

INSTITUTO FEDERAL

Paraíba

Campus João Pessoa

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THAMYRES DE ANDRADE SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: DESAFIOS E POSSIBILIDADES

João Pessoa - PB

2022

THAMYRES DE ANDRADE SILVA

O HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: DESAFIOS E POSSIBILIDADES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, no Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Orientador:

Professor Walmeran José Trindade Júnior, D. Sc.

João Pessoa - PB

2022

ATA 85/2022 - CCSBEE/UA3/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB

Coordenação do Curso Superior de Bacharelado

em Engenharia Elétrica
CCSBEE-JP

**ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA E AVALIAÇÃO DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ATA Nº:	271/2022
(Nº / ANO)	

Às quatorze horas do dia vinte e cinco do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e dois, de modo virtual, foi realizada a Apresentação Pública e Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "**O hidrogênio na geração distribuída: Desafios e possibilidades**", do(a) aluno(a) **Thamyres de Andrade Silva**, requisito obrigatório para conclusão do CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com os membros da Banca Examinadora **Walmeran José Trindade Júnior, Dr.** (Orientador, IFPB), **Alan Melo Nóbrega, Dr.** (Examinador, IFPB) e **Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.** (Examinador, IFPB). Após a apresentação e as considerações da Banca Examinadora, o trabalho foi considerado **APROVADO**, com nota **98** sendo esta composta pela média aritmética das seguintes avaliações parciais:

Texto:	Apresentação:	Defesa oral:
95	95	95

Eu, **Walmeran José Trindade Júnior, Dr.** (Orientador, IFPB), lavrei a presente Ata, que segue assinada por mim e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Observações:

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gilvan Vieira de Andrade Junior**, COORDENADOR DE CURSO - FUC1 - CCTELT-JP, em 29/08/2022 22:37:20.
- **Franklin Martins Pereira Pamplona**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/08/2022 18:18:46.
- **Alan Melo Nobrega**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 31/08/2022 08:53:45.
- **Walmeran Jose Trindade Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/09/2022 17:05:14.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/08/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 331034
Verificador: 1de3465530
Código de Autenticação:



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

S586h Silva, Thamyres de Andrade.

O hidrogênio na geração distribuída : desafios e possibilidades / Thamyres de Andrade Silva . – 2022.

55 f. : il.

TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2022.

Orientação : Prof^o D.Sc. Walmeran José Trindade Júnior.

1. Fontes alternativas de geração de energia 2. Hidrogênio.
3. Geração distribuída. 4. Descarbonização. 5. Transição energética. I. Título.

CDU 620.91(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária - CRB 15/132

Dedico este trabalho a minha família e amigos, por todo apoio necessário, e a todos os professores e colaboradores do IFPB, que contribuíram para o desenvolvimento do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que é a minha fonte de força e coragem para enfrentar todos os desafios existentes na graduação e na vida.

A minha família, que é minha base, em especial a minha mãe, que é o meu maior exemplo de mulher e minha maior motivação.

Ao Instituto Federal da Paraíba, que foi minha segunda casa durante anos e sempre acolheu todos os alunos de uma forma ímpar, tornando o processo de aprendizado ainda mais prazeroso.

Aos professores, por acreditarem no poder da educação para o crescimento da sociedade e também pela qualidade excelente do ensino.

Aos meus amigos e colegas, por todo companheirismo e apoio durante o curso, em especial a Pâmella Araújo, Diego Andrade, Rubya Soares, Lucas Marinheiro e Geraldo Junior, que estiveram mais presentes nos momentos árdus da graduação.

Ao meu amor, por acreditar no meu potencial e por toda paciência, apoio, dedicação e afeto.

Ao professor orientador Dr. Walmeran José pela confiança, por todo apoio na elaboração do trabalho e por exercer sua profissão com bastante empenho e dedicação.

“O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.”

