

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOSÉ GUSTAVO DOS SANTOS GREVE

**PERSPECTIVAS PARA A EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE
NO BRASIL**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOSÉ GUSTAVO DOS SANTOS GREVE

**PERSPECTIVAS PARA A EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE
NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro(a) Eletricista.

Orientador:
Prof. Pedro César Cordeiro Vieira, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Greve, José Gustavo
Perspectivas para a exploração do hidrogênio verde
no Brasil / José Gustavo Greve; orientação de Pedro Vieira.
- Florianópolis, SC, 2023.
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de
Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de
Eletrotécnica.
Inclui Referências.

1. Hidrogênio verde. 2. Sustentabilidade. 3. Brasil.
I. Vieira, Pedro. II. Instituto Federal de Santa Catarina.
III. Perspectivas para a exploração do hidrogênio verde no
Brasil.

PERSPECTIVAS PARA A EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

JOSÉ GUSTAVO DOS SANTOS GREVE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de julho, 2023.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

PEDRO CESAR CORDEIRO VIEIRA

Data: 25/07/2023 17:15:57-0300

CPF: 009.885.869-67

Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Pedro César Cordeiro Vieira, Dr. Eng.



Documento assinado digitalmente

ANESIO FELIPE ZEITUNE

Data: 25/07/2023 13:42:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Anésio Felipe Zeitune, Dr. Eng.



Documento assinado digitalmente

RUBIPIARA CAVALCANTE FERNANDES

Data: 25/07/2023 16:00:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rubipiara Cavalcante Fernandes, Dr. Eng.

"O conhecimento é a única mercadoria que quando dividimos, nos tornamos mais ricos." - Daniel Webster.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por me ensinarem valores como perseverança, dedicação e responsabilidade que foram fundamentais neste processo. A toda a minha família por todo apoio, torcida e estímulo.

À minha namorada Beatriz, por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, pela força, carinho e compreensão.

Ao meu professor orientador Pedro, pela atenção, paciência, conhecimento e preciosas contribuições que qualificaram este trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, pela compreensão dos momentos em que precisei ausentar para dedicar-me aos estudos.

Aos colegas de turma, pelos ensinamentos trocados e trabalho em grupo que tornaram o aprendizado mais rico.

A todos vocês que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho, minha sincera gratidão.

RESUMO

Analizando as condições climáticas nos últimos anos, observa-se o aumento da temperatura da Terra (aquecimento global), que trazem grandes consequências como: secas, escassez de água, incêndios, inundações, dentre outras. A maior parte da energia produzida atualmente advém de combustíveis fósseis que são processados e queimados, e que liberam dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e outros gases nocivos à atmosfera, que contribuem para o efeito estufa. Em 2015, diversos países assinaram o Acordo de Paris, que tem como um dos objetivos reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Com isso, os diversos países signatários estão em busca de soluções para reduzir a emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Neste cenário, uma das alternativas sustentáveis é o uso de hidrogênio verde como fonte de energia, que é gerado por energia renovável, de baixa emissão de dióxido de carbono e com diversas outras aplicações. O presente trabalho, apresenta uma análise do hidrogênio verde através da cadeia de produção, armazenamento, distribuição e utilização, visando o cenário brasileiro. A finalidade desta análise é desmistificar as informações sobre o hidrogênio verde e seu potencial de utilização para o Brasil.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Combustíveis Fósseis. Sustentabilidade. Brasil.

ABSTRACT

Analyzing the climatic conditions in recent years, there is an increase in the Earth's temperature (global warming), which has major consequences such as: droughts, water shortages, forest fires, floods, among others. Most of the energy currently produced comes from fossil fuels that are processed and burned, which releases the emission of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and other harmful gases into the atmosphere, which contribute to the greenhouse effect. In 2015, several countries signed the Paris Agreement, which has as one of its objectives to reduce the emission of greenhouse gases. As a result, the various signatory countries are looking for solutions to reduce the emission of carbon dioxide in the atmosphere. In this scenario, one of the sustainable alternatives is the use of green hydrogen as a source of energy, which is generated by renewable energy, low carbon dioxide emissions and with several other applications. The present work presents an analysis of green hydrogen through the chain of production, storage, distribution and use, aiming at the Brazilian scenario. The purpose of this analysis is to demystify information about green hydrogen and its potential use in Brazil.

Keywords: Green Hydrogen. Fossil Fuels. Sustainability. Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2023.....	18
Figura 2 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio	20
Figura 3 – Faixas de custos da produção de hidrogênio	21
Figura 4 – Representação esquemática dos processos tecnológicos para obtenção de hidrogênio	27
Figura 5 – Processo de eletrólise	28
Figura 6 – Principais benefícios da descarbonização e eletrificação da economia ...	31
Figura 7 – Base da transição energética.....	33
Figura 8 – Fontes Primárias de Hidrogênio Verde	36
Figura 9 – Processos de produção de hidrogênio a partir do etanol	36
Figura 10 – Processos de produção de hidrogênio a partir da biomassa.....	40
Figura 11 – Processo de Pirólise da Biomassa	41
Figura 12 – Estágios do hidrogênio: produção, armazenamento, abastecimento e consumo	43
Figura 13 – Sistema convencional de produção de hidrogênio a partir de Geração Fotovoltaica	46
Figura 14 – Processos de produção de hidrogênio a partir do Biogás	48
Figura 15 – Processo de reforma a vapor	49
Figura 16 – Métodos de armazenamento de Hidrogênio	58
Figura 17 – Principais iniciativas brasileiras sobre hidrogênio	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de células a combustível.....	25
Tabela 2 – Classificação do hidrogênio a partir da tecnologia de produção	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BNEF – *Bloomberg New Energy Finance*

C₂H₅OH – Etanol

CaCs – Células a Combustível

CAPEX – *Capital Expenditure*

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CCS – *Carbon capture and storage*

CCUS – *Carbon Capture and Utilization*

CDE – Conta de Desenvolvimento Energético

CEMIG – Companhia Energética de Minas de Gerais

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CH₄ – Metano

CIPP – Complexo Industrial e Portuário do Pecém

CNI – Confederação Nacional de Indústria

CNPE – Conselho Nacional de Pesquisa Energética

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

EER – Encargo de Energia de Reserva

EMTU – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESS – Encargos de Serviços do Sistema

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FIEC – Federação das Indústrias do Estado do Ceará

GEE – Gases de Efeito Estufa

GEF – *Global Environment Facilities*

H₂O – Água

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

IEA – *International Energy Agency*

IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

IPHE – Parceria Internacional para Hidrogênio e Células de Combustível na Economia

I-REC – *International Rec Standard*

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional

MME – Ministério de Minas e Energia

MoU – Memorando de Entendimento

NaAlH₄ – Alanato de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

NECAR – Novo Carro Elétrico

OPEX – *Operational Expenditure*

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

PLD – Preço de Liquidação de Diferenças

PNH₂ – Programa Nacional do Hidrogênio

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

ProCaC – Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Célula a Combustível

ProH₂ – Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio

Proinfa – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*

SPE – Sociedade de Propósito Específico

TUST – Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Transmissão

UFC – Universidade Federal do Ceará

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Justificativa	17
1.2	Definição do Problema	19
1.3	Objetivo Geral.....	22
1.4	Objetivos Específicos.....	22
1.5	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1	Aspectos Gerais do Uso de Hidrogênio Verde.....	24
2.2	Processos de Produção e Cores de Hidrogênio	26
2.3	Benefícios do Uso de Hidrogênio Verde	31
2.4	Hidrogênio Verde e Transição Energética	32
3	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	34
4	ANÁLISE DE POTENCIAL DE EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL	35
4.1	Fontes de Produção de Hidrogênio Verde no Brasil	35
4.1.1	Etanol.....	36
4.1.2	A partir de Biomassa.....	39
4.1.3	A partir de Geração Eólica	43
4.1.4	A partir de Geração Solar Fotovoltaica	46
4.1.5	A partir de Biogás.....	47
4.2	Hidrogênio Verde a partir de Autoprodução.....	51
4.2.1	Vantagens da autoprodução de hidrogênio verde.....	52
4.2.2	Regulamentação da Autoprodução	53
4.2.3	Custos de Autoprodução de Hidrogênio Verde	54
4.3	Armazenamento e Transporte.....	57
4.3.1	Armazenamento de hidrogênio em hidretos metálicos	59
4.3.2	Armazenamento e transporte de hidrogênio comprimido.....	61
4.3.3	Armazenamento e transporte de hidrogênio liquefeito.....	63
4.3.4	Transporte de hidrogênio por amônia	64
4.4	Utilização	65
4.4.1	Setor de Transportes	65
4.4.2	Geração de Energia	67
4.4.3	Exportação	69
4.4.4	Fertilizantes.....	70
4.5	Regulamentação e Discussões em Andamento	72
4.6	Iniciativas e Cenário Atual no Brasil	74
4.6.1	Programa Nacional do Hidrogênio	77
4.7	Desafios	79
4.7.1	Desafios relacionados ao preço	79
4.7.2	Desafios relacionados à distribuição e ao armazenamento:	80
4.7.3	Desafios relacionados aos transportes:	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Fundação Getúlio Vargas (FGV) (2020), a utilização da energia proveniente da queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral, gás natural e o petróleo, emite gases de efeito estufa (GEE), que estão relacionados às queimadas e desmatamentos, sendo um fator preocupante para o meio ambiente. Diante disso, tem-se crescido a exploração de fontes renováveis alternativas para fins energéticos. Recentemente, o hidrogênio verde vem ganhando espaço, gerado a partir de fontes renováveis (ex.: solar e eólica), especialmente via eletrólise da água (FGV, 2020). Conforme a SHELL (2017), o processo da eletrólise da água é o método que utiliza a corrente elétrica para separar o hidrogênio do oxigênio existente na água e, como essa eletricidade foi proveniente de fontes renováveis, então será produzido energia sem emissão de dióxido de carbono (CO₂) no meio ambiente (SHELL, 2017).

A exploração do Hidrogênio verde tem como objetivo reduzir a emissão de dióxido de carbono no meio ambiente e recebeu um impulso com o início do acordo de Paris em 2015, que trata de reduzir os impactos ambientais no planeta Terra (BRASIL, 2015). De acordo com a Confederação Nacional de Indústria (CNI), o hidrogênio verde é considerado um processo de produção de energia sem emissão de GEE. O hidrogênio já é relevante em termos econômicos atualmente, e sobre esse aspecto, o crescimento é impulsionado pela visão de governos e empresas de usar hidrogênio como necessário para viabilizar a descarbonização profunda da economia mundial, requerida para a consecução das metas do Acordo de Paris no horizonte 2050 (EPE, 2021a).

Segundo Saraiva Panik (2021):

Para atingir o objetivo do Acordo de Paris (manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C), será necessário descarbonizar grande parte do sistema energético mundial.

Para tanto, uma quantidade significativa de fontes renováveis de energia precisa ser instalada e integrada, e setores que demandam energia, como o transporte e a indústria, precisam ser descarbonizados em grande escala (SARAIVA PANIK, 2021, p. 1)

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2021a), através da Resolução do Conselho Nacional de Pesquisa Energética (CNPE) nº 06/2021 (MME,

2021b), onde são descritas as propostas de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, o Art. 1º da Resolução descreve as diretrizes como:

Art. 1º Determinar ao Ministério de Minas e Energia que, no prazo de até sessenta dias, contados da publicação desta Resolução, em cooperação com os Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovações e Desenvolvimento Regional, com o apoio técnico da Empresa de Pesquisa Energética - EPE, apresente a este Conselho proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio, observados:

I - o interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas;
II - a inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética;

III - a importância do hidrogênio como vetor energético que, combinado a outras soluções, tem potencial para contribuir globalmente para uma matriz energética de baixo carbono;

IV - o interesse na cooperação internacional para o desenvolvimento tecnológico e de mercado para produção e uso energético do hidrogênio;

V - a diversidade de fontes energéticas disponíveis no País para a produção de hidrogênio;

VI - as tecnologias associadas a esse vetor energético já desenvolvidas e em desenvolvimento no País;

VII - a diversidade de aplicações do hidrogênio na economia;

VIII - o potencial de demanda interna e para exportação de hidrogênio no contexto de transição energética; e

IX - a liderança do Brasil no tema "Transição Energética" no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia. (MME, 2021b. p.1).

Diante do contexto energético e ambiental atual, o hidrogênio verde surge como um vetor energético promissor, capaz de ser armazenado, gerar eletricidade e calor, participar de diversas cadeias industriais e proporcionar neutralidade no cenário de aquecimento global. Nesse sentido, o hidrogênio verde pode desempenhar um papel importante para garantir a segurança energética e acelerar mudanças transformadoras em muitos setores, reduzindo drasticamente as emissões de carbono por meio da substituição de combustíveis fósseis em atividades tradicionalmente grandes emissoras de gases de efeito estufa, como transporte pesado e indústria petroquímica. Além disso, a ampla gama de tecnologias e processos de produção de hidrogênio permite a adequação deles para seu uso final, permitindo que cada país explore seu potencial na seleção da melhor opção técnica, econômica e ambiental para produzi-lo (IRENA, 2020; ACAR; DINCER, 2019).

No que diz respeito à segurança energética, observa-se que a capacidade de obter hidrogênio de múltiplas fontes, juntamente com a variedade de tecnologias de produção associadas, permite que cada país aproveite suas próprias fontes locais e potencial para selecionar a melhor opção técnica, econômica e ambiental de produção, diminuindo ou eliminando a dependência da importação de energia (CGEE, 2010).

A exploração do hidrogênio verde no Brasil é motivada por diversos fatores que tornam o país propício ao desenvolvimento dessa tecnologia. Primeiramente, o Brasil possui um vasto potencial para geração de energia renovável, incluindo fontes solar, eólica, biomassa, biogás e etanol. O Brasil dispõe de grandes quantidades de energia renovável que podem ser usadas estrategicamente para produzir hidrogênio verde por meio de processos como a eletrólise da água, que usa energia renovável para separar a água em hidrogênio e oxigênio (OLIVEIRA, 2022).

Dessa forma, é esperado que a relevância do hidrogênio cresça cada vez mais à medida que as tecnologias relacionadas ao seu uso auxiliem na estabilização da geração de energia, possibilitando uma utilização mais eficiente de ativos de geração renováveis (PANDEV et al., 2017).

Este trabalho visa analisar o potencial de exploração do hidrogênio verde no Brasil. Serão abordadas as possibilidades de produção de hidrogênio verde a partir das diversas fontes renováveis disponíveis no país, os meios de armazenamento e transporte deste combustível, as formas de utilização em setores como transporte, geração de energia e indústria, as iniciativas governamentais para fomento deste mercado, o panorama regulatório e as discussões em andamento, além dos desafios a serem superados.

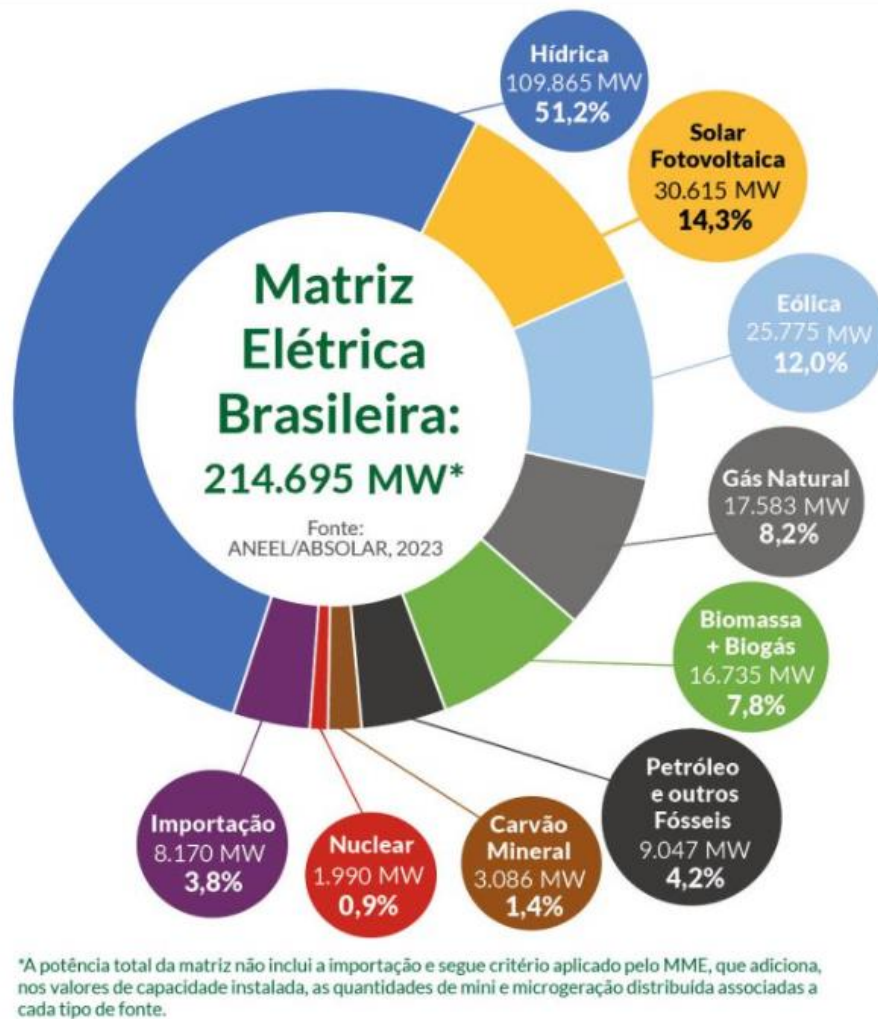
1.1 Justificativa

De acordo com o CNI (2022), o Brasil está em evidência no cenário internacional com relação à produção de energia a partir de fontes renováveis, visto que o país está bem localizado e tem grande capacidade na geração de energia eólica e solar, além de apresentar grande potencial na produção de hidrogênio verde. Para a produção de hidrogênio verde, o custo de energia corresponde de 70% a 80% do

custo total e, neste sentido, o Brasil apresenta um dos custos mais baixos na geração de energia renovável no mundo (CNI, 2022).

Segundo ANEEL/ABSOLAR (2023), as fontes de energia primária renováveis representam em torno de 85% da matriz elétrica brasileira em 2023, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2023



Fonte: ANEEL/ABSOLAR (2023).

Segundo MME (2021a):

No contexto internacional, para desenvolver uma economia do hidrogênio, cada País busca definir uma estratégia nacional que seja adequada à sua realidade, seus interesses e suas vantagens competitivas. Assim, há Países que decidem se concentrar em rotas tecnológicas específicas, nas quais dispõem de adequada base de fonte primária (matéria-prima ou recursos) e vantagens na capacitação tecnológica, bem como priorizar o

desenvolvimento de alguns segmentos de mercados que lhes tragam outras vantagens e benefícios. Muitas vezes, essa escolha consegue, ainda, reduzir sua dependência de petróleo e gás natural e/ou inseri-los em um potencial elo da cadeia global de valor do hidrogênio: fornecedor de equipamentos ou serviços tecnológicos, fornecedor de commodity, fornecedor de infraestrutura e/ou logística (dutos, vasos, embarcações, serviços de engenharia) etc. (MME, 2021a, p. 9).

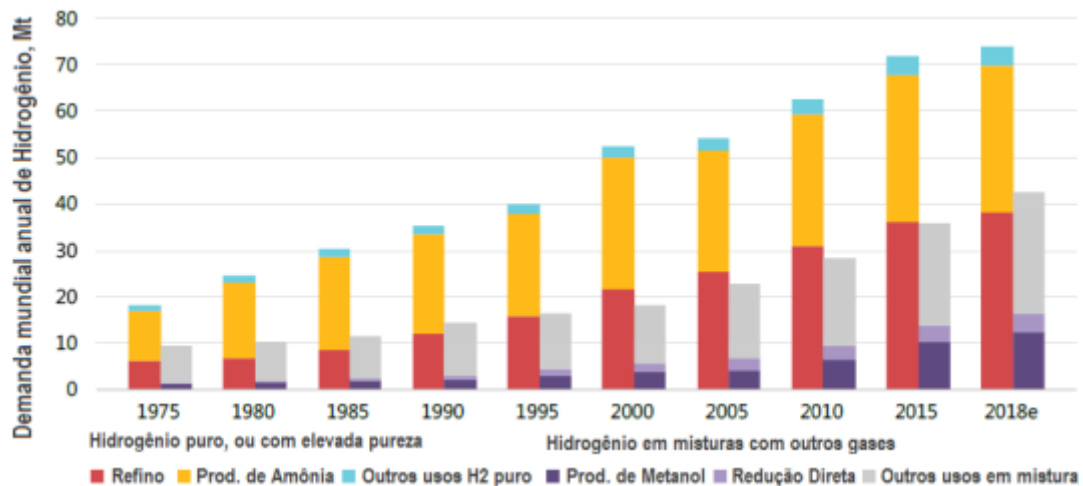
A produção de energia e produtos com baixa emissão de dióxido de carbono em todo o seu ciclo produtivo, tornou-se relevante diante da ampliação das questões ambientais decorrentes das mudanças climáticas em todo o mundo. A atual base energética da economia global advém de fontes não renováveis, fortemente dependentes de processos industriais que emitem grandes quantidades dióxido de carbono, como por exemplo: a produção de eletricidade, derivados de petróleo, transporte e produção de alumínio e cimento. Neste contexto, o uso do hidrogênio verde aparece como uma boa resposta para estes problemas dado que tem grande potencial de reduzir as emissões de dióxido de carbono, podendo ser utilizado em diversos setores industriais, tornando-se um importante vetor para a descarbonização energética (IEA, 2020a).

1.2 Definição do Problema

Segundo a EPE (2021), em 2018 ocorreu uma demanda mundial de hidrogênio de aproximadamente 115 Mt, dos quais 73 Mt referem-se apenas ao hidrogênio puro. As atividades de mercado que mais demandam o hidrogênio puro são o refino de petróleo e a produção de fertilizantes ricos em amônia, porém outras atividades do mercado mundial necessitam do hidrogênio misturado a outros gases, como a produção de metanol.

Na Figura 2 é apresentada a evolução da demanda mundial por hidrogênio, dividida por aplicação, do hidrogênio puro e com outros gases (EPE, 2021a).

Figura 2 – Evolução da demanda mundial por hidrogênio



Fonte: EPE (2021).

