/2022	https://www.ceara.gov.br/2022/03/17/hub-de-h2v-governo-do-ceara-assina-mais-um-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-
Comerc Eficiência	07/02/2022	https://www.adece.ce.gov.br/2022/02/08/hub-do-hidrogenio-verde-avanca-com-assinatura-do-memorando-de-entendimento-entre-governo-do-ceara-e-cactus-energia-verde/

Enel Green Power	14/07/2022	https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2022/07/14/governo-do-ceara-assina-o-19-memorando-para-producao-de-hidrogenio-verde.html
HDF Energy	04/08/2022	https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2022/08/04/ceara-assina-20-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-verde.html
Mitsui	29/08/2022	https://www.ufc.br/noticias/noticias-de-2022/17173-ufc-prestigia-assinatura-de-memorando-entre-estado-e-as-empresas-mitsui-co-e-abb-investimentos-fomentarao-novo-hub
ABB	29/08/2022	https://www.ufc.br/noticias/noticias-de-2022/17173-ufc-prestigia-assinatura-de-memorando-entre-estado-e-as-empresas-mitsui-co-e-abb-investimentos-fomentarao-novo-hub
Gold Wind	26/10/2022	https://www.ceara.gov.br/2022/10/26/governo-do-ceara-chega-a-24-memorandos-de-entendimento-assinados-sobre-energia-renovavel/
Alupar	26/10/2022	https://www.ceara.gov.br/2022/10/26/governo-do-ceara-chega-a-24-memorandos-de-entendimento-assinados-sobre-energia-renovavel/
Mingyang Smart Energy	14/04/2023	https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/lista-de-atos-assinados-por-governos-estaduais-fiocruz-e-vale-por-ocasio-da-visita-do-presidente-luiz-inacio-lula-da-silva-a-republica-popular-da-china
Spic	14/04/2023	https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/lista-de-atos-assinados-por-governos-estaduais-fiocruz-e-vale-por-ocasio-da-visita-do-presidente-luiz-inacio-lula-da-silva-a-republica-popular-da-china
Gansu Science & Technology Investment	14/04/2023	https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/lista-de-atos-assinados-por-governos-estaduais-fiocruz-e-vale-por-ocasio-da-visita-do-presidente-luiz-inacio-lula-da-silva-a-republica-popular-da-china
PowerChina	08/05/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/05/09/visando-construcao-de-parque-solar-de-r-18-bilhao-em-mauriti-governo-do-ceara-assina-memorando-de-entendimento-com-grupo-chines/
Platform Zero	08/05/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/05/09/visando-construcao-de-parque-solar-de-r-18-bilhao-em-mauriti-governo-do-ceara-assina-memorando-de-entendimento-com-grupo-chines/
Green Hydrogen Corridor	08/05/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/05/09/visando-construcao-de-parque-solar-de-r-18-bilhao-em-mauriti-governo-do-ceara-assina-memorando-de-entendimento-com-grupo-chines/
Voltalia	11/05/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/05/11/governo-do-ceara-e-voltalia-fazem-acordo-para-desenvolver-projeto-de-hidrogenio-verde/
Lightsource bp	27/06/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/06/27/governo-do-ceara-assina-memorando-de-entendimento-com-a-lightsource-bp-para-desenvolvimento-de-energias-
EDF Renewables	16/08/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/08/16/governo-do-ceara-assina-32o-memorando-para-producao-de-h2v-com-empresa-lider-global-de-energia-renovavel/
GoVerde	06/10/2023	https://www.ceara.gov.br/2023/10/06/governo-do-ceara-e-goverde-assinam-memorando-visando-producao-de-energia-e-amonia-verde-no-porto-do-pecem/
Hitachi	26/10/2023	https://www.sde.ce.gov.br/2023/10/26/governo-do-ceara-assina-memorando-com-empresa-hitachi-para-fornecimento-de-equipamentos-para-energia-renovavel/

Jepri	24/11/2023	https://www.seinfra.ce.gov.br/2023/11/25/hidrogenio-verde-governo-do-ceara-e-grupo-jepri-assinam-memorando-com-projecao-de-cerca-de-e-33-bilhoes-em-investimento/
BP	16/01/2024	https://www.ceara.gov.br/2024/01/16/governo-do-ceara-e-multinacional-bp-assinam-memorando-para-producao-de-hidrogenio-verde-e-derivados-no-complexo-do-
Eletrobras	14/05/2024	https://www.semace.ce.gov.br/2024/05/14/em-roterda-governador-do-ceara-assina-memorando-com-eletrobras-para-producao-de-hidrogenio-verde-no-complexo-do-

Fonte: Autor (2024)