Aristóteles

RESUMO

Este trabalho teve como propósito demonstrar a importância do hidrogênio para o futuro da humanidade, principalmente com a sua possibilidade de inserção na geração distribuída (GD), expondo a sua relevância no processo de descarbonização do planeta, tornando assim o processo de geração de energia mais sustentável e limpo. A maior motivação para este tema foi a necessidade socioambiental de redução do uso dos combustíveis fósseis, tanto por comprometer as futuras gerações com a sua grande emissão de gases de efeito estufa (GEE), como por serem combustíveis de fonte finitas. E tudo isso leva há uma urgência de transição energética, saindo de uma matriz predominantemente poluente para uma matriz limpa e renovável. Diante disso, o hidrogênio, mais especificadamente o hidrogênio verde, é considerado protagonista para esta transição. Sendo assim, foi realizada uma pesquisa bibliográfica de materiais que tangem o tema, para tornar possível abordar esse processo de transição energética, os principais métodos para a produção do hidrogênio, a utilização dele como fonte de energia, sua adição na geração distribuída e o panorama atual do Brasil em relação ao hidrogênio limpo. Esta pesquisa bibliográfica permitiu notar a importância da exposição da transição energética, saindo das fontes fósseis para as fontes renováveis, e assim tornar possível a popularização do hidrogênio na geração distribuída.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Hidrogênio; Descarbonização; Transição Energética.

ABSTRACT

This work aimed to demonstrate the importance of hydrogen for the future of humanity, especially with its possibility of insertion in distributed generation, exposing its relevance in the process of decarbonization of the planet, thus making the process of generating energy more sustainable and clean. . The main motivation for this topic was the socio-environmental need to reduce the use of fossil fuels, both because they compromise future generations with their large emission of greenhouse gases, and because they are finite source fuels. And all this leads to an urgent energy transition, moving from a predominantly polluting matrix to a clean and renewable matrix. Therefore, hydrogen, more specifically green hydrogen, is considered the protagonist for this transition. Therefore, a bibliographic research was carried out on materials related to the theme, to make it possible to approach this process of energy transition, the main methods for the production of hydrogen, its use as an energy source, its addition in distributed generation and the panorama of Brazil in relation to clean hydrogen. This bibliographic research allowed us to note the importance of exposing the energy transition, moving from fossil sources to renewable sources, and thus making possible the popularization of hydrogen in distributed generation.