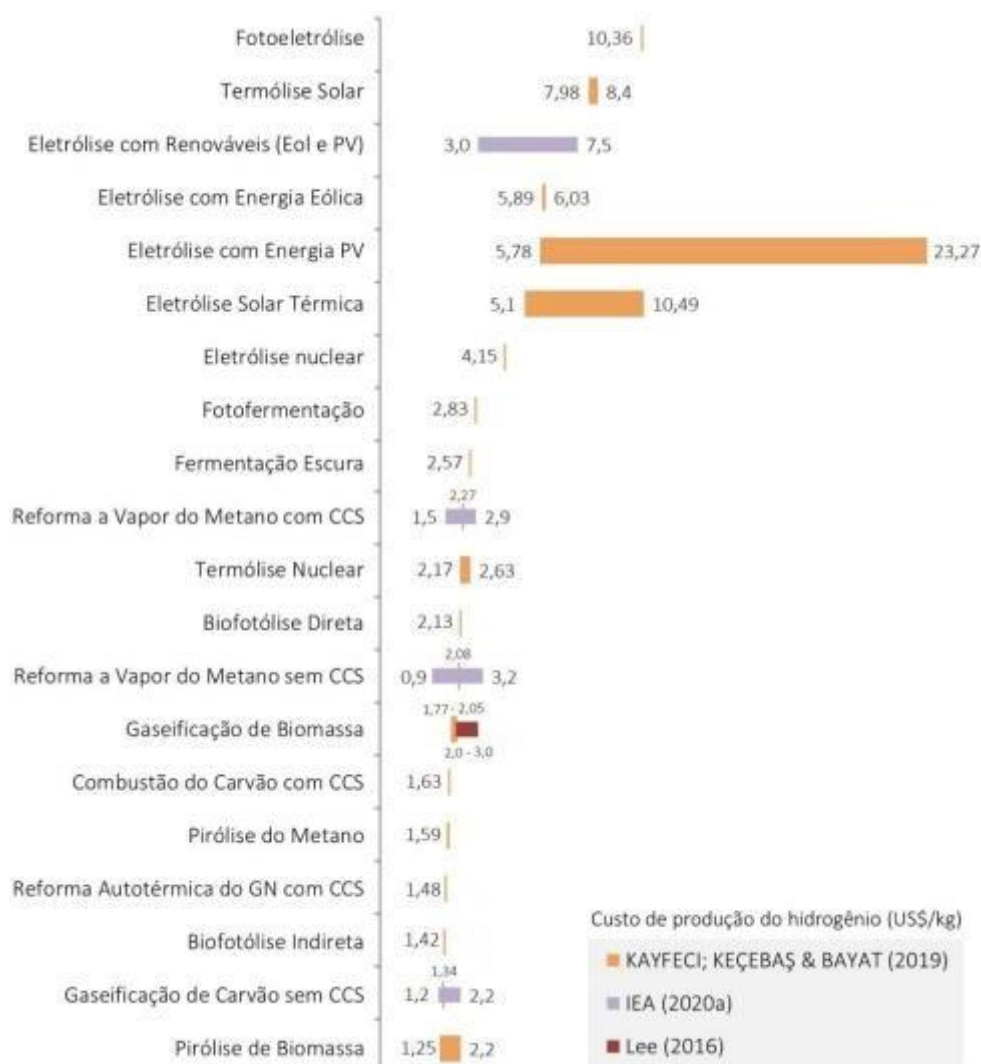
Observa-se que ocorre um crescimento considerável na demanda por hidrogênio no mercado mundial com o passar dos anos, sendo uma parte significativa destinada para o refino do petróleo e a produção de amônia. (EPE, 2021a).

De acordo com EPE (2021), referente ao custo de produção:

De fato, os menores custos de produção de hidrogênio, atualmente, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão, as quais consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. A eletrólise da água usando fontes renováveis (eólica e solar) é, em geral, a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado (EPE, 2021a, p. 29)

Na Figura 3 são indicadas as faixas de custo de produção de hidrogênio por tipos de processos de produção.

Figura 3 – Faixas de custos da produção de hidrogênio



Fonte: EPE (2021).

A *Bloomberg New Energy Finance* (BNEF), realizou uma projeção de reduções de custos para a produção de hidrogênio de fontes renováveis, e estima-se que a eletrólise a partir de energia fotovoltaica deverá se tornar mais competitiva até 2030, ampliando sua vantagem sobre o hidrogênio de fontes fósseis até 2050 (BNEF, 2020).

O levantamento da BNEF, indica que o Brasil já possui potencial para produzir o hidrogênio verde de forma barata. Neste contexto, para alcançar a exploração do hidrogênio verde no Brasil e atingir as metas de descarbonização, embora a tecnologia que envolve o hidrogênio verde tenha potencial para substituir fontes de energia não renováveis a curto, médio e longo prazo, ainda existem desafios que devem ser superados antes de sua aplicação, como: o seu custo, pois assim se tornará mais viável quando a energia utilizada para gerar o hidrogênio verde for mais

barata; devido à sua alta volatilidade e por ser um material inflamável, o armazenamento do hidrogênio, possui alguns métodos complexos e caros, e deve-se desenvolver métodos e aprimorar tecnologias seguras para o seu armazenamento (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2022).

Portanto para atingir as metas de exploração do hidrogênio verde no Brasil, deve-se entender e desenvolver conhecimento sobre o tema. Dessa forma, o presente trabalho busca responder ao seguinte questionamento: qual é o potencial do Brasil relacionado à cadeia de produção do hidrogênio verde.

1.3 Objetivo Geral

Analisar o potencial da exploração do hidrogênio verde no cenário brasileiro, compreendendo a sua produção, transporte e utilização como fonte de energia.

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) estudar as aplicações que demandam o uso de hidrogênio;
- b) realizar um estudo a respeito dos processos de produção, utilização, armazenamento e transporte do hidrogênio verde e seu potencial no Brasil;
- c) avaliar as questões relacionadas ao planejamento da exploração do hidrogênio verde no Brasil e a regulação associada.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 1 engloba a introdução ao tema do trabalho, contextualizando o problema, e a justificativa para a implementação da proposta que este estudo propõe.

Apresenta também o objetivo geral deste trabalho e quatro objetivos específicos para efetivação da proposta.

No capítulo 2 é descrito a revisão da literatura e principais aspectos relacionados ao tema do trabalho.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada nos estudos desenvolvidos neste trabalho.

O capítulo 4 tem como objetivo analisar o potencial do hidrogênio verde no contexto brasileiro, considerando suas possibilidades e desafios, bem como os setores que poderiam se beneficiar dessa tecnologia. Além disso, também é importante apresentar as perspectivas futuras e as possíveis implicações socioeconômicas e ambientais envolvidas na produção e uso do hidrogênio verde no Brasil.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos necessários para a compreensão sobre o hidrogênio tais como, sua utilização como combustível, tipos de hidrogênio e as mudanças da matriz energética que podem ocorrer.

2.1 Aspectos Gerais do Uso de Hidrogênio Verde

De acordo com a Estêvão (2008), assim como os combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural, o hidrogênio tem sido utilizado como combustível alternativo, e apresenta elevada quantidade de energia por massa e baixa densidade. Diferente da gasolina, o hidrogênio é uma fonte de energia limpa, uma vez que só libera água (H_2O), na forma de vapor, e não produz dióxido de carbono.

Segundo o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o hidrogênio pode gerar energia elétrica através de Células a Combustível (CaCs): “As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química de um combustível (hidrogênio) diretamente em energia elétrica e calor e são consideradas uma tecnologia promissora para produção de energia.” (IPEN, 2022). Conforme a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), as células a combustível possuem aplicações como em veículos espaciais, energia de backup, indústrias e residências para geração estacionária, em celulares e notebook em geração portátil e em veículos elétricos (CEMIG, 2022).

Segundo Wendt et.al. (2000), existem 5 tipos de células a combustíveis, cujas características, estão representados na Tabela 1:

Tabela 1 – Tipos de células a combustível

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de Temp. (Cº)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	KOH (OH ⁻)	60 – 90	– Alta eficiência (83% teórica)	– Sensível a CO ₂ – Gases ultrapuros, sem reforma do combustível	– Espaçonaves – Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	Polímero Nafion (H ₃ O ⁺)	80 – 90	– Operação flexível	– Custo da membrana potência e eficiência – Contaminação do catalisador com CO	– Veículos automotores e catalisador – Espaçonaves – Mobilidade
Ácido fosfórico (PAFC)	H ₃ PO ₃ (H ₃ O ⁺)	160 – 200	– Maior desenvolvimento tecnológico	– Controle da porosidade do eletrodo – Sensibilidade a CO – Eficiência limitada pela corrosão	– Unidades estacionárias – Cogeração eletricidade/calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO ₃ ²⁻)	650 – 700	– Tolerância a CO/CO ₂ – Eletrodos à base de Níquel (Ni)	– Problemas de materiais – Necessidade da reciclagem de CO ₂	– Unidades estacionárias (de algumas centenas de kW) – Cogeração eletricidade/calor
Cerâmicas (SOFC)	ZrO ₂ (O ₂ ⁻)	800 – 900	– Alta eficiência – A reforma do combustível pode ser feita na célula	– Problemas de materiais – Expansão térmica – Necessidade de pré-reforma	– Unidades estacionárias (de 10 a algumas centenas de kW) – Cogeração eletricidade/calor

Fonte: Adaptado de Wendt et al., 2000.

De acordo com Wendt et al. (2000), as células de baixa temperatura de operação, também conhecidas como *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC),

em português Membranas Poliméricas para Células a Combustível, utilizam uma membrana polimérica como eletrólito. Essas células são promissoras como alternativa aos motores a combustão, pois são robustas e fáceis de acionar e desligar, além de apresentarem alta eficiência com baixa emissão de poluentes.

De acordo com o *International Energy Agency* (IEA), dentre os diferentes tipos de células a combustível, as PEMFC tendem a ter um grande potencial para redução de custos à medida que a produção aumenta, e sua vida útil é de aproximadamente 5.000 horas de funcionamento, suficientes para uma viagem de 150.000 a 200.000 km (IEA, 2015).

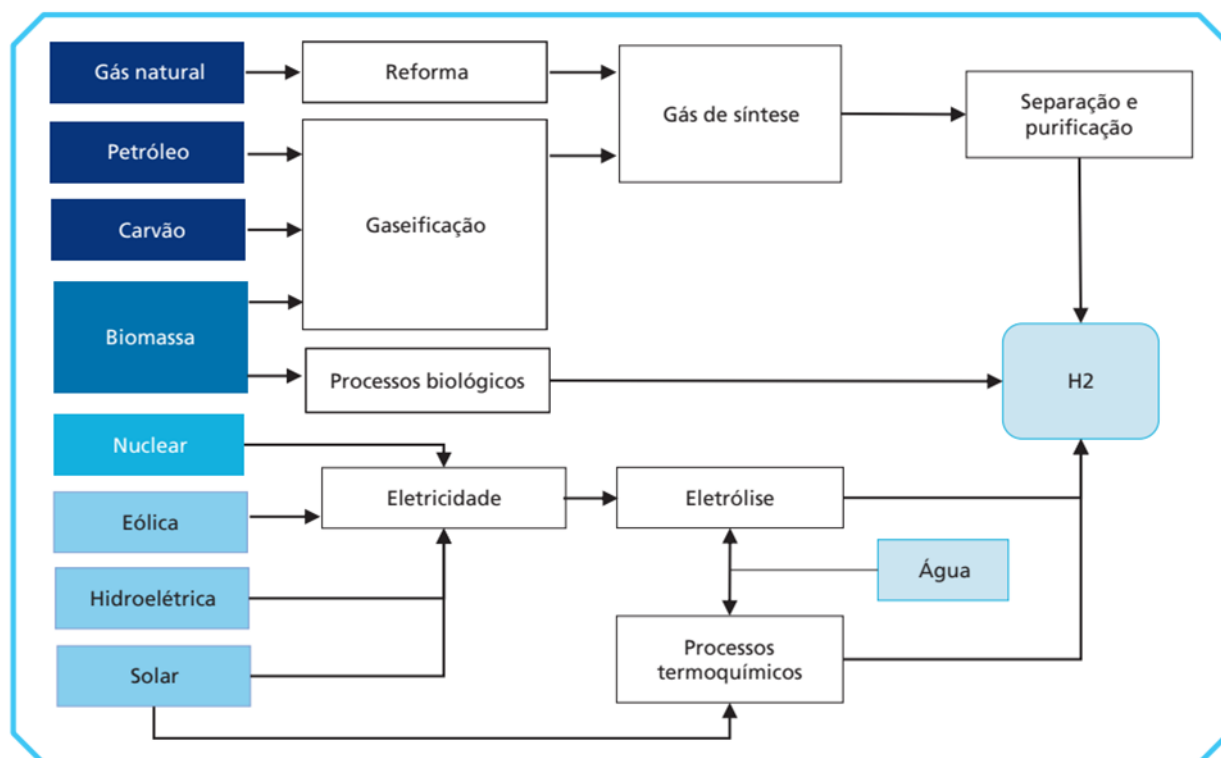
As células de combustível *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), em português Célula de Combustível de Óxido Sólido são consideradas uma alternativa promissora para outras células combustíveis. Isso se deve à sua facilidade de gerenciamento do eletrólito e à não necessidade do uso de metais nobres como catalisadores. Além disso, as SOFC possuem uma eficiência teórica de conversão mais elevada e são capazes de produzir simultaneamente eletricidade e calor. A alta temperatura de operação favorece a cinética das reações eletroquímicas e permite a reforma do combustível dentro da própria célula (WENDT et.al., 2000).

2.2 Processos de Produção e Cores de Hidrogênio

Segundo a SHELL (2017), o hidrogênio é um elemento químico abundante, que pode ser encontrado na forma gasosa, ou até mesmo junto com outros componentes, como metano (CH_4) e a água (H_2O).

A Figura 4, mostra a representação esquemática de quais são as fontes primárias, os processos e onde pode se utilizar o hidrogênio obtido.

Figura 4 – Representação esquemática dos processos tecnológicos para obtenção de hidrogênio

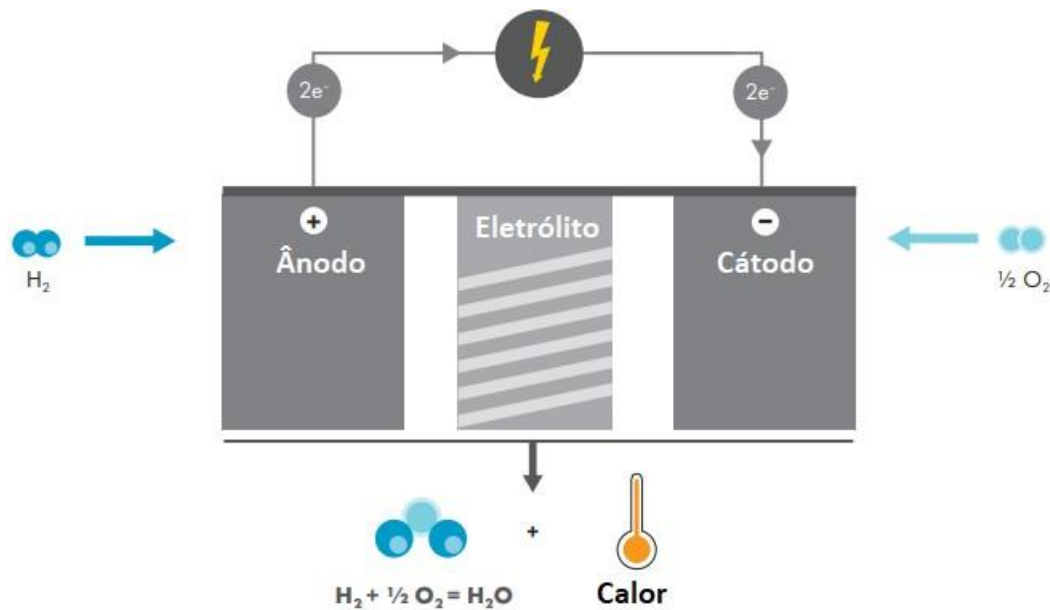


Fonte: Oliveira (2022).

De acordo com Oliveira (2022), os processos mais comuns de produção de eletricidade a partir do hidrogênio são a separação termoquímica e a eletrólise. A separação termoquímica atua por meio da aplicação de altas temperaturas, onde o vapor da água reage com um combustível hidrocarboneto (gás natural, diesel, carvão etc.).

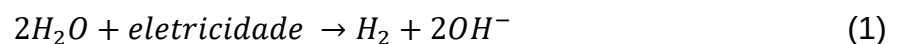
Para a eletrólise da água usa-se eletricidade para dividir a água em hidrogênio e oxigênio, e na célula a combustível ocorre o processo inverso da eletrólise, onde o oxigênio e o hidrogênio são recombinados para formar água por meio de corrente contínua, liberando novamente energia na forma de eletricidade (OLIVEIRA, 2022). A Figura 5, apresenta o processo da eletrólise:

Figura 5 – Processo de eletrólise



Fonte: Adaptado de Shell (2017).

Segundo Silva (2005), o processo da eletrólise da água ocorre no eletrolisador, que consiste em dois eletrodos submersos na água, um sendo positivo (ânodo) e outro negativo (cátodo) separados por um eletrólito (por exemplo sal), onde a corrente elétrica realiza a decomposição da molécula da água, separando o hidrogênio que se concentra no cátodo e o oxigênio no ânodo (SILVA, 2005). O processo químico da eletrólise pode ser representado por esta Equação (1):



Para os processos termoquímicos, existem 3 principais formas de produção de hidrogênio a partir de combustíveis primários que são: a reforma a vapor, oxidação parcial e reforma auto térmica.

A reforma a vapor utiliza uma etapa catalítica (catalisadores) que acelera a velocidade de uma reação química, que é capaz de converter a mistura do vapor da água e um combustível primário em um gás de síntese como o hidrogênio e o monóxido de carbono (CO) (IPEN, 2022). Um exemplo de um processo químico é a reforma a vapor do metano expressada na Equação (2):



De acordo com Aicher, Blum e Specht (2004), a oxidação parcial é um processo exotérmico, isto é, libera calor, e o oxigênio (ou ar) é utilizado nessa reforma.

Segundo Oliveira e Passos (2013), a oxidação parcial tem como definição:

Na oxidação parcial, os compostos oxigenados, tipicamente encontrados após o processamento da biomassa, reagem com um agente oxidante (O_2) em quantidade inferior à quantidade estequiométrica exigida para a combustão completa. A oxidação parcial é uma reação exotérmica e, portanto, menos calor deve ser fornecido ao sistema reduzindo, assim, o custo de operação. (OLIVEIRA; PASSOS, 2013. p.1).

Segundo Aicher, Blum e Specht (2004), a reforma autotérmica é um processo de produção de hidrogênio a partir de uma mistura de água e oxigênio, em que o calor necessário para a reação é gerado pela própria reação. Isso ocorre porque a reação de reforma autotérmica é exotérmica, ou seja, libera calor.

Segundo Faria (2007), a reforma auto térmica é descrita por:

A reforma autotérmica combina a oxidação e a reforma a vapor de hidrocarbonetos, adicionando ao combustível água e ar. O calor gerado na reação de oxidação é utilizado na reforma do hidrocarboneto remanescente. O processo é realizado na presença de um catalisador específico que controla a relativa extensão das reações de oxidação e reforma. (FARIA, 2007, p, 26).

Existem diversos tipos de hidrogênio, diferenciados pelo nível de emissão de carbono no processo de produção. Na Tabela 2 , é apresentada a classificação de hidrogênio em escala de cores e como são produzidos:

Tabela 2 – Classificação do hidrogênio a partir da tecnologia de produção

Cor	Classificação	Matéria Prima/Fonte de Energia	Descrição do processo
	Hidrogênio preto	Carvão mineral (antracito)	A variação do hidrogênio cinza gerado a partir do processo de gaseificação do “carvão preto”, sem CCUS.
	Hidrogênio marrom	Carvão mineral (hulha)	A variação do hidrogênio cinza gerado a partir do processo de gaseificação do “carvão preto”, sem CCUS.
	Hidrogênio cinza	Combustível fóssil	Produzido do gás natural, sem CCUS.
	Hidrogênio azul	Combustível fóssil	majoritariamente a partir de gás natural, produz principalmente H ₂ e CO ₂ , com CCUS.
	Hidrogênio verde	Energias renováveis (eólica, solar, biomassa, biogás, biocombustíveis)	Produzido a partir da eletrólise da água (eólica e solar). Produzido através de reformas, gaseificação da biomassa.
	Hidrogênio turquesa	Metano	Produzido a partir do processo de pirólise do metano, gerando hidrogênio e carbono sólido; não gera CO ₂ .
	Hidrogênio branco	Não aplicável	Produzido pela reforma de gás natural ou gaseificação do carvão sem tecnologia CCUS.
	Hidrogênio amarelo	Particularmente da energia solar	Processo da eletrólise semelhante ao do hidrogênio verde.
	Hidrogênio rosa	Energia nuclear	Obtido de forma parecida como o hidrogênio verde através do processo de eletrólise.

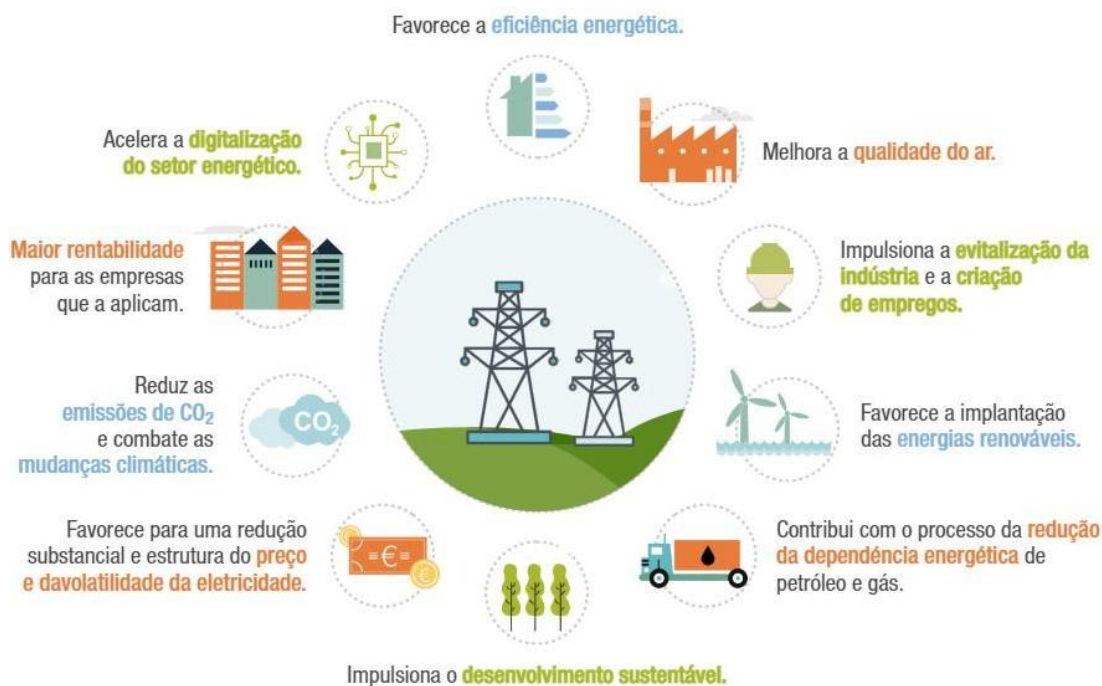
Fonte: Adaptado de EPE (2021).

De acordo com IEA (2021a), observa-se que alguns tipos de hidrogênio podem ser com ou sem CCUS, as tecnologias CCUS envolvem a captura do dióxido de carbono podendo ser transportado por navios ou gasoduto de forma comprimida para usar como recurso na criação de produtos ou serviços, ou ainda armazenados permanentemente em formações geológicas no subsolo (IEA, 2021a).

2.3 Benefícios do Uso de Hidrogênio Verde

Segundo Iberdrola (2022), o uso de fontes renováveis para a geração de energia é fundamental para a redução das emissões de dióxido de carbono, e para tornar-se um ambiente energético mais sustentável e eficiente. O uso maior da geração renovável necessita de um desenvolvimento tecnológico mais eficiente nas áreas de redes de distribuição e transmissão, pois, os locais de geração normalmente são longe do ponto de consumo, e na parte de armazenamento da energia que inclui os recursos de hidrogênio verde (IBERDROLA, 2022). A Figura 6 mostra os principais benefícios da descarbonização e com a eletrificação como base de uma economia mais sustentável.

Figura 6 – Principais benefícios da descarbonização e eletrificação da economia



Fonte: Iberdrola (2022).

Segundo Iberdrola (2022), a facilidade com que o hidrogênio pode ser armazenado, permite que ele seja usado posteriormente para outros usos e em outras fases de sua produção. O uso de tanques de hidrogênio comprimido, permitem armazenar energia por longos períodos, e eles também são de fácil manuseio. Além do seu armazenamento o hidrogênio pode ser transportado, pois apresenta grande flexibilidade permitindo o seu uso em indústrias como transporte pesado, aviação e transporte marítimo, que são casos difíceis de descarbonizar (IBERDROLA, 2022).

A digitalização do setor energético é acelerada com a descarbonização e eletrificação da economia por fontes renováveis, pois requer: aplicação de inteligência artificial, internet das coisas, sistemas de armazenamento, entre outros (IBERDROLA, 2022).

A volatilidade da eletricidade refere-se às flutuações na disponibilidade e preço da energia elétrica ao longo do tempo, em função da intermitência das fontes renováveis e das variações da demanda. Isso exige soluções inteligentes de gestão da rede, armazenamento de energia e comunicação bidirecional com consumidores para equilibrar oferta e demanda com mais agilidade (IBERDROLA, 2022).

2.4 Hidrogênio Verde e Transição Energética

De acordo com IEA (2015), o hidrogênio exerce um papel importante para a transição energética a transição energética, que é um processo de mudança gradual das fontes de energia tradicionais para fontes de energia renováveis, e a política energética está caminhando ainda mais para o lado do mercado de hidrogênio (IEA, 2015). Segundo a EPE (2021), o Ministério de Minas e Energia (MME), desenvolveu um estudo chamado “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”, tratando das oportunidades do hidrogênio brasileiro na transição energética e dos seguintes temas como bases para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio: a produção do hidrogênio, logística do hidrogênio, aplicações do hidrogênio como vetor energético, desenvolvimento tecnológico e formação de recursos humanos e a metrologia, normalização, regulamentação técnica, avaliação da conformidade, regulação e fiscalização (EPE, 2021a).

O Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, publicado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) em 2010, aponta que a produção de hidrogênio é uma das questões mais importantes para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no país. O documento destaca a eletrólise da água, a reforma de etanol e os processos a partir da biomassa como processos promissores para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis. A eletrólise da água necessita de energia, que pode ser gerada por uma fonte renovável, como a solar e eólica, nas quais o Brasil recebe grande destaque por possuir potencial na geração de energia renovável (CGEE, 2010).

A atual transição energética envolve uma série de transformações, na Figura 7 estão apresentadas as etapas para alcançar a transição energética:

Figura 7 – Base da transição energética



Fonte: MME (2020).

Dessa forma, o uso de combustíveis renováveis como combustível de transição, bem como a eletrificação desses processos de conversão de energia, traz um desenvolvimento mais sustentável. Esses processos ocorrem em conjunto com as inovações tecnológicas, digitalização de procedimentos e uma maior automatização dos processos, possibilitando tanto o aumento da eficiência energética como uma maior contribuição no uso de fontes renováveis (MME, 2020).

3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo entender o hidrogênio verde como fonte renovável de energia. Serão analisados materiais já publicados por especialistas sobre o tema, como teses, dissertações, artigos científicos e relatórios de órgãos governamentais. A pesquisa bibliográfica se concentrará em materiais recentes para manter a análise atualizada.

A partir dos dados coletados é apresentado uma descrição sobre o hidrogênio verde, suas formas de produção, armazenamento e transporte, utilização, eficiência energética, o programa nacional do hidrogênio (PNH₂), as regulamentações e os tipos de hidrogênio.

Por fim, é realizada uma análise através de materiais teóricos do potencial de exploração do hidrogênio verde no Brasil, quais são os desafios, quais foram as iniciativas, quais mudanças podem ocorrer na matriz energética e o que se vem sendo discutido sobre o tema.

4 ANÁLISE DE POTENCIAL DE EXPLORAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

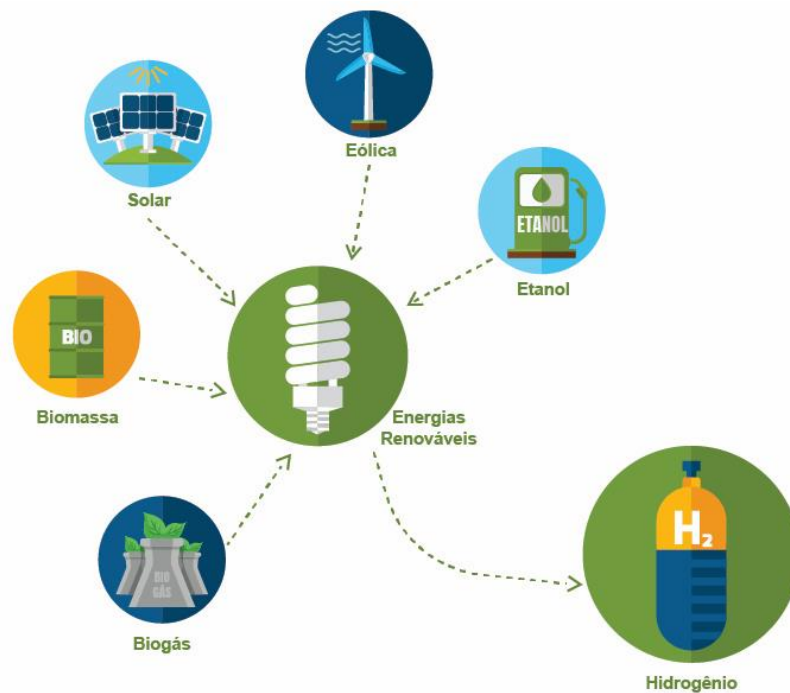
De acordo com Oliveira (2022), a análise do potencial de exploração do hidrogênio verde no Brasil é um tema de grande importância para o país, uma vez que apresenta condições climáticas favoráveis para a geração de energia elétrica por meio de fontes eólicas, solar e hídricas. Atualmente, o Brasil concentra sua produção de hidrogênio nos setores de petróleo e fertilizantes, utilizando processos com alta emissão de dióxido de carbono. Com a diminuição do custo de produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como a solar e a eólica, espera-se que haja um aumento significativo na produção de hidrogênio verde no Brasil. Diante desse cenário, a análise do potencial de exploração do hidrogênio verde no país torna-se fundamental para identificar as melhores oportunidades de investimento e contribuir para o desenvolvimento sustentável da economia brasileira (OLIVEIRA, 2022).

4.1 Fontes de Produção de Hidrogênio Verde no Brasil

Apesar do potencial brasileiro de produção de hidrogênio verde baseado, por exemplo, em geração solar e eólica, para que esse potencial seja alcançado é necessário superar desafios e investir em tecnologias e infraestrutura que viabilizem sua produção em larga escala (CNI, 2022).

Conforme a Figura 8 são diversas as fontes primárias disponíveis no Brasil que podem ser utilizadas para a produção de hidrogênio verde. Os tópicos seguintes detalham a utilização dessas fontes.

Figura 8 – Fontes Primárias de Hidrogênio Verde



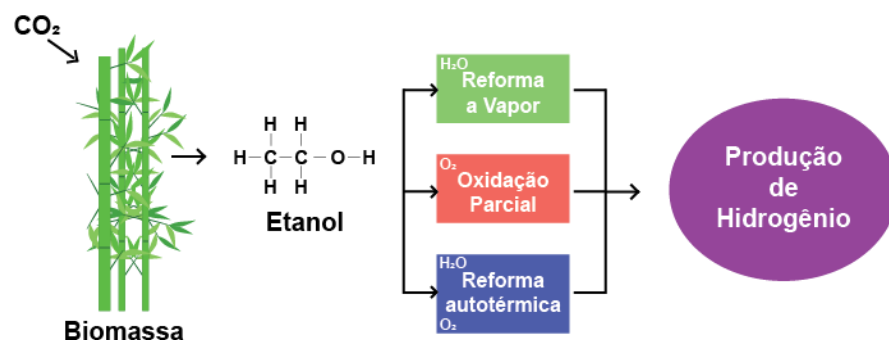
Fonte: Elaboração própria, (2023).

4.1.1 Etanol

Uma das formas de produzir hidrogênio verde é a partir do etanol (C_2H_5OH), feito à base de cana-de-açúcar, sendo um biocombustível bastante comum no Brasil (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2023).

De acordo com Da Silva et al. (2023), existem três processos para a produção de hidrogênio verde a partir do etanol: reforma a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica, conforme a Figura 9.

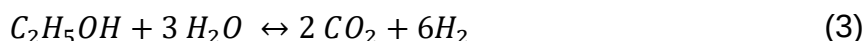
Figura 9 – Processos de produção de hidrogênio a partir do etanol



Fonte: Adaptado de CHEN et. al. (2023).

O processo de reforma a vapor é o processo mais empregado, e consiste na reação da molécula de etanol com vapor d'água na presença de um catalisador, que resulta em hidrogênio e dióxido de carbono. Essa reação é endotérmica, ou seja, necessita absorver calor para ocorrer (DA SILVA et al., 2023).

A reação global de conversão do etanol em hidrogênio através da reforma a vapor é mostrada na Equação (3) (SILVEIRA et al., 2009):



De acordo com Silveira et al. (2009), a reação é reversível, o que significa que os produtos também podem reagir para regenerar os reagentes, dependendo das condições de temperatura e pressão. De acordo com Maia et. al. (2023), é possível o uso de um catalisador para acelerar a velocidade da reação e reduzir a energia de ativação necessária para que a reação ocorra. Os catalisadores de níquel mostraram ser altamente eficazes na reforma a vapor do etanol devido à sua capacidade de aumentar a produção de hidrogênio.

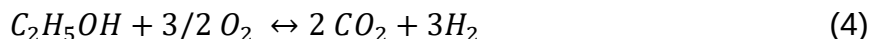
A utilização do etanol para produzir hidrogênio por meio da reforma a vapor oferece a possibilidade de um processo neutro em carbono, tornando-se uma opção promissora. Embora o método já tenha sido demonstrado experimentalmente e possa ser usado em pequena escala, o Brasil pode se beneficiar dele devido à infraestrutura já existente para produção, transporte e armazenamento de etanol. No entanto, para impulsionar essa tecnologia, é necessário desenvolver catalisadores extremamente eficazes em baixas temperaturas. Esses catalisadores ajudam a promover a reforma do vapor em temperaturas mais baixas, o que reduz o consumo de energia, além de serem altamente seletivos na produção de hidrogênio, a fim de tornar o produto competitivo economicamente (OGO; SEKINE, 2020).

Já a oxidação parcial do etanol:

[...] é uma reação exotérmica e, portanto, menos calor deve ser fornecido ao sistema reduzindo, assim, o custo de operação (OLIVEIRA; PASSOS, 2013, p. 375).

A oxidação parcial do etanol é um processo catalítico que envolve quebrar parcialmente as moléculas de etanol para gerar hidrogênio e dióxido de carbono. Ao se adicionar oxigênio durante a conversão de etanol, as temperaturas necessárias

tendem a ser mais baixas, o que pode resultar em menor desenvolvimento de coque¹, usando catalisadores como níquel, platina ou ródio (VAIDYA et al., 2011). A reação química é simbolizada pela Equação (4) (CHEN et.al., 2023):



A mistura gasosa produzida pela oxidação parcial do etanol pode ser utilizada como fonte de hidrogênio para células de combustível (SOUZA, 2009).

A reforma autotérmica é um processo que combina a reforma a vapor e a oxidação parcial, resultando em um processo no qual a oxidação parcial, que é exotérmica, fornece a energia necessária para a reforma a vapor, que é endotérmica (DA SILVA et al., 2023). De acordo com Xiang et. al. (2019), a reação envolve a quebra do etanol na presença de vapor d'água, gerando uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, representada na Equação (5):



A reação gera calor suficiente para manter a temperatura de operação sem a adição de calor externo, isso torna o processo mais eficiente energeticamente. Para alcançar altas taxas de conversão, a reação se beneficia do uso de um catalisador, que age reduzindo a energia de ativação do processo, acelerando as reações químicas (XIANG et. al., 2019).

De acordo com MORAES, J. M. et al. (2021), como o país é um dos maiores produtores de etanol do mundo, existem oportunidades para investimentos em projetos de produção de hidrogênio verde a partir do etanol, o que pode contribuir para o desenvolvimento da indústria nacional e para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

De acordo com EPBR (2023), a Shell, Raízen, Hytron, Universidade de São Paulo (USP) e Senai CETIQT, em parceria com a Toyota, estão investindo em duas plantas de produção de hidrogênio verde a partir do etanol, com capacidade de produzir 5 kg/hora. A proposta é usar o hidrogênio verde como combustível para substituir o diesel em um ônibus que circula na Cidade Universitária, em São Paulo,

¹ Sólido poroso, esponjoso e predominantemente carbonoso que se forma como subproduto na decomposição térmica de substâncias orgânicas como petróleo e etanol.

equipado com tecnologia de célula a combustível. Além disso, a produção local pode ser aproveitada para descarbonizar a indústria e o transporte pesado.

No entanto, ainda existem alguns desafios técnicos e econômicos que precisam ser superados para tornar essa tecnologia viável. Alguns exemplos desses desafios são: Escala de produção, custo de produção, armazenamento e distribuição, competição com outras fontes de hidrogênio verde e regulamentação (MORAES, J. M. et al., 2021).

A escala de produção, implica na adaptação das usinas de produção de etanol para a produção de hidrogênio em larga escala, e pode requerer investimentos expressivos em infraestrutura e equipamentos. Outro desafio é o custo de produção, que pode ser elevado devido à necessidade de tecnologias específicas e materiais de alta qualidade, além dos custos de energia necessários para a produção e purificação do hidrogênio (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2022).

De acordo com Wang et al. (2015), o armazenamento e distribuição do hidrogênio verde também apresentam desafios, uma vez que o hidrogênio é altamente inflamável e requer tecnologias de armazenamento e transporte específicas, que podem ser caras. Além desses desafios técnicos e econômicos, a produção de hidrogênio verde a partir do etanol enfrenta a competição com outras fontes de hidrogênio verde, como a produção a partir da eletrólise da água, que é uma tecnologia mais madura e amplamente utilizada.

Por fim, a regulamentação do hidrogênio verde no Brasil ainda é um desafio. Apesar de já existirem iniciativas para incentivar o desenvolvimento de uma cadeia de fornecimento de hidrogênio no país, o Brasil ainda se encontra num estágio inicial de estabelecimento das leis e regras necessárias para viabilizar esse mercado (MACHADO, 2021).

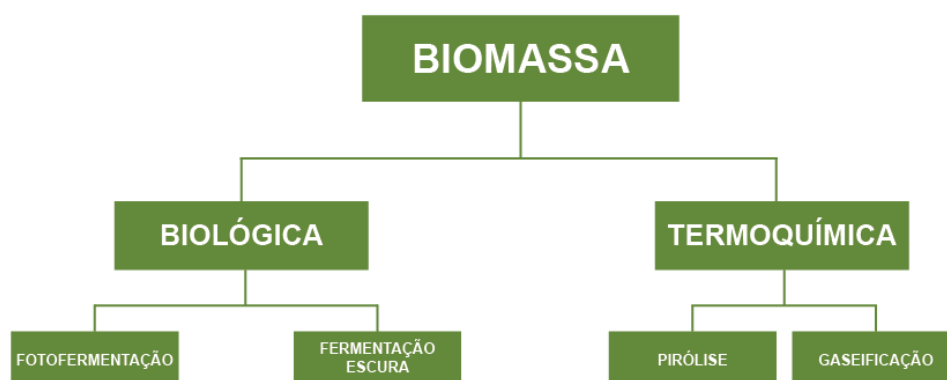
4.1.2 A partir de Biomassa

A biomassa é responsável por cerca de 9% da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil. A cana-de-açúcar é a principal fonte de biomassa produzida no país, representando cerca de 80% da produção nacional (EPE, 2021a).

De acordo com o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) (2022), a produção de hidrogênio a partir da biomassa é uma das alternativas para a obtenção de hidrogênio verde, onde o Brasil, pode se tornar um grande consumidor e exportador dessa fonte energética (BNDES, 2022).

Existem dois tipos de processos que utilizam a biomassa: termoquímicos e biológicos. Os principais processos termoquímicos incluem a pirólise e a gaseificação, enquanto os principais processos biológicos são a fotofermentação e fermentação escura, conforme a Figura 10 (NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

Figura 10 – Processos de produção de hidrogênio a partir da biomassa



Fonte: Adaptado de DE CASTRO et al. (2023).

A rota termoquímica envolve a gaseificação da biomassa, que pode converter a matéria orgânica em uma mistura de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio e metano. Embora a gaseificação tenha o potencial de converter a componente lignina da biomassa², ela ainda não está totalmente desenvolvida, e o problema da formação de alcatrões³, que podem causar envenenamento do catalisador, ainda não foi totalmente resolvido (IEA, 2019).

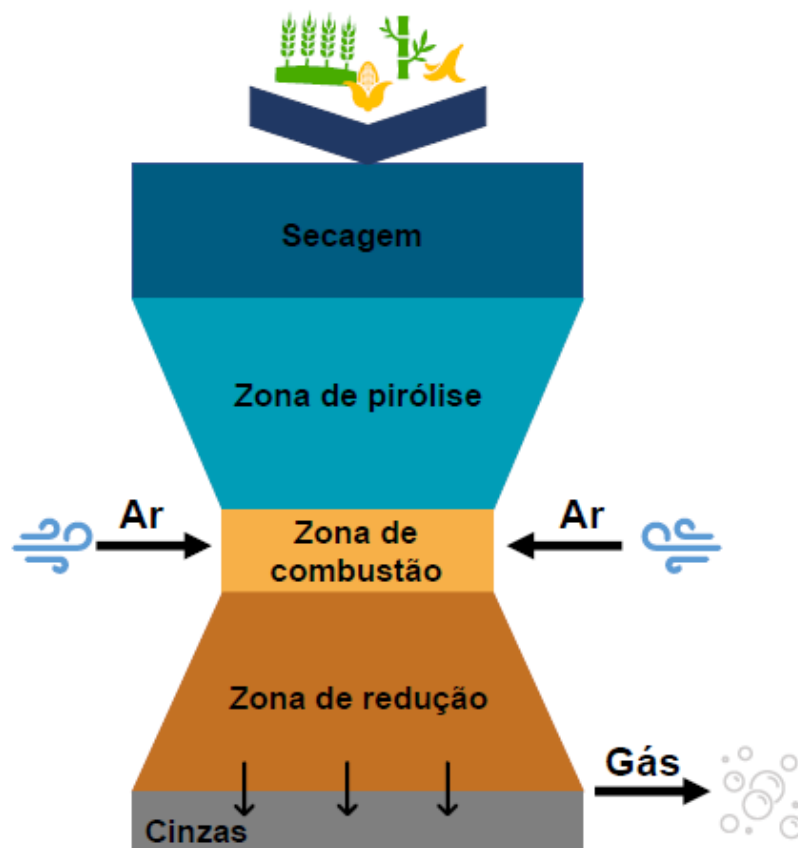
A pirólise da biomassa também é um processo termoquímico, no qual a biomassa é queimada em um ambiente limitado de oxigênio. O calor liberado durante

² Polímero complexo e resistente que faz parte da estrutura celular de muitos tipos de plantas, incluindo árvores, arbustos e gramíneas.

³ Os alcatrões são compostos orgânicos complexos e não voláteis que são produzidos durante a gaseificação da biomassa

o processo é usado para quebrar as ligações químicas da biomassa e, assim, produzir combustível. O combustível produzido pode ser gasolina, diesel, óleo diesel, hidrogênio, etanol, biogás, entre outros. O processo também produz resíduos sólidos, como cinzas e carvão, que podem ser usados como fertilizantes ou como combustível para aquecimento (LETICIA MONTENEGRO TURTELLI PIGHINELLI et al., 2018). A Figura 11 representa o processo da pirólise da biomassa.

Figura 11 – Processo de Pirólise da Biomassa



Fonte: EPE (2021).

Segundo Demirbas (2011), a zona de secagem é a primeira etapa do processo, na qual a biomassa é aquecida até que a umidade seja evaporada. Nessa etapa, a temperatura varia de 30°C a 110°C, dependendo da umidade da biomassa. A zona de secagem é importante porque a presença de umidade pode reduzir a eficiência do processo de pirólise.

A zona de pirólise é a segunda etapa do processo, na qual a biomassa é aquecida em ausência de oxigênio, resultando na decomposição térmica dos componentes da biomassa em gases, líquidos e carvão. Segundo Bridgwater (2012),

a temperatura da zona de pirólise varia de 300°C a 800°C, dependendo do tipo de biomassa e das condições de operação. Durante a zona de pirólise, a lignina é convertida em alcatrões e gases ricos em monóxido de carbono e hidrogênio.

A zona de combustão ou redução é a terceira etapa do processo. De acordo com Demirbas (2011), a temperatura da zona de combustão ou redução varia de 800°C a 1200°C, dependendo das condições de operação. Nessa etapa, os gases produzidos na zona de pirólise são queimados em presença de oxigênio para produzir calor e energia, ou reduzidos em presença de vapor d'água para produzir hidrogênio e monóxido de carbono.

De acordo com Lepage et al (2021), na rota biológica a fermentação escura é a decomposição da biomassa por bactérias anaeróbias que crescem no escuro. A produção de hidrogênio varia de 0,004 a 0,044 kgH₂/kg biomassa, enquanto a gaseificação a vapor varia de 0,040 a 0,0190 kgH₂/kg biomassa. Apesar de mais barata que a fotofermentação, a fermentação escura sofre de baixa eficiência energética, durabilidade limitada de catalisadores e impurezas no produto. Precisa ser desenvolvida para ser competitiva, já que o pré-tratamento adiciona complexidade, tornando-a mais cara.

A fotofermentação é um processo que utiliza energia luminosa para produzir hidrogênio a partir da biomassa, mas é menos competitivo financeiramente do que a fermentação escura, devido ao uso de equipamentos de iluminação, o que aumenta os custos operacionais. Os rendimentos de hidrogênio para fotofermentação estão na mesma faixa que para fermentação escura (0,004 a 0,049 kg H₂/kg de biomassa), mas os custos de produção são maiores (LEPAGE et. al, 2021).

De acordo com Oliveira (2022), embora o processamento complexo da produção de biomassa seja mais caro para a obtenção de hidrogênio com baixo teor de carbono em comparação com a eletrólise solar ou eólica, o potencial de produção de hidrogênio a partir da biomassa pode ser um complemento valioso ao potencial das energias solar e eólica em regiões onde a indústria de biomassa já está estabelecida, como o Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil.

No entanto, a disponibilidade limitada de biomassa pode restringir o potencial de produção em grande escala, devido a duas razões principais.