Keywords: Distributed Generation; Hydrogen; Decarbonization; Energetic Transition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Produtores mundiais de petróleo.....	18
Figura 2: Consumidores mundiais de petróleo.....	18
Figura 3: Matriz energética mundial em 2019.	19
Figura 4: Investimentos de petrolíferas em energias renováveis.....	20
Figura 5: Panorama mundial de ações no âmbito do hidrogênio em 2020.....	22
Figura 6: Fontes de geração de hidrogênio no mundo em 2018.....	22
Figura 7: Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético....	24
Figura 8: Eletrólise da água.....	26
Figura 9: Esquema de funcionamento de um eletrolisador alcalino.....	28
Figura 10: Esquema de funcionamento de um eletrolisador do tipo PEM.....	28
Figura 11: Esquema de funcionamento de um eletrolisador do tipo SOE.....	29
Figura 12: Processos de armazenamento de hidrogênio.....	33
Figura 13: Esquema de funcionamento da célula a combustível.....	36
Figura 14: Gráfico da evolução da geração distribuída no Brasil.	40
Figura 15: Previsão para a capacidade instalada de geração distribuída no Brasil.	41
Figura 16: Uso de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no ano de 2019.....	42
Figura 17: Diagrama da produção de hidrogênio verde.	44
Figura 18: Movimentações governamentais para o hidrogênio no Brasil.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do hidrogênio por cores.....	25
Tabela 2: Caracterização dos eletrolisadores.....	27
Tabela 3: Caracterização dos processos biológicos para produção de hidrogênio.....	31
Tabela 4: Tipos de células a combustível.....	36
Tabela 5: Projetos no âmbito do hidrogênio no Brasil	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC	Alkaline Electrolysis Cell
AFC	Alkalyne Fuel Cell
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BBC	British Broadcasting Corporation
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito estufa
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency
MCFC	Ministério de Minas e Energia
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell.
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Electrolysis Cell
PL	Projeto de Lei
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOE	Solid Oxide Electrolysis
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.2. METODOLOGIA	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. O FIM DA ERA DO PETRÓLEO E A NOVA ERA DO HIDROGÊNIO	17
2.1. SOBRE O PETRÓLEO	17
2.2. SOBRE O HIDROGÊNIO.....	20
3. TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO	24
3.1. ELETRÓLISE DA ÁGUA	26
3.2. TIPOS DE ELETROLISADORES.....	27
3.3. REFORMA A VAPOR.....	29
3.4. PRODUÇÃO BIOLÓGICA	30
3.5. OXIDAÇÃO PARCIAL DE HIDROCARBONETOS	31
3.6. GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO	31
3.7. ARMAZENAGEM E TRANSPORTE.....	32
4. O HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA	34
4.1. TECNOLOGIAS UTILIZADAS NAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL	35
4.1.1. VANTAGENS.....	37
4.1.2. DESVANTAGENS.....	38
5. O HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	39
5.1. CENÁRIO ATUAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	39
5.2. O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA DEMOCRATIZAÇÃO DA ENERGIA.....	42
5.3. HIDROGÊNIO VERDE NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	43
6. CENÁRIO ATUAL DO HIDROGÊNIO NO BRASIL	46
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial vem aumentando à medida que a sociedade evolui, com o surgimento de novas tecnologias e novas necessidades. Além disso, existe uma crescente preocupação da humanidade com os problemas ambientais como aquecimento global, escassez de água e poluição atmosférica. Pode-se considerar como marco desta preocupação o Acordo de Paris, instituído no ano de 2015, e que tem como objetivo a redução gradativa de GEE. Em decorrência disso, têm se fomentado uma busca constante por fontes energéticas limpas e renováveis. De acordo com Aldabó (2004), melhorar o padrão de qualidade de vida da sociedade requer melhorias nos métodos de produção de energia, tornando o processo de evolução mais sustentável.

Os combustíveis mais utilizados atualmente como a gasolina e o diesel produzem inúmeros impactos ambientais, pois sua combustão resulta na produção de gases poluentes, acelerando o processo do efeito estufa e conseqüentemente do aquecimento global. Acrescentando, de acordo com o jornal BBC (2021), aproximadamente 86% das emissões de dióxido de carbono do mundo provêm da queima de combustíveis fósseis. Além disso, as reservas de combustíveis fósseis são finitas, sendo assim trazem uma necessidade constante de investigação de novos elementos para “substituí-los”.

Diante da influência do Acordo de Paris, que visa conter o aumento desenfreado da temperatura da terra, ocasionado pelo aquecimento global, grandes petrolíferas como a Shell, a Total, e a Eni se empenham a atingir suas metas de redução de carbono e com isso, ampliam investimentos em energias renováveis. E ainda com a grande inconstância nos preços do petróleo, houve um aumento da atratividade em projetos de energias renováveis para essas empresas, tendo uma média de 15% de seus orçamentos de 2021 voltados a fontes de energia com baixa emissão de carbono (DELGADO E NOGUEIRA, 2021).

Com advento das tecnologias renováveis para produção de energia, foram se tornando economicamente viáveis os meios de produção de energia limpa e renovável como a geração solar fotovoltaica e a geração eólica, possibilitando assim o uso delas na geração distribuída. Porém esses meios ainda são totalmente dependentes de aspectos naturais, como o sol e o vento, respectivamente. Isso traz a necessidade de tecnologias de armazenamento de energia, para os possíveis momentos de declínio na disponibilidade das fontes naturais.

Então, pode-se afirmar que estamos diante de uma transição na matriz energética, desvinculando gradativamente da dependência dos combustíveis fósseis e adicionando fontes novas, para uma matriz energética predominantemente renovável e limpa.