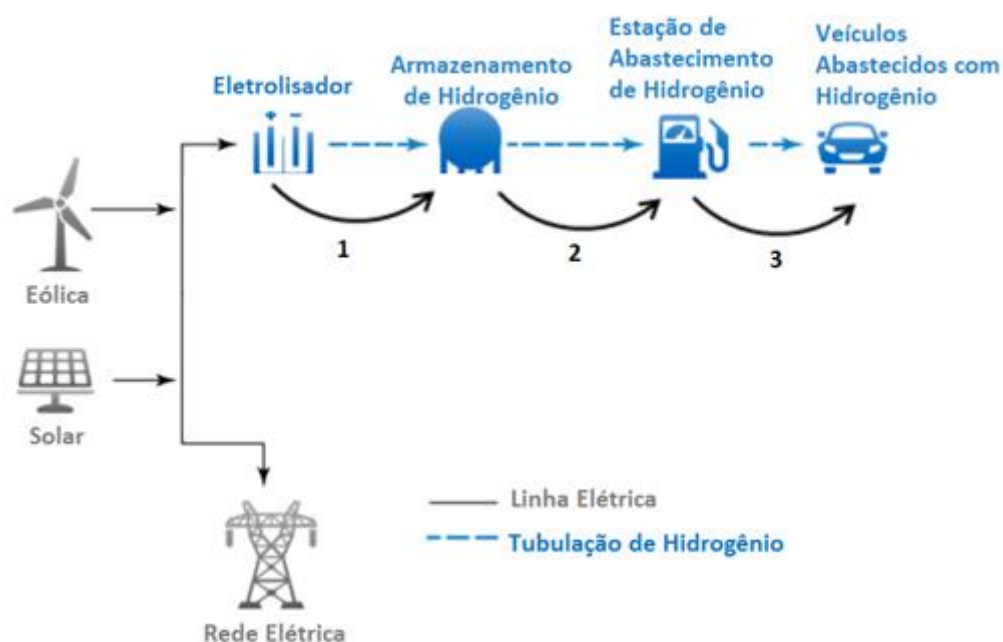
Primeiramente, há competição com outras aplicações, como a produção de alimentos, rações e produtos químicos, o que pode levar a uma redução na disponibilidade de biomassa para a produção de hidrogênio. Em segundo lugar, a disponibilidade geográfica de biomassa pode variar amplamente, dependendo de fatores como clima e solo, limitando a capacidade de produção em áreas onde a biomassa é escassa ou cara (MELO; SILVA, 2011).

4.1.3 A partir de Geração Eólica

De acordo com Oliveira (2022), a produção de hidrogênio no Brasil a partir da geração eólica é uma tendência crescente em meio ao cenário de energia renovável. Neste caso, o hidrogênio é obtido a partir da eletrólise da água, que consiste em separar os átomos de oxigênio e hidrogênio por meio de energia elétrica. A eletrólise pode ser alimentada por fontes renováveis, como a energia eólica, que tem sido muito bem-sucedida no Brasil.

De acordo com Braga (2014), a energia elétrica gerada, que não é consumida para produzir hidrogênio, é alimentada à rede até que seja necessária para o acionamento do sistema, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Estágios do hidrogênio: produção, armazenamento, abastecimento e consumo



Fonte: Adaptado de Moura (2020).

O hidrogênio produzido pelo eletrolisador, que é responsável por converter a energia elétrica em energia química por meio da eletrólise da água, é direcionado para um sistema de armazenamento. Esse hidrogênio pode ser, por exemplo, destinado para postos de abastecimento de veículos, como carros ou ônibus, ou combustível na indústria. O armazenamento do hidrogênio é fundamental para garantir a disponibilidade do gás em momentos de alta demanda e para possibilitar a sua distribuição em larga escala (BRAGA, 2014).

De acordo com Oliveira (2022), a energia eólica é uma fonte de energia renovável e limpa que tem ganhado destaque na produção de eletricidade em todo o mundo. No entanto, a produção de energia eólica pode ser intermitente, o que significa que há momentos em que a energia gerada excede a demanda local. Em vez de deixar essa energia excedente ser desperdiçada, uma opção é utilizar essa energia para produzir hidrogênio verde.

Ao utilizar a energia eólica excedente para produzir hidrogênio verde, é possível armazenar a energia renovável em forma de hidrogênio para ser usada posteriormente, quando a demanda por energia for maior. Essa é uma forma eficiente de armazenar energia renovável, já que o hidrogênio pode ser facilmente armazenado em tanques e transportado para locais onde é necessário (OLIVEIRA, 2022).

No ano de 2019, o Brasil alcançou a sétima posição mundial em termos de capacidade total instalada de geração eólica, atingindo 15.449 MW. A região Nordeste se sobressai como a principal geradora de energia eólica do país, tendo o estado do Rio Grande do Norte como o maior produtor, seguido pela Bahia e Piauí. Somente no ano de 2019, 38 novos parques eólicos foram implantados nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Maranhão, aumentando a capacidade total em 744,95 MW. É importante destacar que a energia eólica representou 88% da energia consumida no subsistema nordeste, e que a região também exibiu os mais elevados índices de fator de capacidade, especialmente nos estados do Maranhão, Pernambuco e Ceará (GIZ, 2021).

De acordo com a EPE (2020), a geração de energia eólica deve aumentar significativamente nos próximos anos no Brasil. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 (PDE 2027) da EPE estima que a capacidade instalada de geração eólica no país deve passar de 15 GW em 2022 para 27 GW em 2027, representando

um aumento de 74%. Essa projeção reflete o potencial do Brasil na geração de energia eólica, que é um dos países com maior capacidade eólica instalada no mundo.

Segundo o PDE 2027, o aumento da capacidade instalada de geração eólica no país deve ser impulsionado principalmente pela contratação de novos projetos em leilões de energia, bem como pela expansão de usinas já existentes. A EPE destaca ainda o potencial de crescimento da energia eólica offshore (gerada em alto mar), que pode se tornar uma importante fonte de energia renovável no Brasil nos próximos anos (EPE, 2020).

O HUB de Hidrogênio Verde foi lançado em fevereiro de 2021 pelo Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), juntamente com a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará (UFC). Este empreendimento está localizado no estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil. O HUB tem como objetivo impulsionar o desenvolvimento de tecnologias, infraestrutura e investimentos para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde na região, contribuindo assim para a transição do país para uma matriz energética mais limpa e sustentável (COMPLEXO DO PECÉM, 2023).

A empresa Qair tem planos de replicar um projeto semelhante ao que foi feito em Pernambuco no CIPP, no Ceará, onde já adquiriu uma área para instalação do empreendimento. Além dos US\$ 3,9 bilhões investidos nas plantas de hidrogênio, a Qair também pretende investir US\$ 3 bilhões em um projeto de energia eólica *offshore* de 1,2 GW nos arredores do Pecém para produzir a energia renovável necessária para a produção de hidrogênio verde (EPBR, 2023).

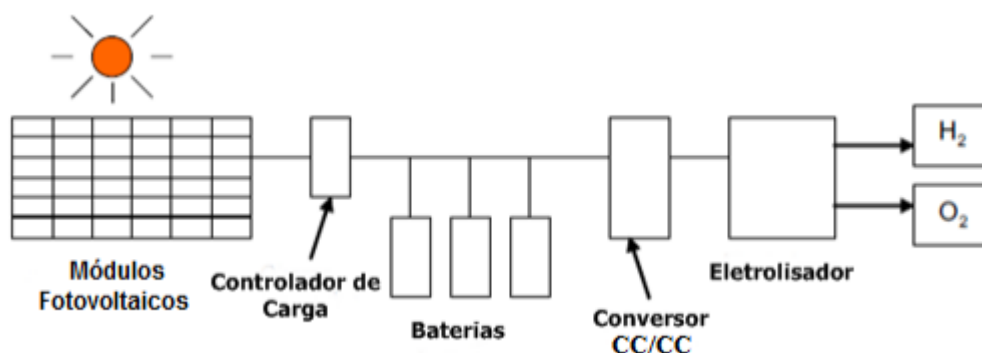
Existem alguns desafios a serem superados para tornar a produção de hidrogênio verde a partir da energia eólica uma realidade no Brasil. Um desses desafios é o custo da produção de hidrogênio verde, que atualmente é mais elevado do que o hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis. No entanto, espera-se que o custo da produção de hidrogênio verde diminua nos próximos anos, à medida que a tecnologia de produção de hidrogênio verde a partir da geração eólica se desenvolva e a demanda aumente (EPE, 2021a).

4.1.4 A partir de Geração Solar Fotovoltaica

De acordo com Silveira (2023), no Brasil, a média de radiação solar é de 900 W/m^2 . Os atuais sistemas fotovoltaicos apresentam uma eficiência na ordem de cerca de 80 a 180 W/m^2 (dependendo da tecnologia empregada), durante aproximadamente 6 horas do dia, de acordo com a posição do sol. No entanto, para que a energia gerada por esses sistemas possa ser aproveitada em períodos sem irradiação solar, é necessário o armazenamento da mesma, normalmente utilizando bancos de baterias. Esse armazenamento encarece significativamente o investimento em plantas fotovoltaicas, devido ao atual custo das baterias ainda ser elevado.

De acordo com Gibson e Kelly (2008), os sistemas solares utilizados na produção de hidrogênio são compostos por um conjunto de painéis fotovoltaicos que geram eletricidade em corrente contínua. Esses painéis são conectados a controladores de carga e conversores CC/CC, que são responsáveis por carregar as baterias, bem como fornecer a tensão necessária ao eletrolisador. A Figura 13 ilustra uma representação desse sistema.

Figura 13 – Sistema convencional de produção de hidrogênio a partir de Geração Fotovoltaica



Fonte: GIBSON e KELLY, (2008).

Há uma tendência de crescimento acelerado da participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira. Isto foi ratificado com a aprovação do Plano Nacional de Energia 2050 em dezembro de 2020 (MME, 2020). O plano estabelece metas ambiciosas para a geração solar fotovoltaica centralizada no país, prevendo que o Brasil atinja entre 27 GW e 91 GW de capacidade solar instalada em 2050. Embora a capacidade solar instalada em operação atualmente seja de apenas

5,52 GW, já foram outorgados 64,12 GW para projetos solares, o que representa uma parcela significativa do crescimento projetado para 2050 no cenário mais otimista (ANEEL, 2023).

Se os projetos concedidos forem implementados dentro dos próximos cinco anos, a energia solar fotovoltaica poderá se tornar a segunda maior fonte de energia da matriz elétrica brasileira. Esse tipo de energia seria responsável por produzir cerca de um terço de toda a energia gerada no país. A tendência de crescimento exponencial do setor está relacionada à queda nos custos dos projetos, melhorias tecnológicas, alto potencial de irradiação solar e política energética favorável às fontes renováveis (LUNARDI; SOUSA, 2022).

Conforme apontado pela IEA (2019), as áreas do mundo com maior disponibilidade de fontes solares e eólicas têm potencial para oferecer os menores custos de produção de hidrogênio verde, pois, a produção de hidrogênio verde a partir de eletrólise da água requer uma fonte de energia elétrica limpa e renovável. Com áreas com alta incidência de luz solar, é possível obter maiores quantidades de energia elétrica, reduzindo o custo total de produção de hidrogênio verde. De acordo com Oliveira (2022), é possível combinar a produção de energia eólica e solar para reduzir os custos de operação dos eletrolisadores.

4.1.5 A partir de Biogás

O Biogás é uma fonte de energia com elevado potencial energético que pode ser usada para a produção de energia elétrica, mecânica ou térmica. É um combustível gasoso que possibilita a obtenção de energia em grandes quantidades (SOUZA, 2004). A produção do hidrogênio a partir do biogás, segue as seguintes etapas, conforme a Figura 14 (ALVES, 2021):

Figura 14 – Processos de produção de hidrogênio a partir do Biogás



Fonte: Adaptado de Alves (2021).

De acordo com Schultz e Soares (2014), o biogás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, provenientes da decomposição de material orgânico, e pode conter impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e outros gases. Essas impurezas podem afetar a qualidade do biogás e prejudicar seu uso em aplicações energéticas. Portanto, a purificação do biogás é necessária para remover essas impurezas e obter um gás de alta qualidade.

Sulfeto de hidrogênio é um composto tóxico, corrosivo e de odor desagradável que pode ser removido por processos químicos, físicos e biológicos. O processo biológico, em que bactérias oxidam o sulfeto de hidrogênio para enxofre e sulfato, é o mais utilizado (RYCKEBOSCH et al., 2011).

Processos de reforma do metano são usados para produzir gás de síntese, que é uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio. Esses processos de reforma do metano podem ser usados com o biogás, já que o metano é seu principal componente. Esses processos de separação incluem a reforma a vapor, a reforma seca, a oxidação parcial e a reforma autotérmica (SCHULTZ; SOARES, 2014).

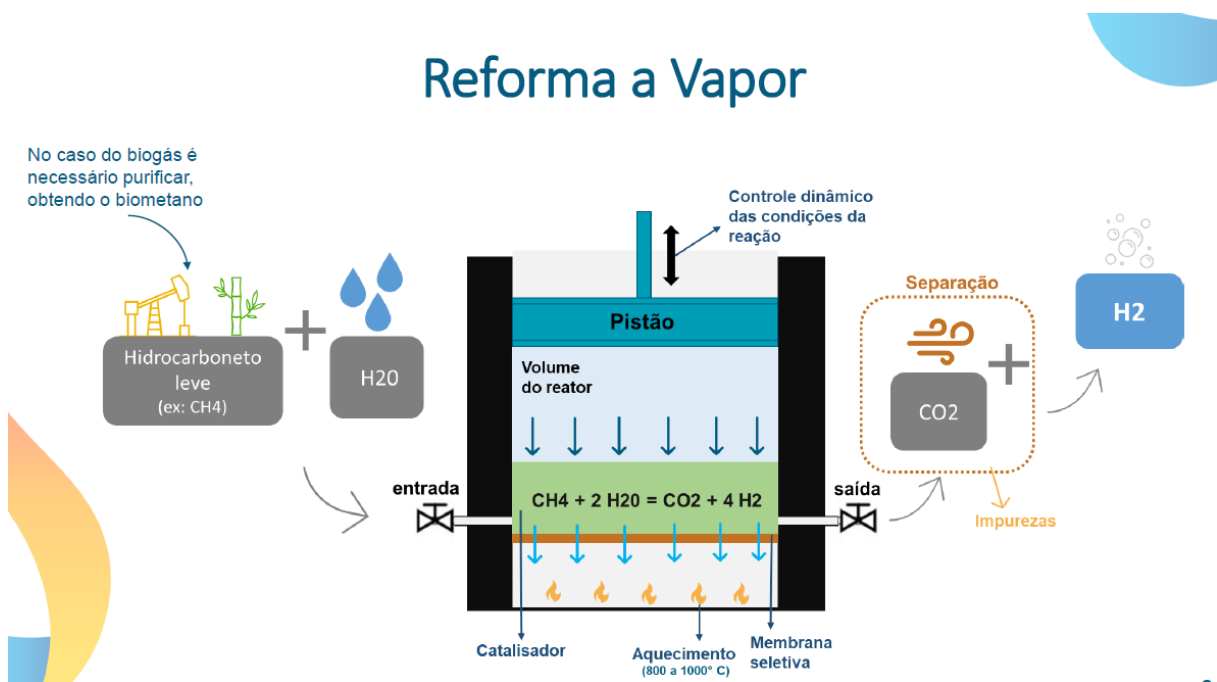
De acordo com Schultz e Soares (2023), a reforma seca e a reforma a vapor do metano são os processos mais pesquisados e estudados, ambos os processos têm sido amplamente pesquisados devido ao potencial do gás de síntese para muitas aplicações industriais.

A reforma a seco do biogás é uma técnica de reciclagem que transforma gases poluentes, como o metano e o dióxido de carbono, em insumos favoráveis para indústrias de biocombustíveis, como hidrogênio, resultando como produto o gás de síntese, formado por hidrogênio e monóxido de carbono, como mostrado na Equação 6. O processo não necessita de outros insumos como água e ar, como acontece na reforma a vapor (SCHULTZ; SOARES, 2014).



Outra abordagem é a produção de biometano, no qual o biogás é refinado e limpo de sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e outras impurezas. Posteriormente, o biometano é submetido à reforma a vapor, resultando em hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, é realizado um processo de purificação para a obtenção do hidrogênio verde, conforme a Figura 15. (CIBIOGÁS, 2023).

Figura 15 – Processo de reforma a vapor



Fonte: MME (2021a).

Os principais componentes para a realização da reforma a vapor de biogás são: o reator onde ocorre a reação de conversão do biogás em gás de síntese. Nele, o pistão conduz os reagentes (biogás e vapor d'água) para o reator e é responsável por transferir calor e energia mecânica para a reação química, o sistema de aquecimento é responsável por aquecer o reator a altas temperaturas, em torno de 800-1000°C, e geralmente utiliza-se a queima do próprio biogás. O catalisador é usado para acelerar a reação química que ocorre no processo de reforma a vapor. A membrana seletiva é utilizada para selecionar o biogás produzido na reação, permitindo que seja separado do restante dos gases e fornecido às aplicações desejadas (LI, Y. et al., 2017).

Nesse processo o metano reage com vapor de água, resultando na produção de monóxido de carbono e hidrogênio (Equação 7), em uma reação endotérmica que requer altas temperaturas (SCHULTZ; SOARES, 2014).

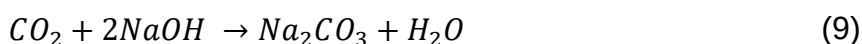


O monóxido de carbono gerado reage com vapor de água para produzir mais hidrogênio, em uma reação exotérmica conhecida como reação de deslocamento gás-água (Equação 8) (MEIRA et. al., 2016).



De acordo com Chen, Y., & Fan, Y. (2019), o hidrogênio produzido na reação é separado do dióxido de carbono por meio de um processo de purificação de gás de síntese, geralmente por meio de absorção em soluções alcalinas. De acordo com Couto et. al. (2015), a absorção em soluções alcalinas é um processo químico que envolve a reação dos gases ácidos com a solução alcalina, formando sais solúveis que são removidos do gás de síntese. A solução alcalina mais comumente utilizada é a solução de hidróxido de sódio (NaOH), que é capaz de remover até 99% do dióxido de carbono presente no gás de síntese.

De acordo com Han et. al. (2017), o dióxido de carbono reage com a base da seguinte forma, Equação 9:



Ou seja, o dióxido de carbono é capturado na solução na forma de carbonato de sódio. O hidrogênio, por outro lado, é inerte à solução alcalina e pode ser liberado como gás puro após a absorção do dióxido de carbono.

Atualmente, a produção em larga escala de hidrogênio é predominantemente realizada por meio da tecnologia de reforma a vapor, que é a rota tecnológica mais amplamente utilizada e de menor custo. Essa tecnologia apresenta alta eficiência, situando-se entre 70% e 85%, além de vantagens como baixa temperatura de processo (KALAMARAS, EFSTATHIOU, 2013; NIKOLAIDIS; POULLIKKAS, 2017).

4.2 Hidrogênio Verde a partir de Autoprodução

A autoprodução de energia elétrica é a produção de energia elétrica por um consumidor para uso próprio, com instalações de geração próximas à carga. Essa modalidade de geração de energia elétrica permite que o consumidor produza sua própria energia, seja por meio de fontes renováveis ou não renováveis, e a utilize exclusivamente no seu próprio consumo, podendo até mesmo vender o excedente para a rede elétrica. A autoprodução de energia elétrica tem ganhado cada vez mais destaque como uma alternativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável (HEAD ENERGIA, 2023).

Devido ao alto consumo de energia elétrica para a produção de hidrogênio, a autoprodução pode ser um modelo interessante por trazer vantagens como economia, controle total, flexibilidade, sustentabilidade e inovação. Empresas podem economizar custos de transporte e distribuição, ter controle total sobre o processo e adaptar a capacidade de produção de acordo com a demanda. Além disso, a autoprodução pode estimular a inovação tecnológica e garantir a sustentabilidade do processo, reduzindo impactos ambientais (LARA E RICHTER, 2023).

4.2.1 Vantagens da autoprodução de hidrogênio verde

O modelo de autoprodução de energia vem crescendo devido a fatores como a abertura do mercado livre de energia, o aumento nos custos de energia por conta da crise hídrica e da pandemia e a redução nos custos de geração de energia, especialmente energia solar fotovoltaica (HEAD ENERGIA, 2023).

Considerando o consumo de energia elétrica para a produção de energia elétrica, a modalidade de autoprodução de energia apresenta as seguintes vantagens:

- a) não incidência de encargos setoriais como: a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), os Encargos de Serviços do Sistema (ESS) e o Encargo de Energia de Reserva (EER) pode reduzir custos para os consumidores. Ao serem isentos, os custos cobrados nos encargos deixam de ser repassados para os consumidores, tornando as contas de luz mais baratas (BRASIL, 1996).
- b) desconto de 50 a 100% na tarifa de uso do sistema de transmissão (TUST) e distribuição (TUSD) para fontes renováveis, o que também reduz custos (BRASIL, 1996).
- c) possibilidade de vender energia excedente no mercado de curto prazo ou em contratos no mercado livre (BRASIL, 1996).
- d) autonomia e controle na geração de energia: O consumidor autoprodutor garante seu suprimento de energia e diminui ou elimina contratos com outros fornecedores (BRASIL, 1996).
- e) previsibilidade de custos: Autoprodutores eliminam riscos de instabilidade de preços de energia que impactam seus custos finais (BRASIL, 1996).
- f) Metas de sustentabilidade: Autoprodução com fontes renováveis atende às boas práticas ambientais e reduz emissões (HEAD ENERGIA, 2023).

A autoprodução de energia expande a capacidade de geração, agrega confiabilidade e flexibilidade ao sistema e, em alguns casos, descentraliza a geração, reduzindo sobrecarga (HEAD ENERGIA, 2023).

4.2.2 Regulamentação da Autoprodução

A autoprodução de energia tem uma história antiga, embora tenha ganhado maior destaque nas últimas décadas. No início do século XX, era comum empresas e consumidores produzirem sua própria energia elétrica devido à falta de uma rede centralizada (HEAD ENERGIA, 2023).

No Brasil, a autoprodução ganhou força nas décadas de 1980 com o Proálcool, quando usinas de cana-de-açúcar aproveitaram o bagaço para gerar sua própria energia (HEAD ENERGIA, 2023). A década de 1990 presenciou o surgimento da autoprodução como tendência, quando indústrias eletrointensivas investiram em pequenas hidrelétricas para baratear custos e quando o modelo foi regulamentado pela Lei 9.074/1995 e Decreto 2.003/1996 (HEAD ENERGIA, 2023).

A autoprodução de energia elétrica está regulamentada no ordenamento jurídico brasileiro, dentre os quais se destaca o Decreto 2.003/1996 que trouxe definições conceituais relevantes (Brasil, 1996a).

Art. 2º Para fins do disposto neste Decreto, considera-se:

I - Produtor Independente de Energia Elétrica, a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco;

II - Autoprodutor de Energia Elétrica, a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo; (Brasil, 1996a, p.1).

A Lei 9.427/1996, conforme alterada pela Lei 13.203/2015, concede desconto de 50% ou mais nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição para a energia injetada por aproveitamentos hidrelétricos de até 5 MW, solar, eólica, biomassa e cogeração qualificada de até 30 MW. O desconto incide na energia comercializada por esses empreendimentos ou destinada à autoprodução, desde que tenham entrado em operação comercial após 1º de janeiro de 2016 (BRASIL, 1996).

O Decreto nº 6.210/2007 estabelece uma limitação de carga para autoprodutores equiparados. De acordo com o artigo 2º:

Art. 2º Para fins da equiparação de que trata o art. 26 da Lei no 11.488, de 15 de junho de 2007, cada unidade de consumo a que se destina a energia

elétrica proveniente de Sociedade de Propósito Específico deverá ter demanda de potência igual ou superior a 3.000 kW (BRASIL, 2007a, p.1).

A Lei no 11.488/2007 equiparou o consumidor ao autoprodutor quando participa de SPE para produzir energia, desde que destinada ao seu consumo, total ou parcial. Cada unidade consumidora deve ter no mínimo 3 MW de demanda contratada. Essa equiparação permite obter os mesmos benefícios do autoprodutor (BRASIL, 2007).

4.2.3 Custos de Autoprodução de Hidrogênio Verde

A seguir, são realizadas algumas análises tendo como referência uma planta industrial de eletrólise para a produção de hidrogênio verde, com capacidade de 100 MW, semelhante à proposta pela Engie para o CIPP (CRUZ, 2021). O Complexo de Pecém possui duas conexões à rede básica (PECEM II-230 e PECEM II-500). Para fins deste estudo, será suposto que o ponto de conexão utilizado pelos empreendimentos de produção de hidrogênio é o de 500 kV (PECEM II-500).

4.2.3.1 Uso da Rede Básica

Por estar conectado na Rede básica, caso a planta de produção de hidrogênio verde se caracterize como um consumidor (não autoprodutor), este teria que pagar alguns encargos como: CDE, PROINFA, ESS e EER (HEAD ENERGIA, 2023). Esses encargos não possuem diferenciação entre ponta e fora.

A TUST CDE, segundo a REH Nº 3.175/2023 (ANEEL, 2023), é de 22,92 R\$/MWh. Considerando um consumo *flat* ao longo do dia, a energia consumida ao longo de um mês seria equivalente a $100 \text{ MW} \times 24 \text{ h} \times 30 \text{ dias} = 72.000 \text{ MWh}$. Assim, a Equação (10), traz o valor total pago referente a este encargo:

$$72.000 \text{ MWh} \times 22,92 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} = \text{R\$ } 1.650.240,00 \quad (10)$$

O valor referente a TUST PROINFA, divulgado na REH nº 3.147/2022, (ANEEL, 2022) é de 11,94 R\$/MWh. Logo o valor total do encargo referente ao PROINFA é:

$$72.000 \text{ MWh} \times 11,94 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} = \text{R\$ } 859.680,00 \quad (11)$$

Para o EER e ESS, necessita-se basear-se em projeções do mercado, pois não são divulgados os valores a serem pagos em R\$/MWh. Segundo TR Soluções (SOUSA, 2023), para o cenário de Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) piso (R\$ 69,04/MWh) o EER será próximo de R\$ 22,40/MWh para os agentes do mercado. Já o ESS, foi estimado com base no Infomercado mensal de abril/2023 (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023a) utilizando com base o valor total arrecadado e a carga total do mercado livre, assim, chega-se em um valor estimado de R\$ 3,98/MWh. As Equações 12 e 13 apresentam o total a ser pago por EER e ESS respectivamente.

$$72.000 \text{ MWh} \times 22,40 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} = \text{R\$ } 1.612.800,00 \quad (12)$$

$$72.000 \text{ MWh} \times 3,98 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} = \text{R\$ } 286.560,00 \quad (13)$$

De acordo com os resultados, considerando a planta de eletrólise de 100 MW de capacidade, e um consumo *flat*, caso a produção de hidrogênio verde seja realizada na modalidade de autoprodução, a redução de custos estimada pelo uso da rede seria na ordem de: $\text{R\$ } 1.650.240,00 + \text{R\$ } 859.680,00 + \text{R\$ } 1.612.800,00 + \text{R\$ } 286.560,00 = \text{R\$ } 4.409.280,00$.

Outro detalhe importante a se considerar é que, nas modalidades de autoprodução por outorga direta, consórcio e arrendamento, não há cobrança dos tributos PIS e COFINS, o que também pode gerar resultados expressivos de redução de custos com o uso da rede.

Também é importante observar que, quando a energia é de origem renovável/fontes incentivadas têm-se direito a um desconto que varia de 50% a 100% na TUST (BRASIL, 1996).

4.2.3.2 Aquisição de Energia

Uma planta de produção de hidrogênio verde pode escolher entre se tornar autoproductora ou adquirir energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL). Se a planta optar por se tornar autoproductora, ela será responsável por gerar e distribuir sua própria energia. Se a planta optar por adquirir energia no ACL, ela será responsável por negociar contratos de compra e venda de energia com fornecedores de energia. Uma boa estimativa de referência de preço da energia no ACL é o PLD. Assim, utilizando a média histórica do PLD dos últimos cinco anos (CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2023b) e o consumo identificado anteriormente, seria necessário desembolsar o valor apresentado na Equação (14) para a aquisição de energia:

$$72.000 \text{ MWh} \times 171,94 \frac{\text{R\$}}{\text{MWh}} = \text{R\$ } 12.379.502,77 \quad (14)$$

Em outras palavras, na condição de autoproductor, a planta de produção de hidrogênio verde (100 MW médio *flat*) obteria uma redução de custos de aproximadamente R\$ 12.379.502,77 mensais.

Porém como autoproductor, deve-se levar em consideração o CAPEX (*capital expenditure*) e OPEX (*operational expenditure*) necessários para o investimento no sistema de geração. De acordo com De Castro et.al. (2023), o custo de CAPEX refere-se as despesas de capital, ou seja, investimentos em bens de capital, como equipamentos, instalações e propriedades, OPEX refere-se as despesas operacionais, ou seja, gastos necessários para manter as operações da empresa funcionando. De acordo com EPE (2021b), os valores do CAPEX da fonte eólica variam entre R\$ 4.000/kW e R\$ 4.500/kW. Dessa forma, para o projeto analisado o CAPEX utilizado seria entre R\$ 400 milhões e R\$ 450 milhões. E para OPEX, o custo é de aproximadamente R\$ 80/kW.ano, resultando em R\$ 96 milhões por ano (EPE, 2021b).

Apesar dos custos elevados para investimento no parque gerador, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico (BNDES), uma das principais instituições financeiras do país, oferece diversas linhas de crédito para projetos de energia renovável, com condições bastante atrativas, como taxas de juros mais baixas e

prazos de pagamento mais longos. Essas linhas de crédito podem ser utilizadas para financiar a construção da usina, bem como para aquisição de equipamentos e tecnologias necessárias para o projeto. Para ter acesso a essas linhas de crédito, é preciso apresentar um projeto bem estruturado e em conformidade com as exigências do BNDES (BNDES, 2021).

Independente da forma de aquisição de energia (autoprodutor ou não), outro fato que se deve levar em consideração, são os custos associados à certificação de origem renovável da energia utilizada para a produção do hidrogênio verde. Um exemplo deste tipo de certificação é o *International Rec Standard* (I-REC) em português Certificados de Energia Renovável. Uma vez que toda a energia produzida, seja renovável ou não, é injetada no SIN para sua transmissão. Desta forma, ao receber energia da rede local, é impossível rastrear fisicamente sua fonte. Porém, é possível adquirir I-REC na mesma quantidade de energia consumida, comprovando assim sua origem renovável (ANDRADE, 2018). Este tipo de certificação tem ganhado força no contexto atual de transição energética mundial. No Brasil, temos o Programa de Certificação de Energia Renovável “REC Brazil”, uma iniciativa conjunta da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) e da Associação Brasileira de Energia Limpa (Abragel), com apoio da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), da Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia (ABRACEEL), e da Associação Brasileira de Biogás e de Biometano (ABiogás). Entretanto, a obtenção deste tipo de certificados acarretaria um custo adicional para a produção do hidrogênio verde. Segundo Vieira (2022), o custo de um I-REC pode variar desde algo em torno de 3,88 a 157,38 R\$/MWh. Por outro lado, na condição de autoprodutor, estes custos poderiam ser reduzidos, descontando-se a margem de lucro embutida no custo do I-REC.

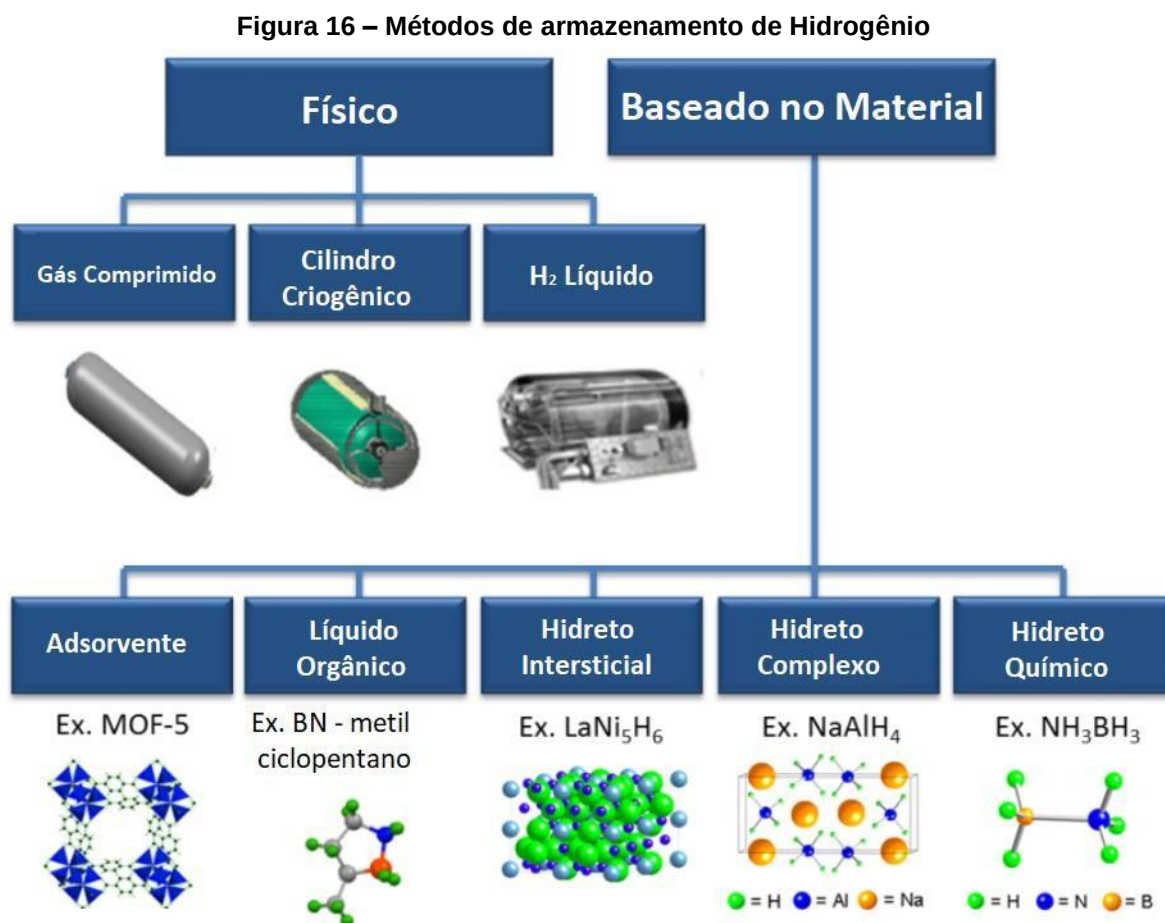
4.3 Armazenamento e Transporte

O hidrogênio é um elemento químico abundante e leve, e por ser um gás altamente inflamável, deve-se ter segurança em seu manuseio e em seu armazenamento.

Referente ao potencial de armazenamento de hidrogênio no Brasil, apresentam as seguintes possibilidades de acordo com o MME (2021a):

O hidrogênio possibilita o armazenamento eficiente de energia por longos períodos e pode ser utilizado para mobilidade e geração distribuída de energia. Além do uso direto do hidrogênio, o domínio de sua produção também agrega a geração de gás de síntese ($H_2 + CO$) necessário para o desenvolvimento de rotas alternativas para produção sintética e renovável de combustíveis, aproveitando a infraestrutura existente, melhorando o acesso a combustíveis em regiões remotas, com resultados locais diretos no desenvolvimento social, econômico e ambiental. (MME, 2021a, p. 6).

De acordo com Nunes (2010), o armazenamento do hidrogênio pode ser realizado através de processos físicos tais como, a compressão e a liquefação, e por meio de processos químicos como, hidretos metálicos e químicos (NUNES, 2010). Estes e outros métodos de classificação de armazenamento são apresentados na Figura 16.



Fonte: Adaptado de *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* (2022).

Existem diferentes métodos para armazenar o hidrogênio nos estados gasoso, líquido ou sólido. Alguns dos métodos mais comuns incluem o armazenamento como gás comprimido em tanques pressurizados, armazenamento como líquido em tanques criogênicos e armazenamento como sólidos em hidretos metálicos. Cada um desses métodos tem suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha do método de armazenamento mais adequado depende de fatores como a

quantidade de hidrogênio a ser armazenada, a finalidade do armazenamento e o custo da infraestrutura necessária (RUSMAN e DAHARI, 2016).

Os custos de transporte e armazenamento desempenharão um papel significativo na competitividade do hidrogênio. Quando o hidrogênio é utilizado próximo ao local de sua produção, os custos de transporte e armazenamento são reduzidos significativamente. Por outro lado, se o hidrogênio precisa ser transportado para longe antes de ser utilizado, os custos de transmissão e distribuição podem ser até três vezes maiores que o custo de produção do hidrogênio (IEA, 2019).

As principais razões para os usos atuais do hidrogênio estão em sua versatilidade química e alta reatividade. O hidrogênio é um gás leve e de altíssimo poder calorífico. Apesar dessa vantagem, a baixa densidade do gás dificulta o armazenamento e transporte, representando grandes desafios para seu uso como vetor energético universal (BÖLL, 2021).

4.3.1 Armazenamento de hidrogênio em hidretos metálicos

Os hidretos metálicos são compostos por hidrogênio e um metal, como lítio, magnésio ou alumínio, e têm capacidade para armazenar uma grande quantidade de hidrogênio em um espaço reduzido. Além disso, são capazes de liberar o hidrogênio de forma rápida (LUO et al., 2020).

Os hidretos metálicos podem ser divididos em três categorias: hidretos químicos, hidretos intersticiais e hidretos complexos. Cada categoria possui suas próprias características distintas e propriedades únicas. Os hidretos químicos são formados por meio de reações químicas entre hidrogênio e metais, enquanto os hidretos intersticiais são formados quando o hidrogênio se aloja nos espaços intersticiais da rede cristalina do metal. Já os hidretos complexos são formados quando o hidrogênio interage com íons metálicos em soluções líquidas (LUO et al., 2020).

Os hidretos complexos apresentam alta capacidade de armazenamento de hidrogênio em comparação com os hidretos convencionais. O alanoato de sódio (NaAlH_4) é um dos hidretos complexos mais estudados para o armazenamento de hidrogênio. apresenta capacidade teórica de absorção de hidrogênio total entre 5,6 e

7,5 % peso, o que é bastante alto comparado com outros materiais. O hidrogênio pode ser liberado do NaAlH_4 a partir de 100°C , o que é relativamente baixa em comparação com outros hidretos (RIIS, 2005).

Os hidretos químicos são uma classe de materiais que têm a capacidade de armazenar hidrogênio em estado sólido. Dentre eles, destaca-se o NH_4BH_4 , que pode ser termicamente decomposto em quatro reações, gerando cerca de 6% em peso de hidrogênio em cada uma. No entanto, essas reações são irreversíveis e o custo de regeneração do hidrogênio é alto (RIIS, 2005).

De acordo com Poveda (2007), hidretos intersticiais são uma classe de hidretos metálicos que se formam quando o hidrogênio se aloja nos espaços intersticiais (vazios) da estrutura cristalina dos metais. Esses hidretos apresentam uma estrutura cristalina modificada, com a inserção de átomos de hidrogênio nos interstícios da rede cristalina do metal. Um exemplo de hidreto intersticial é o LaNi_5H_6 é um material promissor para o armazenamento de hidrogênio devido à sua alta capacidade de absorção e liberação de hidrogênio. A densidade gravimétrica de hidrogênio no LaNi_5H_6 é de aproximadamente 1,5 - 2% em peso, o que é relativamente alto para um hidreto intersticial.

Segundo Neto (2022), no Brasil uma das técnicas mais estudadas para o armazenamento de hidrogênio é a absorção em hidretos metálicos, na qual o elemento é incorporado por metais. Essa abordagem tem sido objeto de investigação do Laboratório de Hidrogênio da COPPE/UFRJ, uma instituição de pesquisa de referência em tecnologia de hidrogênio tanto no Brasil quanto em âmbito internacional. Com o apoio de organizações como a Renault, CNPq e FAPERJ, o instituto conduz estudos sobre o uso de hidretos metálicos para armazenar o combustível (NETO, 2022).

Os hidretos metálicos permitem que o hidrogênio seja incorporado à estrutura química do metal, evitando a necessidade de altas pressões ou temperaturas extremas para operação. Com a liberação do hidrogênio dos hidretos metálicos em baixas pressões, essa técnica é considerada mais segura do que outros métodos de armazenamento. Walter José Botta, Professor do DEMa/UFSCar – Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, destaca o hidreto de magnésio como uma opção particularmente vantajosa devido à

sua alta capacidade de armazenamento, resistência à contaminação e menor custo e peso em comparação com outros tipos de hidretos (PLANETA COPPE NOTÍCIAS, 2018).

O magnésio, um metal cuja densidade é uma das menores dentre todos os metais e que é abundantemente encontrado na natureza, tem sido avaliado como uma opção potencialmente promissora para o armazenamento reversível de hidrogênio. Especificamente, os hidretos metálicos de magnésio, como o MgH_2 e o Mg_2NiH_4 , oferecem uma grande capacidade de armazenamento de Hidrogênio, com baixo impacto ambiental, tornando-os alvos de estudos devido à sua alta capacidade de armazenamento e reversibilidade (POVEDA, 2007).

O composto Mg_2Ni em sua forma de hidreto, Mg_2NiH_4 , apresenta uma capacidade de armazenamento de 3,6% em peso de hidrogênio quando exposto a uma temperatura próxima de 528 K (255 °C). Por outro lado, o hidreto de magnésio, MgH_2 , caracterizado pelo tipo de ligação e suas propriedades físicas como um hidreto de transição entre o iônico e o covalente, mostra a maior capacidade de armazenamento entre os hidretos reversíveis, atingindo 7,6% em peso de hidrogênio, o que se traduz em uma densidade energética de $9 \text{ MJkg}^{-1}\text{Mg}$ quando exposto a uma temperatura de aproximadamente 552 K (279 °C) (BOGDANOVIC, 1999).

Diferentemente dos métodos tradicionais de armazenamento de hidrogênio em tanques de alta pressão ou líquido em criogenia, a técnica de armazenamento em hidretos metálicos, ainda tem muito a ser explorado e aprofundado (POVEDA, 2007).

4.3.2 Armazenamento e transporte de hidrogênio comprimido

De acordo com Oliveira (2022), uma outra forma de armazenamento de hidrogênio é através da compressão ou liquefação do gás.

Para o armazenamento do hidrogênio na forma comprimida, são os mais comuns e mais desenvolvidos. São utilizados cilindros para realizar o armazenamento, onde esses cilindros podem ser fabricados de 4 formas:

Tipo 1: Produzidos totalmente de aço ou alumínio;

Tipo 2: Camada fina de alumínio ou aço envolto parcialmente por outro composto – geralmente fibras de carbono – em forma de circunferência;

Tipo 3: Fina camada de aço ou alumínio envolto totalmente por outros compostos como fibras de carbono; e

Tipo 4: Uma camada de plástico resistente envolto por outro composto também resistente (NETO, 2022).

Um dos mais utilizados é o cilindro com uma fina camada de aço ou alumínio e com alta resistência, pois, apresenta menos metal, tornando-se mais leve. Esse tipo de armazenamento, é utilizado por grande parte dos veículos movidos a células a combustível.

O transporte pode ser feito mediante a instalação de gasodutos, transporte rodoviário ou transporte marítimo. Para viabilizar a utilização de hidrogênio renovável, é necessário garantir uma transmissão e distribuição eficientes em termos de custos. A longo prazo, uma rede de dutos é a opção mais eficiente em termos de custos para a distribuição de hidrogênio, enquanto a curto e médio prazo, a configuração mais competitiva envolve a produção de hidrogênio no local ou próximo ao local de consumo, conectando regiões ricas em recursos a centros de demanda por meio de caminhões, trens, postos de abastecimento e usuários industriais menores. Para cobrir maiores distâncias, o transporte marítimo é uma opção, mas o hidrogênio precisa ser convertido para aumentar sua densidade (OLIVEIRA, 2022).

De acordo com De Castro et al. (2023), o hidrogênio pode ser transportado por gasoduto de diversas formas, dependendo do processo utilizado para produzi-lo. Uma das formas mais comuns de transporte é o hidrogênio comprimido, que é armazenado em tanques pressurizados e transportado através de gasodutos. O hidrogênio comprimido geralmente é transportado a pressões de 300 a 700 bar, o que permite que grandes quantidades de hidrogênio sejam transportadas em um espaço relativamente pequeno.

O transporte de hidrogênio comprimido via dutos é considerado a melhor alternativa técnica, econômica e ambientalmente. Isto se deve ao fato de que liquefazer o hidrogênio demanda quantidades substanciais de energia, cerca de 10 a 20 vezes mais do que a compressão, além disso, o processo também apresenta altos índices de perdas por evaporação (WULF et al., 2018).

O uso do gás tem diversos fins, tais como, a injeção de hidrogênio na rede de gás natural, como combustível para transporte, produção de energia, utilização em processos industriais e, principalmente, para exportação (OLIVEIRA, 2022).

As transportadoras de gás natural TAG, NTS e TBG são proprietárias e gestoras de gasodutos cujo interesse depende de uma política permitindo a mistura de hidrogênio em gás natural o que autoriza o aproveitamento da cadeia logística existente (DE CASTRO et al., 2023).

4.3.3 Armazenamento e transporte de hidrogênio liquefeito

Segundo Amoretti et al. (2002), o armazenamento criogênico, exige que o hidrogênio seja resfriado e deve ser mantido em baixas temperaturas, para que fique no estado líquido. Essa técnica é bem complexa e acaba ocorrendo a evaporação do hidrogênio que acaba se perdendo. Dessa forma o armazenamento criogênico do hidrogênio como combustível, apresenta poucas aplicações, uma delas é na utilização do combustível para lançamento dos foguetes (AMORETTI et al., 2002).

O transporte de hidrogênio por gasoduto é o hidrogênio liquefeito, que é armazenado em tanques criogênicos e transportado a temperaturas muito baixas (-253°C). O hidrogênio liquefeito apresenta uma densidade energética maior que o hidrogênio comprimido, o que significa que quantidades maiores de hidrogênio podem ser transportadas em um espaço menor. Assim, torna-se uma alternativa viável para atender às demandas elevadas e estáveis, sendo o modo mais eficaz de exportar o gás por meio de navegação marítima. (DE CASTRO et al., 2023).

Atualmente a maior parte do hidrogênio produzido no Brasil é transportado por caminhão-tanque em estado liquefeito a -253°C. Isso comprime bastante seu volume, facilitando o armazenamento e transporte. O transporte por caminhão-tanque envolve armazenar o hidrogênio em tanques especializados que são carregados em caminhões adaptados. Esses tanques precisam atender a requisitos de segurança, materiais e sistemas altamente específicos por causa das propriedades únicas do hidrogênio no estado liquefeito. Oferece vantagens em termos de volume transportado, mas há desvantagens em relação ao custo e velocidade do transporte (DE CASTRO et al., 2023).

4.3.4 Transporte de hidrogênio por amônia

De acordo com Lara e Richter (2023), uma opção adicional para o armazenamento e transporte de hidrogênio é através da amônia verde. A amônia é uma substância química amplamente produzida industrialmente e é útil para armazenar energia. A amônia verde é produzida utilizando hidrogênio gerado por meio de eletricidade renovável e processos sustentáveis. Além disso, a amônia tem uma densidade energética maior do que o hidrogênio, o que torna seu transporte e armazenamento mais prático. Portanto, a amônia tem potencial como forma compacta e estável de armazenar e transportar energia renovável.

O Processo Haber-Bosch é um processo químico de síntese de amônia, trata-se da reação de síntese entre nitrogênio molecular presente na atmosfera e hidrogênio, que tem como produto a amônia, sendo geralmente representada pela fórmula, Equação (15) (RIBEIRO, 2013):



Por meio desta reação, é possível produzir amônia em grandes quantidades, que pode ser utilizada em diversas aplicações, como armazenamento de energia renovável, combustível para motores, armazenamento de hidrogênio e transporte marítimo. A amônia verde tem potencial como uma forma compacta e estável de armazenar e transportar energia renovável, além de ser um importante insumo para a indústria química. (RIBEIRO, 2013).

Segundo a Fundação Heinrich Böll (2021), para transportar o hidrogênio em longas distâncias, como ocorre na exportação do Brasil para o mercado europeu, uma das alternativas mais interessantes para o uso do hidrogênio é a conversão deste elemento em amônia, onde envolve a produção de amônia a partir do hidrogênio e do nitrogênio, seguido da reconversão desta amônia em hidrogênio para o uso final. A amônia é um composto químico que pode ser facilmente liquefeito e transportado em grandes quantidades, além de possuir um alto teor de hidrogênio.

4.4 Utilização

De acordo com Borges (2021), a utilização do hidrogênio verde no Brasil é vista como uma alternativa promissora para a transição energética do país, que busca reduzir a dependência de combustíveis fósseis e reduzir o impacto das atividades econômicas no meio ambiente. O hidrogênio verde é uma fonte de energia renovável e limpa que tem potencial para ser utilizada em diversos setores, como transporte, indústria, geração de energia elétrica e na produção de fertilizantes.

4.4.1 Setor de Transportes

A aplicação do hidrogênio verde no setor de transporte é uma alternativa promissora para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (IEA, 2015).

O uso de hidrogênio verde no setor de transporte pode levar a reduções significativas nas emissões de carbono. O uso do hidrogênio verde como combustível no setor de transporte pode diminuir até 50% das emissões de dióxido de carbono em comparação com combustíveis fósseis convencionais (OLIVEIRA, 2022).

Em 15 de junho de 2015, o Brasil se tornou o primeiro país da América Latina a possuir três ônibus movidos a célula a combustível e uma estação de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio operando no transporte urbano de passageiros. O Projeto teve início na Eco-92 e recebeu financiamento do *Global Environment Facilities* (GEF), além da participação da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), Finep, Ministério de Minas e Energia (MME) e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD). O projeto no Brasil foi dividido em fases para redução dos riscos tecnológicos e econômicos, e um consórcio formado por empresas nacionais e internacionais implementou o projeto, incluindo, Marcopolo, BR Petrobras e Tuttotrasport (SARAIVA PANIK, 2021).

De acordo com a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos, 2015), o projeto de desenvolvimento do ônibus com células a combustível adotou uma abordagem em fases para gerenciar os riscos tecnológicos e econômicos envolvidos, onde as fases estão divididas da seguinte forma:

- a) Fase I: pré-viabilidade e estratégia proposta para introdução da nova tecnologia;
- b) Fase II: projeto de demonstração;
- c) Fase III: aumento de escala;
- d) Fase IV: desenvolvimento comercial e industrial.

As fases I e II foram concluídas com sucesso, com a construção do ônibus protótipo EMTU. As fases III e IV foram planejadas para motivar a produção em larga escala, o projeto visa demonstrar a viabilidade do hidrogênio verde como combustível para o transporte público em três cidades brasileiras: BR Petrobras (Rio de Janeiro - Brasil); Marcopolo (Caxias do Sul - Brasil); Tuttotrasporti (Caxias do Sul - Brasil) na Fase II e III (SARAIVA PANIK, 2021).

De acordo com o Diário do Transporte (2017), a EMTU comunicou que o projeto que tinha vigência até 31 de março de 2017, mesmo que o veículo não transportava passageiros, o projeto de ônibus movidos a hidrogênio foi um sucesso em São Paulo. Os três ônibus movidos a hidrogênio que foram testados em 2015 apresentaram bom desempenho e reduziram as emissões de poluentes. A empresa ainda destacou a importância da diversificação das fontes de energia no transporte público para reduzir as emissões de poluentes e melhorar a qualidade do ar nas cidades.

Além do transporte público, a Toyota anunciou que produzirá no Brasil o Mirai, um carro elétrico movido a hidrogênio já em circulação em outros países. A produção começará em 2023 em uma fábrica construída em parceria com a empresa brasileira de energia elétrica EDP. O objetivo é reduzir as emissões de gases de efeito estufa no país e estimular o desenvolvimento da tecnologia de hidrogênio verde no Brasil. O carro deve estar disponível para venda por volta de 2025 (RIBEIRO, 2023).

O uso do hidrogênio verde também está sendo explorado no setor de logística, montadoras de veículos estão testando caminhões movidos por células de hidrogênio como uma opção mais limpa para o transporte de cargas. A Volvo e a Daimler já estão testando caminhões movidos por células de hidrogênio, enquanto a Hyundai e a Toyota já têm caminhões movidos por hidrogênio em operação em outros

países. O uso de hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, é visto como um caminho importante para a descarbonização do setor de transportes. O uso de hidrogênio em veículos comerciais é vantajoso em termos de autonomia, tempo de abastecimento e custo, segundo a mentora de Hidrogênio da SAE Brasil, Mônica Saraiva Panik (UOL, 2022).

Destaca-se também o setor de transporte, aviões e navios, em que o transporte naval pode se beneficiar da utilização de amônia verde, isso se deve, principalmente, à alta densidade energética da amônia e ao armazenamento mais simples que ela possibilita. Esta alternativa pode ser vantajosa para a descarbonização do tráfego de contêineres até 2030, pois se mostra como uma opção de baixo custo e grande benefício. Já o setor da aviação está encarando o desafio de desenvolver tecnologia que possa impulsionar aeronaves de todos os tamanhos com hidrogênio líquido. Uma alternativa para isso é trocar o querosene de aviação por combustíveis sintéticos que são uma classe de combustíveis gasosos e líquidos, produzidos a partir de hidrogênio e carbono, formados a partir de hidrogênio verde, que produzem menos carbono (BEZERRA, 2021).

4.4.2 Geração de Energia

O hidrogênio é um combustível que pode ser usado para produzir energia de várias maneiras, como células a combustível, turbinas a gás, motores de combustão interna e queima direta. As células a combustível convertem a energia química do hidrogênio e oxigênio em eletricidade. Existem dois tipos comuns de células a combustível: células de óxido sólido (SOFC) e Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) (Bonifácio et al., 2011). As células PEMFC requerem conjuntos eletrodo-membrana-eletrodo (MEA) para gerar energia elétrica a partir de hidrogênio e oxigênio (Bonifácio et al., 2011).

As turbinas a gás também podem queimar hidrogênio para produzir eletricidade, substituindo o gás natural como combustível. Essas turbinas modificadas podem atingir eficiências de 40-60% na geração de eletricidade (Wendt et al., 2000).

Os motores de combustão interna podem ser adaptados para queimar hidrogênio em vez de gasolina ou diesel. Esses motores atingem eficiências de 30-

45% na produção de energia mecânica. A queima direta de hidrogênio produz calor e energia térmica, adequada principalmente para aplicações que exigem calor, como processos industriais. Em termos de sustentabilidade e eficiência, as opções mais recomendadas são as células a combustível e as turbinas a gás. Essas tecnologias têm baixas emissões e são consideradas mais sustentáveis (Wendt et al., 2000).

O Brasil possui vastos recursos naturais e uma grande capacidade instalada de energia hidrelétrica, eólica e solar, o que torna o país promissor para a utilização de hidrogênio verde na geração de energia (CNI, 2022). O hidrogênio verde é uma tecnologia promissora para a armazenagem de energia e a utilização de fontes renováveis, podendo ser usado para armazenar energia em períodos de alta produção e baixa demanda de energia elétrica, além de gerar energia elétrica de forma limpa e eficiente (FGV, 2023).

Para atingir as metas do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global abaixo de 2°C, muitos países e organizações têm como objetivo atingir emissões líquidas zero até 2050. Para alcançar essa meta, soluções de armazenamento de energia são necessárias, e o hidrogênio é apontado como uma alternativa promissora, já que pode armazenar energia produzida fora de horários de pico e fornecê-la à rede elétrica durante períodos de maior demanda (BNDES, 2021).

A mudança para um modelo energético mais sustentável exige a superação de desafios, tais como a variabilidade e a intermitência das fontes renováveis de energia e o equilíbrio entre o suprimento e a demanda de energia. Para atender a essas necessidades, a solução está na adoção de um vetor energético que permita a desassociação entre a produção e o consumo de energia, e permita o armazenamento e transporte para uso como matéria-prima e geração de energia. O hidrogênio verde apresenta todos os requisitos necessários para se tornar o vetor energético que permitirá a transformação do modelo energético atual para uma matriz de utilização plena das fontes renováveis de energia (EPE, 2021a).

Estima-se que a demanda global por hidrogênio pode aumentar de cerca de 90 milhões de toneladas em 2020 para cerca de 530 milhões de toneladas em 2050, sendo que 17% do hidrogênio produzido pode ser usado como forma de armazenar energia para estabilizar sistemas de geração de eletricidade provenientes

de fontes renováveis, como solar e eólica, que são caracterizadas por sua variabilidade (IEA, 2021b).

4.4.3 Exportação

A produção e exportação de hidrogênio verde no Brasil podem trazer diversos benefícios econômicos e ambientais. A demanda global por hidrogênio verde deve aumentar significativamente nos próximos anos, devido às metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris e às iniciativas de descarbonização em todo o mundo (EPE, 2021a).

A competitividade internacional da exportação direta de hidrogênio verde está diretamente relacionada ao custo de sua distribuição, condicionamento e transporte para os principais mercados consumidores. Assim, a produção dessa forma de hidrogênio deve ocorrer próxima aos principais corredores de exportação, como as áreas próximas a portos, para que seja possível realizar um transporte eficiente e sem custos significativos. Isso permitirá que o custo de colocação do hidrogênio verde nacional nos mercados internacionais seja competitivo (BÖLL, 2021).

A União Europeia depende fortemente do gás natural importado da Rússia para atender suas necessidades energéticas, aproximadamente 40% das importações de gás da União Europeia vêm da Rússia (BBC, 2022). A Rússia foi isolada internacionalmente por invadir a Ucrânia, a União Europeia está empenhada em reduzir sua dependência do gás natural russo e, como resultado, está gerando investimentos significativos na construção de um mercado para o hidrogênio de baixo carbono, uma das alternativas consideradas é o hidrogênio verde, com isso o Brasil pode se beneficiar dessa demanda ao exportar hidrogênio verde (EXAME, 2022).

O Brasil possui vantagens estratégicas, como potencial de energia renovável, condições climáticas e geográficas favoráveis e metas de redução de poluentes, e pode se destacar nesse mercado. Essa transição para o hidrogênio verde resultaria em um mercado global estimado em US\$ 2,5 trilhões, o que pode representar uma grande oportunidade para o Brasil em termos de desenvolvimento e posição no cenário mundial. (ENERGY FUTURE, 2022).

O Brasil é visto pela Alemanha como um possível exportador de energia, principalmente em termos de hidrogênio verde. A presença de empresas alemãs no Brasil é um fator importante que favorece essa parceria (UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA, 2022).

O investimento de US\$ 27 bilhões em portos brasileiros para a produção de hidrogênio verde tem sido concentrado em três principais locais: Pecém, no Ceará; Suape, no Pernambuco; e Açu, no Rio de Janeiro. Estes lugares oferecem uma série de vantagens para a implementação desta cadeia industrial, como a logística de exportação, a proximidade de zonas industriais e a disponibilidade de fontes de energia alternativa para a eletrólise que cria o hidrogênio verde (OLIVEIRA, 2022).

Com o objetivo de impulsionar a produção e exportação de hidrogênio verde, o Brasil tem firmado parcerias internacionais. Em 2021, o país assinou um acordo com a Alemanha para o desenvolvimento de projetos conjuntos de produção e uso de hidrogênio verde, com investimentos de até € 1 bilhão. A Alemanha é um dos maiores consumidores de hidrogênio verde do mundo e essa parceria pode abrir portas para o Brasil se tornar um importante player no mercado internacional. O país possui um grande potencial para a produção de hidrogênio verde, uma vez que possui uma das maiores matrizes energéticas renováveis do mundo. A parceria com a Alemanha pode contribuir para a diversificação da matriz energética do Brasil, promover a geração de empregos e o desenvolvimento tecnológico (NETO, 2023).

4.4.4 Fertilizantes

No Brasil, o setor de fertilizantes tem se mostrado um campo promissor para a aplicação do hidrogênio verde, principalmente devido à crescente demanda por produtos agrícolas, o país possui um papel significativo no mercado global de fertilizantes, uma vez que é um dos maiores produtores e exportadores agrícolas do mundo. O setor agropecuário brasileiro registrou um crescimento de 2% em 2019, tornando-se o único dos três principais setores econômicos (agropecuária, serviços e indústria) a apresentar expansão. Esse setor contribuiu com 6,8% para o PIB do país em 2020 (IBGE 2021).

Atualmente, a produção de fertilizantes nitrogenados consome uma grande quantidade de hidrogênio, ficando atrás apenas da indústria de refino. Quase toda essa produção é baseada no uso de gás natural como matéria-prima, sendo que o processo dominante é a reforma a vapor desse gás para a produção de hidrogênio. Esse hidrogênio é então utilizado no processo Haber-Bosch para a produção de amônia (CNI, 2022), que é um componente essencial para a fabricação de fertilizantes nitrogenados. No setor de fertilizantes, o hidrogênio verde pode ser utilizado como matéria-prima alternativa para a produção de amônia (RIBEIRO, 2013).

O Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes nitrogenados no mundo. Em 2018, 35 milhões de toneladas foram consumidas, sendo que 80% foram importadas. Esta grande dependência da variação de preços internacionais de fertilizantes contribui para a balança comercial de produtos químicos, impactando diretamente nos custos dos grãos devido ao preço de importação e logística. O aumento ou a redução do preço do gás natural influencia diretamente na construção de plantas fertilizantes no país (EPE, 2019).

No Brasil, o gás natural é historicamente mais caro do que no mercado internacional. Por isso, a produção nacional de fertilizantes tem dificuldade para competir com importações. O país importa 85% dos fertilizantes nitrogenados usados na agropecuária. Isso significa que o setor fica sujeito a variações na taxa de câmbio e nos preços internacionais de gás natural. Apesar da baixa produção, as fábricas de fertilizantes são a segunda maior consumidora de hidrogênio no Brasil, com cerca de 1.200 milhões de Nm³ ou 87 mil toneladas por ano (CNI, 2022). Além disso, o custo de transportar fertilizantes até o consumidor final é alto. De acordo com a Parceria Energética Brasil-Alemanha, fábricas de fertilizantes e refinarias no Brasil produziram cerca de 4.400 milhões de Nm³ de hidrogênio em 2018, o equivalente a 320 mil toneladas. O custo de transportar fertilizantes desde fábricas no Nordeste ou portos de importação até as principais regiões agrícolas do país é muito caro. Por isso, produzir amônia localmente a partir de hidrogênio verde, próximo às áreas agrícolas, é uma grande oportunidade (CNI, 2022).

De acordo com a Engie (2022), a Unigel, maior produtora nacional de amônia tradicional, anunciou a construção de uma fábrica de hidrogênio verde, com investimento previsto de US\$ 120 milhões, na cidade de Camaçari, Bahia. A

capacidade de produção da unidade será de 10 mil toneladas anuais de hidrogênio verde que serão convertidas em 60 mil toneladas de amônia verde. A partir de 2025, a empresa planeja aumentar a produção para 40 mil toneladas de hidrogênio verde, o que corresponderia a 240 mil toneladas de amônia verde.

4.5 Regulamentação e Discussões em Andamento

Embora o Brasil possua um grande potencial para desenvolver a economia do hidrogênio, o país ainda precisa avançar na criação de estratégias, políticas públicas e incentivos para incentivar a consolidação desse novo mercado. Nesse sentido, a disseminação do conhecimento, a comunicação sobre projetos dedicados ao hidrogênio e a apresentação de resultados são atividades consideradas relevantes para ampliar o apoio, o investimento e o uso desse novo vetor energético e combustível renovável (CHANTRE et al., 2022).

De acordo com a nota técnica “Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio” divulgada pela EPE, é possível desenvolver projetos de hidrogênio verde em condições e locais específicos, explorando nichos competitivos. No entanto, a EPE destaca a importância de estabelecer um arcabouço institucional, legal e regulatório adequado para o uso energético do hidrogênio, a fim de garantir a segurança tanto da indústria quanto dos consumidores envolvidos nesse mercado (EPE, 2021a).

Nesse cenário, a regulação do setor elétrico no Brasil é consistente e tem acompanhado e incentivado o desenvolvimento do setor, o que é um ponto positivo para a produção de hidrogênio verde. No setor de gás natural, a publicação do Marco Regulatório do setor de gás (Lei nº 14.134/2021) instituiu normas para a exploração das atividades econômicas de transporte de gás natural por meio de condutos e para a importação e exportação de gás natural, além da exploração das atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural.

Vale ressaltar que há pontos nessa lei que podem ter impacto no setor de hidrogênio. De acordo com as especificações estabelecidas pela ANP, gases que não se enquadrem na definição de gás natural ainda podem receber tratamento equivalente. Isso significa que o hidrogênio pode ser incluído no Marco Regulatório do

setor de gás, o que pode alterar seu tratamento atual como produto industrial e torná-lo sujeito a análises de contratos de comercialização e transporte (CHANTRE et al., 2022).

As cláusulas referentes aos gasodutos de transporte não contemplam a possibilidade de compartilhamento entre o gás natural e o hidrogênio. No entanto, considerando que um dos objetivos da nova lei é estimular o investimento em novos gasodutos, o compartilhamento entre esses gases poderia ser benéfico para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio e importante para viabilizar a instalação de novos gasodutos, aumentando sua ocupação (CHANTRE et al., 2022).

Segundo CHANTRE et al. (2022), a ANP prevê a autorização para a atividade de estocagem subterrânea de gás natural. Entretanto, não há previsão para a extensão dessa cláusula à estocagem de hidrogênio, o que poderia ser importante para o desenvolvimento do mercado desse gás.

A manutenção dos regimes de consumo de gás natural é garantida em unidades de produção de fertilizantes e instalações de refino de petróleo existentes em 5 de março de 2009. No entanto, não há previsão para a utilização do gás natural na produção de hidrogênio cinza para o mercado industrial, o que pode dificultar sua introdução em outros segmentos. A falta de uma estratégia nacional clara é apontada como um obstáculo significativo, já que uma política pública definida poderia estimular a produção do hidrogênio verde e incentivar tecnologias específicas através de incentivos fiscais. A ausência de um plano de descarbonização nacional é identificada como uma lacuna nas políticas públicas que pode afetar investimentos no setor elétrico e de transportes (CHANTRE et al., 2022).

Em 2022, a CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica) lançou a primeira certificação brasileira de hidrogênio renovável. O objetivo é garantir a origem renovável e as emissões de gases de efeito estufa do hidrogênio produzido no Brasil, considerando a fonte de energia elétrica renovável usada no processo (CCEE, 2022).

A certificação define critérios e metodologias para verificar a cadeia de produção do hidrogênio renovável, aumentando a confiabilidade e transparência do mercado. Isso pode apoiar o desenvolvimento da nova cadeia de valor do hidrogênio no Brasil. Os certificados emitidos pela CCEE podem ser usados pelos produtores

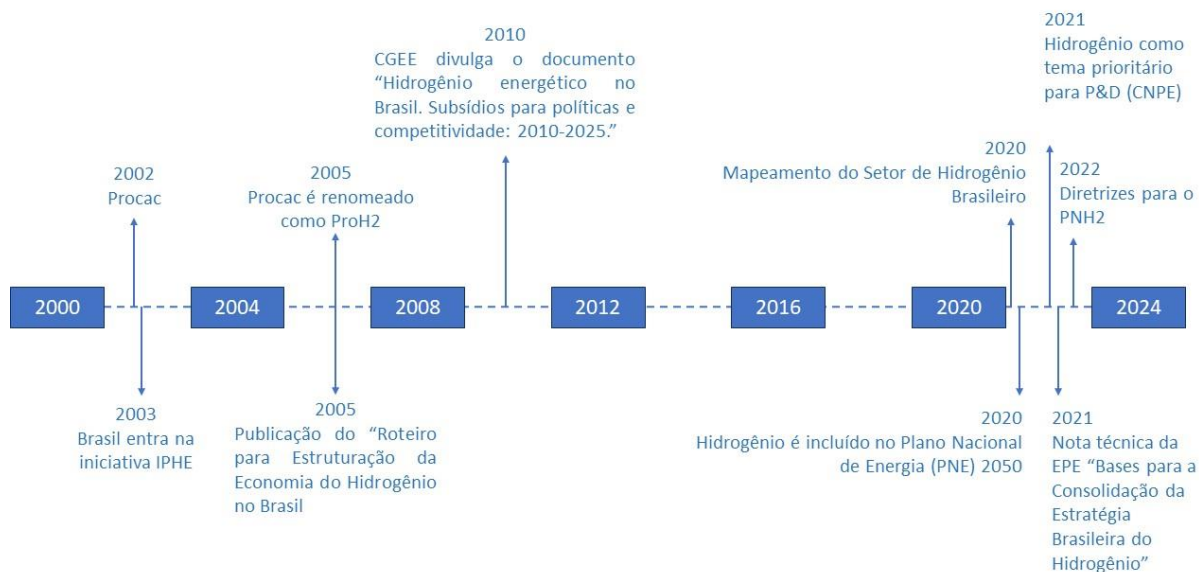
para provar o teor renovável do hidrogênio que vendem, apoiando futuros mercados e projetos (CCEE, 2022).

Atualmente, o Brasil não possui normas específicas para o hidrogênio em seu âmbito regulatório. No entanto, a ABNT deu início à discussão sobre a normatização das tecnologias de hidrogênio através da Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio (ABNT/CEE 067). A normatização abrange os sistemas e dispositivos para produção, armazenamento, transporte, medição e uso do hidrogênio, assim como as pilhas a combustível (ABNT, 2021).

4.6 Iniciativas e Cenário Atual no Brasil

Com relação às perspectivas futuras, há uma variedade de iniciativas que merecem destaque. Em 2021, foi firmado um Memorando de Entendimento (MoU) entre o Governo do Estado do Ceará, a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), com o intuito de desenvolver políticas públicas para energias renováveis, a fim de contribuir para o desenvolvimento do hub de hidrogênio verde no Ceará e atrair novos investidores (EPE, 2021a).

Desde então, o CIPP estabeleceu dois pré-contratos com a *Fortescue Future Industries* e AES, além de vários Memorandos de Entendimento com o governo estadual e empresas como AES Brasil, Linde, Qair, *TransHydrogen Alliance*, Eren do Brasil, Casa dos Ventos, Engie, EDP Renováveis e White Martins (MACHADO, 2022). De acordo com De Castro et al. (2023), atualmente, a EDP Renováveis está implementando uma instalação de eletrólise de 1,25 MW no local da Usina Termelétrica do Pecém, que consumirá energia solar a ser instalada em uma área próxima. Levando em conta o contexto exposto, a Figura 17 sintetiza as principais iniciativas realizadas no Brasil no que se refere à economia do hidrogênio, desde o ano 2000.

Figura 17 – Principais iniciativas brasileiras sobre hidrogênio

Fonte: Adaptado de DE CASTRO et al. (2023).

No ano de 2002, o governo brasileiro criou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Célula a Combustível (ProCaC) com o objetivo de desenvolver e implementar tecnologias de hidrogênio de forma comercial, através do Ministério da Ciência e Tecnologia (DE CASTRO et al., 2023).

De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia (2023), o ProCaC foi um importante passo para o Brasil avançar na busca por alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis, alinhando-se com as tendências globais de desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e com menor impacto ambiental. O programa contou com diversas parcerias entre instituições de pesquisa, empresas, universidades e governo, visando a promoção do conhecimento e da capacitação técnica para o setor.

Em 2003, o Brasil aderiu à Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE), uma iniciativa que conta com a participação de diversos países e que é promovida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Essa adesão impulsionou novas iniciativas e avanços significativos para o Brasil no início dos anos 2000 (LUBE, 2012; CGEE, 2010).

De acordo com De Castro et al. (2023), a adesão à IPHE permite o compartilhamento de conhecimentos e a colaboração com outros países no desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras. Além disso, a participação na IPHE amplia o diálogo entre diferentes setores da sociedade, incentivando a criação

de políticas públicas e estratégias empresariais para promover o uso do hidrogênio como fonte energética. Essa participação também contribui para a consolidação do Brasil como um importante ator no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

Em 2005, o ProCaC foi rebatizado como Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2), com o intuito de impulsionar o desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio e às células a combustível no Brasil (CGEE, 2010). Mesmo tendo o financiamento descontinuado em alguns casos, os projetos originados a partir dos programas ProCaC e ProH2 têm gerado resultados positivos até os dias de hoje (DE CASTRO et al., 2023).

Com o amadurecimento das iniciativas e parcerias até então estabelecidas, o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou o "Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil", que apresentou uma análise do desenvolvimento de toda a cadeia produtiva, desde a produção a partir de recursos renováveis até o uso final, especialmente no setor industrial (DE CASTRO et al., 2023).

Em 2010, o Brasil contribuiu com a elaboração do documento intitulado "Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para Políticas de Competitividade: 2010-2025", coordenado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Em 2020, no âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha, o MME desenvolveu o estudo intitulado "Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para Hidrogênio Verde", que ofereceu uma visão geral da indústria e dos principais atores acadêmicos e institucionais atuantes no Brasil na área de hidrogênio (DE CASTRO et al., 2023).

Em 2020, O Plano Nacional de Energia 2050 identificou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e de grande interesse para a descarbonização da matriz energética, listando diversas aplicações e usos dessa fonte energética, além de apresentar recomendações para a política energética (DE CASTRO et al., 2023).

2021, A EPE publicou um documento intitulado "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio", que aborda diversos aspectos relacionados a essa fonte de energia, tais como o panorama do mercado, as rotas tecnológicas, os custos, os desafios, o papel do hidrogênio na transição energética e as implicações para políticas públicas (DE CASTRO et al., 2023).

Em seguida, através da Resolução CNPE no 6/2022, foi instituído o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria de hidrogênio como vetor energético no Brasil. Além disso, a resolução estabeleceu a governança do programa, sob a coordenação do MME. Entre os princípios do PNH2, destacam-se o reconhecimento da diversidade de fontes energéticas e tecnologias disponíveis ou potenciais, a busca de sinergias com outros países e a promoção da descarbonização da economia (MME, 2022).

4.6.1 Programa Nacional do Hidrogênio

O PNH2, estabelecido pelo Governo Federal brasileiro, tem como propósito impulsionar o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio como uma fonte de energia limpa e renovável. O objetivo central do PNH2 é aumentar a participação do hidrogênio na matriz energética do Brasil, incentivando seu uso em setores estratégicos e estimulando a criação de novos negócios e oportunidades de emprego (MME, 2021a).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021a), responsável por elaborar estudos e projetos para a implementação do PNH2, o Brasil possui um grande potencial para a produção e utilização do hidrogênio, tanto em termos de recursos naturais quanto de expertise técnica. A EPE destaca que o país possui uma das maiores reservas de urânio do mundo, o que pode viabilizar a produção de hidrogênio por meio de energia nuclear. Além disso, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de etanol, um importante insumo para a produção de hidrogênio renovável.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é outra organização que participa do PNH2, regulamentando e fiscalizando as atividades relacionadas ao hidrogênio no setor elétrico. A ANEEL destaca a importância do hidrogênio como uma fonte de energia complementar às fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica (MME, 2021a).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) também destaca a importância do PNH2 na promoção da integração entre os diversos setores da economia, como o transporte, a indústria e a geração de energia. A CCEE ressalta a necessidade de políticas públicas e incentivos fiscais para estimular a produção e o

uso do hidrogênio, bem como a importância da cooperação internacional para o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio (MME, 2021a).

O PNH2 visa aumentar a competitividade e participação do hidrogênio na matriz energética brasileira, devido a sua importância econômica, social e ambiental para o desenvolvimento sustentável do país (MME, 2021a).

A Resolução CNPE nº 6/2022 apresenta os fatores motivadores e orientadores para o PNH2 no Brasil, destacando a importância do hidrogênio como vetor energético e a diversidade de fontes e aplicações na economia. Os princípios do Programa incluem:

- a) valorizar o potencial nacional de recursos energéticos;
- b) ser abrangente, considerando a diversidade de fontes e tecnologias;
- c) alinhar-se às ambições de descarbonização da economia;
- d) valorizar e incentivar o desenvolvimento tecnológico nacional;
- e) almejar o desenvolvimento de um mercado competitivo;
- f) buscar sinergias e articulação com outros países;
- g) reconhecer a contribuição da indústria nacional.

O PNH2 visa promover o desenvolvimento conjunto de três pilares fundamentais: políticas públicas, tecnologia e mercado. Esses pilares interdependentes precisam evoluir de forma síncrona para acelerar a obtenção dos resultados desejados (MME, 2021a).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2021a), políticas públicas são fundamentais para garantir um ambiente regulatório e institucional favorável ao desenvolvimento da economia do hidrogênio. Isso inclui incentivos à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias, programas de financiamento para investimentos em infraestrutura e produção de hidrogênio, além de medidas de incentivo fiscal e tributário para estimular a adoção do hidrogênio como fonte de energia limpa e renovável.

A tecnologia é outro pilar importante para o desenvolvimento da economia do hidrogênio. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), o avanço tecnológico é essencial para tornar a produção, armazenamento, transporte e

uso do hidrogênio mais eficiente e economicamente viável. Isso inclui o desenvolvimento de tecnologias de eletrólise que permitem a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis de energia, bem como tecnologias de armazenamento e transporte de hidrogênio.

Por fim, o terceiro pilar, mercado, é fundamental para garantir a viabilidade econômica da economia do hidrogênio. A IEA destaca a importância da criação de demanda para o hidrogênio em setores estratégicos da economia, como o transporte, a indústria e a geração de energia, além do estabelecimento de um mercado global para o hidrogênio, com a definição de padrões e regulamentações para o comércio internacional (IEA, 2021).

4.7 Desafios

Apesar da promessa do hidrogênio verde como alternativa às fontes de energia não renováveis no curto, médio e longo prazo, existem desafios relacionados ao seu preço, transporte, distribuição e armazenamento que precisam ser superados para que seja possível implementá-lo (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2022).

4.7.1 Desafios relacionados ao preço

Produção de Hidrogênio Verde: Atualmente, a produção de hidrogênio verde é mais cara do que a do hidrogênio azul. No entanto, estima-se que os custos de produção possam cair significativamente nos próximos anos. Por isso, a paridade entre os custos destes dois tipos de hidrogênio é prevista para ocorrer nos próximos quinze anos;

Investimentos em Escala: Investimentos em grande escala estão sendo direcionados para regiões com grande potencial para a produção de energia eólica e solar. Países como China, Mongólia, Austrália, Marrocos e Chile estão recebendo destaque, como no projeto "Haru Oni" no Chile, que contará com investimentos do governo alemão para a produção de combustível de neutralidade climática a partir de hidrogênio produzido a partir de energia eólica e dióxido de carbono capturado do ar;

Diminuição dos Custos: Estimativas mostram que os custos de produção do hidrogênio verde podem cair 62% até 2030, chegando a um custo entre US\$ 1,4 e

US\$ 2,3 por quilo. Se isso ocorrer, a paridade entre o preço do hidrogênio verde e do hidrogênio cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034. Algumas projeções mostram que os custos podem cair até US\$ 1 por quilo em 2040.

Com o aumento dos investimentos em energias renováveis e com a previsão de queda nos custos de produção do hidrogênio verde, pode-se esperar que a cadeia produtiva de hidrogênio verde se expanda nos próximos anos, tornando-se viável economicamente.

4.7.2 Desafios relacionados à distribuição e ao armazenamento:

Desafios de Armazenamento: O armazenamento do hidrogênio apresenta grandes desafios, uma vez que é altamente volátil e inflamável. Contudo, existem algumas formas seguras de armazenar o gás, como liquefazê-lo, diluí-lo em gás natural ou agregá-lo à amônia.

Transmissão de Gás: As tubulações de gás natural já existentes podem servir para transmitir o hidrogênio diluído. Como a capacidade de transmissão é dez vezes maior do que a de uma linha elétrica, o potencial é alto. Além disso, o custo é consideravelmente menor.

4.7.3 Desafios relacionados aos transportes:

Impacto das Emissões de dióxido de carbono do Setor de Transportes: O setor de transportes é responsável por 24% das emissões globais de dióxido de carbono, com combustíveis fósseis como gasolina e diesel, gerando 3/4 das emissões. Por isso, vários países estão trabalhando para zerar as vendas de veículos poluentes até 2035.

Objetivos da Indústria Automobilística: A indústria automobilística mundial tem como objetivo ter 4,5 milhões de veículos movidos a bateria limpa rodando até 2030, com China, Japão e Coreia do Sul à frente. Além disso, 10,5 mil postos de abastecimento de hidrogênio serão construídos para a nova frota.

Descarbonização do Transporte Naval: No transporte naval, a amônia verde pode ser usada para impulsionar navios de carga. Esta solução é a mais econômica para a descarbonização do tráfego de contêineres até 2030.

Descarbonização do Transporte Aéreo: Para o transporte aéreo, o desafio é desenvolver tecnologia capaz de impulsionar aeronaves de pequeno a grande porte com hidrogênio líquido. Outra possibilidade é substituir o querosene de aviação por combustíveis sintéticos, à base de hidrogênio verde, com menos emissão de carbono.

O setor de transportes é responsável por grande parte das emissões globais de dióxido de carbono, sendo necessário desenvolver tecnologias de energia limpa para a descarbonização do transporte. A indústria automobilística está objetivando a expansão da frota de veículos movidos a bateria limpa e o setor naval está usando amônia verde para impulsionar navios de carga. No transporte aéreo, o hidrogênio líquido e combustíveis sintéticos à base de hidrogênio verde podem ser alternativas para descarbonizar a aviação (PORTAL HIDROGÊNIO VERDE, 2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se, que o Brasil se destaca como um país com grande potencial para a exploração do hidrogênio verde. Sua matriz energética predominantemente renovável proporciona uma base sólida para a produção e utilização desse recurso, o que pode resultar em benefícios significativos, como a redução das emissões de GEE e a construção de uma matriz energética mais sustentável. Através do aproveitamento desse potencial, o Brasil tem a oportunidade de se posicionar como um protagonista na transição energética global, impulsionando a descarbonização de setores fundamentais da economia e contribuindo para um futuro mais sustentável.

O hidrogênio verde pode desempenhar um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono e no cumprimento das metas do Acordo de Paris. O hidrogênio verde pode ser usado como fonte de energia limpa em muitos setores, especialmente indústria e transporte, substituindo combustíveis fósseis. Isso pode descarbonizar setores hoje dependentes de combustíveis fósseis, como aço, cimento, aviação e navegação, ajudando o país a atingir suas metas de redução de emissões.

O Brasil desenvolveu suas políticas governamentais de hidrogênio em 2021, com o lançamento do Programa Nacional do Hidrogênio, depois de outros países com potencial de produção e exportação. O programa considera as fontes de energia e tecnologias disponíveis no Brasil para produzir hidrogênio verde, como etanol, biomassa, biogás, eólica e solar, essas fontes são abundantes no país e sua utilização traria benefícios ambientais e econômicos.

O custo de produção de hidrogênio ainda é considerado alto em relação aos combustíveis que ele tem o potencial de substituir. O preço final ao consumidor é impactado por custos logísticos ainda pouco desenvolvidos e elevados. Avaliam-se opções como combinar hidrogênio com substâncias líquidas de moléculas maiores, como amônia, para transporte.

Apesar do grande potencial, ainda existem diversos desafios a serem superados para uma exploração em maior escala do hidrogênio verde no Brasil. É necessário investimento em pesquisa, desenvolvimento de novas tecnologias de produção e armazenamento mais eficientes e baratas. Também é preciso aperfeiçoar a regulamentação do setor e incentivos governamentais para estimular o mercado.

Portanto, as perspectivas para exploração do hidrogênio verde no Brasil são promissoras. Com políticas públicas adequadas, investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e superação dos desafios tecnológicos e econômicos, o hidrogênio verde pode se consolidar como alternativa energética sustentável e o Brasil ser protagonista neste mercado.

A autoprodução de energia para produção de hidrogênio verde apresenta diversas vantagens econômicas e estratégicas. A não incidência de encargos setoriais e o desconto nas tarifas de uso do sistema de transmissão e distribuição para fontes incentivadas permitem uma redução expressiva nos custos de aquisição de energia.

No caso analisado de uma planta de eletrólise de 100 MW, essa redução de custos foi estimada em R\$ 12,4 milhões mensais. Apesar do elevado investimento inicial em CAPEX, o acesso a linhas de crédito com juros subsidiados pode viabilizar economicamente o projeto de autoprodução. Diante do exposto, a autoprodução surge como um modelo promissor para a produção de hidrogênio verde no Brasil.

Em resumo, as perspectivas para a exploração do hidrogênio no Brasil precisam evoluir para se tornarem realidade. O país dispõe de recursos naturais, conhecimento em políticas para tecnologias inovadoras, infraestrutura industrial e potencial para formar profissionais qualificados, permitindo o desenvolvimento promissor a médio prazo. Com a articulação e o envolvimento adequados dos envolvidos, o hidrogênio limpo oferece uma oportunidade sem emissões para alterar significativamente a economia brasileira. O país tem potencial para se tornar um protagonista no setor, fortalecer a economia com uma matriz energética mais limpa e servir de exemplo para outros países.

Sugestões de trabalhos futuros:

- a) aprofundamento dos estudos técnicos e econômicos de projetos de autoprodução de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis. Realizar análises de custos mais detalhadas e avaliações de desempenho técnico para validar a viabilidade desses projetos.
- b) estudos comparativos com outros países: Realizar estudos comparativos entre o Brasil e outros países que já possuem experiência e avanços significativos na autoprodução de energia com fontes renováveis.

c) análise do impacto regulatório e político: Investigar o impacto das políticas e regulamentações existentes no Brasil em relação à autoprodução de energia com fontes renováveis.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICA. **ABNT/CEE-067- Comissão de estudo especial de tecnologias de hidrogênio**, 2021. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/cee-67>. Acesso em: 5 maio 2023.

Abreu, F. H. d., Avelino, M., Monâco, D. P. (2017). **Estudo Técnico, Econômico E Ambiental Da Geração De Energia Através Do Biogás De Lixo - O Caso Do Aterro Sanitário De Gramacho**. CadUniFOA, 16(6), 37-43. Disponível em: <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v6.n16.1056>. Acesso em: 25 maio 2023.

ACAR, C.; DINCER, I. **Review and evaluation of hydrogen production options for better environment**. *Journal of Cleaner Production*, v. 218, p. 835-849, 2019. Acesso em: 13 nov. 2022.

AICHER, Dr. Thomas; BLUM, Prof. Dr. Ludger; SPECHT, Dr. Michael. **Wasserstoffgewinnung aus Erdgas –Anlagenentwicklung und Systemtechnik**. 1 jan. 2004. Disponível em: <https://docplayer.org/64488-Wasserstoffgewinnung-aus-erdgas-anlagenentwicklung-und-systemtechnik.html>. Acesso em: 13 nov. 2022.

ALVES, Prof. Dr. Helton José. **Reforma do biogás para a produção de hidrogênio verde**. Universidade Federal do Paraná UFPR/Setor Palotina Laboratório de Materiais e Energias Renováveis LABMATER, 20 abr. 2021. Disponível em: [Apresentacao_Webinar_ABiogas_-_20-04-21_Helton-UFPR](#). Acesso em: 23 abr. 2023.

AMORETTI, M.; AMSLER, C.; BONOM, G.; BOUCHTA, A. **Production and detection of cold antihydrogen atoms**. *Letters to nature*. p. 1-4, 3 out. 2002. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature01096.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2022.

ANDRADE; Vivian. **I-REC: quais os benefícios dos certificados de energia renovável?** 24 abr. 2018. Disponível em: <https://www.institutototum.com.br/index.php/noticias/28-programa-de-certificacao-de-energia-renovavel/361-i-rec-quais-os-beneficios-dos-certificados-de-energia-renovavel>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ANEEL/ABSOLAR. **Infográfico ABSOLAR**., 2 jun. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ANEEL. **Resolução Homologatória no 3.066, de 14 de julho de 2022**. Estabelece o valor das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão - TUST de energia elétrica, componentes do Sistema Interligado Nacional para o ciclo 2022-2023, e dá outras providências, Brasília, DF, 14 jul. 2022. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/areh20223066_2.pdf. Acesso em: 18 jun. 2023.

ANEEL. **Resolução Homologatória nº 3.147, de 6 de dezembro de 2022**. Estabelece, para o ano de 2023, as quotas de custeio e as de energia elétrica

referentes ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA., Brasília, DF, 6 dez. 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20223147ti.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ANEEL. **Resolução Homologatória nº 3.175 de 7 de março de 2023**. Aprova o orçamento anual da Conta de Desenvolvimento Energético – CDE para o ano de 2023, fixa as quotas anuais dos encargos tarifários CDE-USO e CDE-GD, e dá outras providências, Brasília, DF, 7 mar. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20233175ti.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da Aneel –SIGA**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 11 abr. 2023.

BBC. **Guerra na Ucrânia: como dependência da Europa de gás russo financia invasão**. 6 mar. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60623903>. Acesso em: 28 maio 2023.

BNDES. **BNDES apoiará ampliação de geração de energia renovável pelo grupo São Martinho**. jan. 2021. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-apoiara-ampliacao-de-geracao-de-energia-renovavel-pelo-grupo-sao-martinho>. Acesso em: 17 jun. 2023.

BNDES. **Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa**. Rio de Janeiro - RJ, dez. 2022. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 17 fev. 2023.

BNDES. **Produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.

BNEF – Bloomberg New Energy Finance. **Hydrogen Economy Outlook Key messages**. mar 2020. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-EconomyOutlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>. Acesso em: 21 out. 2022.

BOGDANOVIC, B., et al., 1999, “**Thermodynamic investigation of the magnesiumhydrogen system**”, Journal of Alloys and Compounds, v. 282, pp. 84-92. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00829-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00829-9). Acesso em: 4 maio 2023.

BÖLL, Fundação Heinrich. **Hidrogênio Verde no Brasil: oportunidades e desafios**. São Paulo: Fundação Heinrich Böll Brasil, 2021. Disponível em: https://br.boell.org/sites/default/files/2021-05/Relatorio_Hidrogenio_Verde_Boll_FINAL.pdf. Acesso em: 21 abr. 2023.

BOMFIM, G.; IWAMOTO, E.; BLANCHET, L. A. **ANÁLISE DA PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SEUS EFEITOS NA AUTOGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. REVISTA DA AGU, v. 20, n. 04, 2021. DOI: 10.25109/2525-328X.v.20. n.04.2021.2727. Disponível em: <https://revistaagu.agu.gov.br/index.php/AGU/article/view/2727>. Acesso em: 04 jun. 2023.

Bonifácio, R. N., Linardi, M., Cuenca, R. (2011). **Desenvolvimento De Processo De Produção De Conjuntos Eletrodo-membrana-eletrodo Para Células a Combustível Baseadas No Uso De Membrana Polimérica Condutora De Prótons (Pemfc) Por Impressão A Tela**. Quím. Nova, 1(34), 96-100. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422011000100019>. Acesso em: 04 jun. 2023.

BORGES, A.C.F. **Utilização do hidrogênio verde como fonte de energia no Brasil**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/238476/borges_acf_tcc_rosa.pdf?sequence=4. Acesso em: 18 abr. 2023.

BRASIL. **Decreto no 2.003, de 4 de fevereiro de 1996**. Regulamenta artigos da Lei no 8.177, de 1º de março de 1991, que dispõe sobre a Política Energética Nacional, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 5 fev. 1996a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2003.htm. Acesso em: 3 jun. 2023.

BRASIL. **Decreto no 6.210, de 17 de abril de 2007**. Institui o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 abr. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6210.htm. Acesso em: 3 jun. 2023.

BRASIL. **Lei no 6.404, de 15 de dezembro de 1976**. Dispõe sobre as sociedades por ações. Diário Oficial da União, Brasília, 16 dez. 1976. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6404consol.htm#:~:text=LEI%20No%206.404%2C%20DE%2015%20DE%20DEZEMBRO%20DE%201976.&text=Disp%C3%B5e%20sobre%20as%20Sociedades%20por%20A%C3%A7%C3%B5es.&text=Art.%201%C2%BA%20A%20companhia%20ou,das%20a%C3%A7%C3%B5es%20subscritas%20ou%20adquiridas.. Acesso em: 3 jun. 2023.

BRASIL. **Lei no 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Política Nacional de Energia, cria o Conselho Nacional de Política Energética - CNPE e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 dez. 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm. Acesso em: 3 jun. 2023.

BRASIL. **Lei no 11.488, de 15 de junho de 2007**. Dispõe sobre a equiparação ao regime de autorização para a microgeração distribuída e a minigeração distribuída independente de fonte de energia. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jun. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11488.htm. Acesso em: 3 jun. 2023.

BRIDGWATER, A. V. **Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>. Acesso em: 09 abr. 2023.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Mercado mensal - Dados e Análises Gerais - Abr/2023**. Brasília, DF, v.1, 2023a.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Painel de Preços**. Brasília, DF, v.1, 2023b.

CEMIG. **Veja como funciona e quais aplicações da célula a combustível de hidrogênio**. 2022. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/usina-do-conhecimento/veja-como-funciona-e-quais-aplicacoes-da-celula-a-combustivel-de-hidrogenio/#:~:text=A%20c%C3%A9lula%20a%20combust%C3%ADvel%20%C3%A9%20um%20tipo%20de%20bateria%20em,%20%3D%3E%20H2O%20%2B%20energia>. Acesso em: 13 nov. 2022.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas e competitividade: 2010-2025. Série Documentos Técnicos nº 07. 2010**. Disponível em: https://www.cgEE.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3. Acesso em: 21 nov. 2022.

CHANTRE, C.; ELIZIÁRIO, S. A.; PRADELLE, F.; CATÓLICO, A. C.; DORES, A. M. B.; SERRA, E. T.; TUCUNDUVA, R. C.; CANTARINO, V. B. P.; BRAGA, S. L. **Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 26-41, 2022. Acesso em: 23 abr. 2023.

Chen, Y., & Fan, Y. (2019). **Gasification of Coal and Biomass for Production of Hydrogen and Synthetic Fuels. In Coal and Biomass Gasification (pp. 267-292). Springer, Cham**. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14031-9_10. Acesso em: 23 abr. 2023.

CHEN, Y., ZHANG, Y., ZHANG, Y., ZHANG, Y., & WANG, Y. (2023). **A critical and systematic review of sustainable hydrogen production from ethanol/bioethanol: Steam reforming, partial oxidation, and autothermal reforming. Fuel**, 314, 126526. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126526>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CIBIOGÁS. **HIDROGÊNIO VERDE: QUAL A PERSPECTIVA DO BIOGÁS PARA SUA CHEGADA AO BRASIL?**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/hidrogenio-verde-qual-a-perspectiva-do-biogas-para-sua-chegada-ao-brasil/>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CNI. **Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira**. Brasília, DF, 13 ago. 2022. Disponível em:

<https://static.poder360.com.br/2022/08/CNI-hidrogenio-verde-sustentavel-13ago2022.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

COMPLEXO DO PECÉM. **HUB DE HIDROGÊNIO VERDE DO COMPLEXO DO PECÉM**. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2022/02/FAQ-do-Hub-de-Hidrogenio-Verde-do-Complexo-do-Pecem.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

COUTO, I. C. P.; COUTO, S. C. P.; OLIVEIRA JR, E. N. de. **ESTUDO DE UMA COLUNA DE ABSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO EM SOLUÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO**, XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Blucher Chemical Engineering Proceedings, Volume 1, 2015, Pages 15347-15354, ISSN 2359-1757, <http://dx.doi.org/10.1016/chemeng-cobeq2014-0965-22070-140522>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CRUZ, Joana. **Governo do Ceará assina décimo Memorando de Entendimento para produção de Hidrogênio Verde**, 15 out. 2021. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/10/15/governo-do-ceara-assina-decimo-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 25 jun. 2023.

DA SILVA, C. H. F.; MADUREIRA, A. J. V.; TÔRRES, E. S.; CARVALHO, A. M. **Produção de Hidrogênio Através de Reforma de Etanol**, 18 fev. 2023. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Produc%CC%A7a%CC%83o-de-Hidroge%CC%82nio-Atrave%CC%81s-de-Reforma-de-Etanol.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2023.

DE CASTRO, Nivalde; BRAGA, Sergio; PRADELLE, Florian; CHAVES, Ana Carolina; CHANTRE, Caroline. **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro - RJ, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf. Acesso em: 4 maio 2023.

Demirbas A. **Competitive liquid biofuels from biomass**. Appl. Energy. 2011;88:17–28. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.016>. Acesso em: 09 abr. 2023.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **EMTU diz que projeto de ônibus a hidrogênio é vitorioso e fala do gás natural**. 23 fev. 2017. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2017/02/23/emtu-diz-que-projeto-de-onibus-a-hidrogenio-e-vitorioso-e-fala-do-gas-natural/>. Acesso em: 19 abr. 2023.

EMTU. **Ônibus a combustível a hidrogênio para transporte urbano no Brasil**. São Paulo: Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos, 2015. Disponível em: <https://www.emtu.sp.gov.br/EMTU/pdf/Livro%20digital%20do%20Projeto%20Hidrog%C3%AAnio-1.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

ENERGY FUTURE. **Hidrogênio verde: uma oportunidade para o setor elétrico no Brasil**. Energy Future, 23 dez. 2022. Disponível

em: <https://www.energyfuture.com.br/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-para-o-setor-eletrico-no-brasil>. Acesso em: 22 de abril de 2023.

ENGIE BRASIL. **Unigel anuncia primeira fábrica de hidrogênio verde no país**, 22 set. 2022. Disponível em: <<https://www.alemdaenergia.engie.com.br/unigel-anuncia-primeira-fabrica-de-hidrogenio-verde-no-pais/>>. Acesso em: 22 abr. 2023.

ESTÊVÃO, Tânia. **O Hidrogênio como combustível**. Orientador: Prof. António Tomé Ribeiro. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018Int.pdf> Acesso em: 17 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Brasília, DF, 2021a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrog%C3%AAnio Acesso em: 17 out. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Caderno de Preços da Geração**. Brasília, DF: EPE, 2021b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%C3%A7osdeGera%C3%A7%C3%A3o_r0.pdf. Acesso em: 25 jun. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Brasília, DF: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202027_aprovado_OFICIAL.pdf. Acesso em: 11 abr. 2023.

EPBR. **Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil**. 26 abr. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil/>>. Acesso em: 22 maio 2023.

EXAME. **Guerra impulsiona corrida pelo hidrogênio verde na Europa**. 11 abr. 2022. Disponível em: <https://exame.com/esg/guerra-impulsiona-corrida-pelo-hidrogenio-verde-na-europa/>. Acesso em: 28 maio 2023.

FARIA, Wagner. **Produção de hidrogênio por reforma autotérmica do propano em catalisadores $\text{Pd/CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$** . 2007. 173 p. Tese (pós-graduação de engenharia química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, nov. 2007. Disponível em: <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/teses-de-doutorado/2007/249-producao-de-hidrogenio-por-reforma-autotermica-do-propano-em-catalisadores-pdceo2al2o3/file>. Acesso em: 20 nov. 2022.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil**. 1 jan. 2023. Disponível em: https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/33175/opinioao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf?sequence=1. Acesso em: 22 abr. 2023.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Dados - Matriz Energética: Matriz Energética**. 1 out. 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>. Acesso em: 5 nov. 2022.

GIBSON, T. L.; KELLY, N. A. **Optimization of solar powered hydrogen production using photovoltaic electrolysis devices**. *International Journal Of Hydrogen Energy*, p. 5931- 5940, 2008. Acesso em: 22 abr. 2023.
Han, Sang-Jun & Wee, Jung-Ho. (2017). Carbon Dioxide Fixation by Combined Method of Physical Absorption and Carbonation in NaOH-Dissolved Methanol. *Energy & Fuels*. 31. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02709>. Acesso em: 24 abr. 2023.

HEAD ENERGIA. **Autoprodução: riscos e oportunidades no mercado de energia 2023**.

IBERDROLA. **'Por ti. Para o planeta.': continuamos liderando a transição energética: pioneiros da transição de energia**. 2022. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/transicao-energetica>. Acesso em: 13 nov. 2022.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta**. 2022. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>. Acesso em: 20 nov. 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Hydrogen in Latin America**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-latin-america>. Acesso em: 03 maio 2023

IEA: International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives 2020**. Paris, fev. 2020a. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf. Acesso em: 01 dez. 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global CO₂ emissions in 2019**. 2020b. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>. Acesso em: 22 abr. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050: a roadmap for the global energy sector**. Paris: IEA, 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 21 abr. 2023.

IEA: International Energy Agency. **Sobre CCUS**. abril 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>. Acesso em: 28 nov. 2022.

IEA: International Energy Agency. **Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells**, Paris 2015. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e669e0b6-148c-4d5c-816b-a7661301fa96/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **PIB cresce 3,2% no 4º tri, mas fecha 2020 com queda de 4,1%, a maior em 25 anos**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencianoticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/30166-pibcresce-3-2-no-4-tri-mas-fecha-2020-com-queda-de-4-1-amaior-em-25-anos>. Acesso em 21 abr. 2023.

IPEN. **Produção de H2**. 2022. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=504&campo=1426. Acesso em: 13 nov. 2022.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling Up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**. 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf. Acesso em: 13 nov. 2022.

KALAMARAS, C. M.; EFSTATHIOU, A. M. **Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments**. *Conference Papers in Energy Science*, v. 2013, 690627, 2013. Acesso em: 11 abr. 2023.

KHAN, M.I. et al. **Recent developments in ethanol steam reforming for hydrogen production - A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 110, p. 121-133, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.023>. Acesso em: 22 abr. 2023.

KOLLI, Abdelfatah; GAILLARD, Arnaud; BERNARDINIS, Alexandre; BETHOUX, Olivier; HISSEL, Daniel; KHATIR, Zoubir. **A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications**, 24 ago. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.060>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890415007116?casa_token=7Wp19n2ZSpcAAAAA:W_LsF6l7TE61FjWVDqNWaJRZiUx3HX6zyGmDC8kZ07Llw3W3k3FanpuUDZObcjzdg3ZY1BhML4U. Acesso em: 13 nov. 2022.

LAMEIRAS, Fortubato. **O hidrogênio como vetor de energia**. 2019. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=1d8b37a8-a0d4-deee-74fe-02f4e4abc65d&groupId=36208. Acesso em: 13 nov. 2022.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA**, v. 26, n. 1, abr. 2023. ISSN 2179-7536. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746/10175>>. Acesso em: 06 maio 2023. doi:<http://dx.doi.org/10.18542/ncn.v26i1.12746>.

LETICIA MONTENEGRO TURTELLI PIGHINELLI, Anna; KEIJI NAKAI, Diogo; LÉO SCHULTZ, Emerson; CAMEZ TRICHES DAMASO, Mônica; GAMBETTA, Rossano. **Processos termoquímicos aplicados à biomassa florestal**. 1 dez. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189256/1/DOC-29-CNPAE.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2023.

LI, Y.; LI, J.; ZHANG, Y.; YANG, X.; WANG, S.; XU, X. **Methane Steam Reforming for Hydrogen Production: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1130-1144, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117309934>. Acesso em: 13 abr. 2023.

LUBE, F. **Energia do hidrogênio: mudanças paradigmáticas rumo à uma “economia verde” no Brasil**. 2012. 141 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Economia, Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/jspui/bitstream/10/5980/1/Filipe%20Lube.pdf>. Acesso em: 08 maio 2023.

LUNARDI, Diana Gonçalves; SOUSA, Júlio César Rodrigues. **Racionalidade colonial, transição energética e a conservação da biodiversidade no semiárido**. In: NUNES, Matheus Simões (Org.). Estudos em Direito Ambiental: Territórios, racionalidade e decolonialidade. Campina Grande: Editora Licuri, 2022, p. 157-167. Disponível em: <https://editorallicuri.com.br/index.php/ojs/article/view/32/30>. Acesso em: 11 abr. 2023.

LUO, Y.; WANG, Q.; LI, J.; XU, F.; SUN, L.; ZOU, Y.; ZHANG, K. **Enhanced hydrogen storage/sensing of metal hydrides by nanomodification**. Materials Today Nano, v. 9, p. 100071, 2020. Acesso em: 20 nov. 2022.

MACHADO, N. **Em que pé está o hub de hidrogênio do Pecém?** EPBR, 22 set. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/em-que-pe-esta-o-hub-de-hidrogenio-do-pecem/>. Acesso em: 08 maio 2023.

MACHADO, Nayara. **Regulação do hidrogênio: falta tudo, mas futuro é promissor**. 24 jun. 2021. Disponível em: <https://epbr.com.br/regulacao-do-hidrogenio-falta-tudo-mas-futuro-e-promissor/>. Acesso em: 24 abr. 2023.

Maia, T. A., Bellido, J. D. A., Assaf, E. M., Assaf, J. M. (2007). **Produção De Hidrogênio a Partir Da Reforma A Vapor De Etanol Utilizando Catalisadores Cu/ní/gama-al₂O₃**. Quím. Nova, 2(30), 339-345. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422007000200019>. Acesso em: 24 abr. 2023.

MEGAWHAT. **Autoprodutor de energia**. Disponível em: <https://megawhat.energy/verbetes/69702/autoprodutor-de-energia>. Acesso em: 17 jun. 2023.

Meira, Debora & Ribeiro, R.U. & Mathon, O. & Pascarelli, Sakura & Bueno, J.M.C. & Zanchet, D.. (2016). **Complex interplay of structural and surface properties of ceria on platinum supported catalyst under water gas shift reaction**. *Applied Catalysis B: Environmental*. 197. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.04.025>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337316302910>. Acesso em: 24 abr. 2023.

MELO, Marcos; SILVA, Luciana. **Photocatalytic Production of Hydrogen: an Innovative Use for Biomass Derivatives**, Salvador - BA, p. Vol. 22, No. 8, 1399-1406, 28 abr. 2011. DOI <https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000800002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/jwdmrbDvxGwz3CjQB45dkWf/?lang=en>. Acesso em: 23 abr. 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Sistemas células a combustível: Programa brasileiro ProCaC**. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/977/1/9804%20-%20Sistemas%20c%C3%A9lulas%20a%20combust%C3%ADvel%20programa%20brasileiro%20PROCaC.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2023.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Dados - Matriz Energética: Matriz Energética, Brasília**, DF, 20 abr. 2021b. Disponível em: https://www.udop.com.br/legislacao-arquivos/465/res_06_diretrizes_programa_hidrogenio.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2050**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2022.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Propostas e Diretrizes**. 1 jul. 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>. Acesso em: 20 out. 2022.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resolução CNPE nº 6, de 23 de junho de 2022. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências**. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-419972141>. Acesso em: 08 maio 2023.

MOURA, Carlos Henrique Silva. **Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e uso dinâmico de hidrogênio**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de

Guaratinguetá. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/192430>. Acesso em: 26 abr. 2023.

NETO, João. **Alemanha amplia chances do Brasil no hidrogênio verde.**

Alemanha amplia chances do Brasil no hidrogênio verde, São Paulo - SP, 20 mar. 2023. Disponível em:

<https://oglobo.globo.com/economia/noticia/2023/03/alemanha-amplia-chances-do-brasil-no-hidrogenio-verde.ghtml>. Acesso em: 22 abr. 2023.

NETO, Emilio. **Armazenamento de Hidrogênio**. 1 dez. 2022. Disponível em:

https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html. Acesso em: 1 dez. 2022.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. **A comparative overview of hydrogen**

production processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 67, p. 597-611, 2017. Disponível em:

http://www.blackstonegreenenergy.com/bge_library/nikolaidis.pdf. Acesso em: 26 abr. 2023.

NUNES, G. M. F. **Caracterização de pilha de combustível de hidrogênio e**

monitorização de célula individual. 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010. Acesso em: 23 nov. 2022.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. **Hydrogen Storage**. Washington,

DC, 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. Acesso em: 27 nov. 2022.

OGO, Shuheij; SEKINE, Yasushi. **Recent progress in ethanol steam reforming using non-noble transition metal catalysts: A review. Fuel processing technology**, v. 199, 106238, 2020.

DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106238>. Acesso em: 22 abr. 2023.

OLIVEIRA, M. d. L., Almeida, V. S. d., Oliveira, F. J., Malheiro, F. (2018). **Análise**

Teórica De Um Gerador Linear De Energia Elétrica Para Reaproveitamento Dos Gases De Escape De Motores a Combustão Interna. Conferência De Estudos Em Engenharia Elétrica. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/2596-2221.xviceel.2018.150>. Acesso em: 25 maio 2023.

OLIVEIRA, Raquel; PASSOS, Fabio. **Estudo da oxidação parcial do etanol em**

catalisadores de Rh por DRIFTS, 11 abr. 2013. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300005>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/8ghbQCKmttWXsDcsxjDLmZq/?lang=pt>. Acesso em: 13 nov. 2022.

OLIVEIRA, Rosana. **Panorama do hidrogênio no brasil**, 1 ago. 2022. Disponível

em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 13 nov. 2022.

PANDEV, M.; LUCCHESI, P.; MANSILLA, C.; LE DUGOU, A.; ABRASHEV, B.; VLADIKOVA, D. **Hydrogen Economy: the future for a sustainable and green society**. Bulgarian Chemical Communications, v. 49, p. 84-92, 2017. Acesso em: 13 nov. 2022.

PLANETA COPPE NOTÍCIAS. **Estudo aponta a forma de armazenamento de hidrogênio mais eficiente**. 19 jun. 2018. Disponível em: <https://www.coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/estudo-aponta-a-forma-de-armazenamento-de-hidrogenio-mais-eficiente>. Acesso em: 11 maio 2023.

PORTAL HIDROGÊNIO VERDE. **Desafios do Hidrogênio Verde**. 2022. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/desafios-do-hidrogenio-verde/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

PORTAL HIDROGÊNIO VERDE. **Campeão na produção de etanol, Brasil tem vantagens na era do hidrogênio verde**. 11 fev. 2023. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/noticia/campeao-na-producao-de-etanol-brasil-tem-vantagens-na-era-do-hidrogenio-verde/#:~:text=Combust%C3%ADvel%20limpo%20%C3%A0%20base%20da,na%20era%20do%20hidrog%C3%AAnio%20verde>. Acesso em: 11 fev. 2023.

POVEDA, Gloria. **ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM LIGAS METÁLICAS A BASE DE MAGNÉSIO**. maio 2007. TESE (PÓS-GRADUAÇÃO) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/teses/2007/47--38/file>. Acesso em: 4 maio 2023.

POWER ENGINEERING INTERNATIONAL. **Rotterdam to host European hydrogen innovation centre**. Power Engineering International. 2021. Disponível em: <https://www.powerengineeringint.com/renewables/hydrogen/rotterdam-to-host-european-hydrogen-innovation-centre/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

RIBEIRO, Daniel. **Processo de Haber-Bosch**. Revista de Ciência Elementar, Porto - Portugal, p. 1-2, 1 out. 2013. Disponível em: https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_1_num_1_26_art_processoHaberBosch.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

RIBEIRO, Felipe. **Toyota fará carro elétrico movido a hidrogênio no Brasil**. 7 abr. 2023. Disponível em: <https://canaltech.com.br/carros/toyota-fara-carro-eletrico-movido-a-hidrogenio-no-brasil-245650/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

RIIS, T., et al., 2005, "Hydrogen storage - gaps and priorities", HIA HCG Storage Paper, Disponível em: [http://www.ieahia.org/pdfs/HIA_storage_G&P_Final with Rev.pdf](http://www.ieahia.org/pdfs/HIA_storage_G&P_Final%20with%20Rev.pdf), Acesso em: 13 nov. 2022.

Rosa, A. H., Lobato, L. C. d. S., Borges, J. L., Melo, G. P. d., Chernicharo, C. A. d. L. (2016). **Potencial Energético E Alternativas Para O Aproveitamento Do Biogás E Lodo De Reatores Uasb: Estudo De Caso Estação De Tratamento De**

Efluentes Laboreaux (Itabira). Eng. Sanit. Ambient., 2(21), 315-328. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522016123321>. Acesso em: 25 maio 2023.

RUSMAN, N. A. A.; DAHARI, M. **A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 41, n. 28, p. 12108-12126, 2016. Acesso em: 13 nov. 2022.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane.** Biomass and Bioenergy, Oxford, v. 35, p. 1633-1645, 2011. Acesso em: 21 abr. 2023.

SARAIVA PANIK, Monica. **Apresentação ABIOGAS.** 20 abr. 2021. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/04/Apresentacao_ABIOGAS_20.04.21_-_reduzida.pdf. Acesso em: 21 out. 2022.

SCHULTZ, Emerson Léo; SOARES, Itânia Pinheiro. **Reforma do biogás – revisão.** Brasília, DF, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Biog%C3%A1sFert+-+Reforma+do+biog%C3%A1s+-+Revis%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SCHULTZ, Emerson Léo; SOARES, Itânia Pinheiro. **Produção de hidrogênio a partir do biogás.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Biog%C3%A1sFert+-+Resultados+PA06.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

SHELL. **Hydrogen study: Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2.** Hamburgo - Alemanha, 1 jan. 2017. Disponível em: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6786/file/6786_Hydrogen_S_tudy.pdf. Acesso em: 13 nov. 2022.

SILVA, Márcio. **Análise Termoquímica de Reformador de Etanol: Produção de Hidrogênio para Acionamento de uma Célula a Combustível do Tipo PEM de 1 kW.** Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira. 2005. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Campus De Guaratinguetá, Guaratinguetá, SP, 2005. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99342/silva_me_me_guara.pdf;jsessionid=62CDC474D78318329396007E044A418A?sequence=1. Acesso em: 28 nov. 2022.

SILVEIRA, J.L.; BRAGA, L.B.; SOUZA, A.C.C.; ANTUNES, J.S.; ZANZI, R. **The Benefits of Ethanol Use for Hydrogen Production in Urban Transportation.** Renewable & Sustainable Energy Reviews, pp. 2525-2534, 1 fev. 2009. Acesso em: 22 abr. 2023.

SOUZA, Helder. **Encargo de Energia de Reserva, de onde vem e para onde vai?** 4 mai. 2023. Disponível em: https://www.trsolucoes.com/conteudo/articles/encargo_de_energia_de_reserva_de_onde_vem_e_para_onde_vai. Acesso em: 25 jun. 2023.

SOUZA, M. M. V. M. **Tecnologia do Hidrogênio**. Synergia Editora, 2009. Acesso em: 22 abr. 2023.

Souza, B. B. de., Bertechini, A. G., Teixeira, A. S., Lima, J. A. de F., & Conte, A. J.. (2005). **Efeito do nível energético e da suplementação com cloretos de potássio e de amônia na dieta sobre as respostas fisiológicas e o desempenho de frangos de corte no verão**. *Ciência E Agrotecnologia*, 29(1), 185–192. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000100023>. Acesso em: 24 abr. 2023.

T. Lepage, M. Kammoun, Q. Schmetz, and A. Richel, **“Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment,”** *Biomass and Bioenergy*, vol. 144. Elsevier Ltd, p. 105920, Jan. 01, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105920. Acesso em: 13 abr. 2023.

UM SÓ PLANETA: ENERGIA E CIÊNCIA. **Brasil pode se tornar maior hub de exportação de hidrogênio verde do mundo**. 2022. Disponível em: <https://umsoplaneta.globo.com/energia/noticia/2022/09/08/brasil-pode-se-tornar-maior-hub-deexportacao-de-hidrogenio-verde-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 18 de fev. de 2023.

UOL. **Montadoras testam caminhões movidos a células de hidrogênio**. 21 set. 2022. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/qualidade/motor/montadoras-testam-caminhoes-movidos-a-celulas-de-hidrogenio-210922>. Acesso em: 21 abr. 2023.

VAIDYA, P. D., RODRIGUEZ, C. A., DEY, S. K., BORREANI, D., MONZI, O., MANCIA, M. A., LOPEZ, C. G. **Steam reforming, partial oxidation, and oxidative steam reforming of ethanol for hydrogen production over Ni/CeZrO₂ catalysts**. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 105, n. 1-2, p. 62–70, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.10.035>. Acesso em: 13 abr. 2023.

VIEIRA, Arthur Taranto. **ANÁLISE DO “INTERNATIONAL - RENEWABLE ENERGY CERTIFICATE” (I-REC) NO BRASIL E UM ESTUDO DE CASO DE VIABILIDADE NO SISTEMA DE I-REC PARA A GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Acesso em: 25 jun. 2023.

Wendt, H., Götz, M., Linardi, M. (2000). **Tecnologia De Células a Combustível**. *Quím. Nova*, 4(23), 538-546. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422000000400018>. Acesso em: 13 nov. 2022.

WILLIGE, Andrea. **4 maneiras de armazenar hidrogênio de energia renovável**. 29 nov. 2022. Disponível em: <https://spectra.mhi.com/4-ways-of-storing-hydrogen-from-renewable-energy>. Acesso em: 30 nov. 2022.

Xiang, D.; Li, P.; Yuan, X. **Process Modeling, Optimization, and Heat Integration of Ethanol Reforming Process for Syngas Production with High H₂/CO Ratio**. Processes 2019, 7, 960. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr7120960>. Acesso em: 13 abr. 2023.

Xu, J. and Froment, G.F. (1989) **Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: I. Intrinsic Kinetics**. AIChE Journal, 35, 88-96. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690350109>. Acesso em: 13 abr. 2023.