De acordo com Delgado e Nogueira (2021):

Se por um lado a transição energética ameaça os mercados de combustíveis fósseis, ao impor a mitigação das emissões de carbono e as metas de neutralidade dessas emissões em um número crescente de países, por outro traz novas oportunidades, com perspectivas de sinergias e integração entre tecnologias energéticas que permitem a um só tempo, estender a validade das energias tradicionais e abrir espaço para as energias inovadoras.

Diante disso, o hidrogênio tornou-se um elemento promissor em vários aspectos, tanto na função de armazenador de energia, quanto na função de combustível e principalmente como protagonista no processo de descarbonização do planeta. Além disso, ele possui uma característica que o torna ainda mais próspero, que é a versatilidade das suas tecnologias de produção, que o torna uma “fonte de energia” mais democrática, trazendo a possibilidade de cada local produzir pelo método que for mais viável a si. Tudo isso torna crescente os estudos sobre as tecnologias de produção, armazenamento, transporte, aplicação e segurança no âmbito do hidrogênio.

Como a maior preocupação atualmente é com a descarbonização do planeta, o hidrogênio vem sendo atrativo nesse aspecto através da sua produção via eletrólise, que resulta no hidrogênio denominado verde. O hidrogênio verde é obtido através de uma combinação entre energia limpa e água, não emitindo gases poluentes, produzindo apenas como subproduto o calor e o oxigênio. De acordo com GESEL (2021), o uso do hidrogênio verde poderá diminuir cerca de 80 Gton de emissão do CO₂ até 2050, favorecendo uma redução de cerca de 20% do necessário para alcançar as metas climáticas, para que isso seja possível é necessário cerca de 660 Mton de hidrogênio verde inserido na demanda mundial de energia até 2050, o equivalente a 22% desta demanda.

Sendo assim, neste trabalho será estudado o panorama do hidrogênio, desde os aspectos que o trouxe a um nível de possível sucessor dos combustíveis fósseis, até os estudos e investimentos relacionados ao hidrogênio na geração distribuída, trazendo à tona possibilidade de uma democratização e descarbonização energética mundial.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é expor a importância da inserção do hidrogênio na matriz energética e, sobretudo no âmbito da geração distribuída, trazendo os empecilhos para

o seu advento e as vantagens promissoras para o meio ambiente com o seu uso. Desta maneira, os objetivos específicos da pesquisa serão:

- Demonstrar a necessidade da substituição dos combustíveis fósseis por fontes limpas, trazendo o hidrogênio como figura determinante dessa transição;
- Elencar as principais tecnologias para a produção do hidrogênio;
- Indicar a relevância das células a combustível para a implementação do hidrogênio como fonte de energia;
- Evidenciar a pertinência da possibilidade de democratização da energia através do uso do hidrogênio verde na geração distribuída;
- Expor o panorama atual e os avanços desta tecnologia no Brasil.

1.2. METODOLOGIA

De acordo com Lakatos e Marconi (2002):

A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico etc., até meios de comunicação oral: rádio, gravações em fita magnética e audiovisuais: filmes e televisão.

Diante disso, neste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica de conteúdos que envolvem a utilização do hidrogênio, principalmente o renovável, como fonte de energia na geração distribuída. A fim de compreender as tecnologias envolvidas, a necessidade de modificação da matriz energética e como essa transição decorre no Brasil e no mundo, através de relatórios, artigos, livros, revistas e jornais, que possuam informações sobre produção, legislação, investimentos e aplicações do hidrogênio no âmbito geral e no âmbito da geração distribuída.

A pesquisa bibliográfica tem por objetivo conectar os pesquisadores a todo conteúdo aplicado ao tema escolhido, proporcionando uma investigação do tema de acordo com novas perspectivas, podendo trazer considerações inovadoras (LAKATOS E MARCONI, 2002).

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é composto por sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a parte introdutória para contextualização do tema, assim como os objetivos, a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

Já o segundo capítulo trata-se de um histórico sobre o petróleo e o hidrogênio, necessário para melhor compreensão sobre a possível transição energética, baseada através dos esforços para a redução do uso de combustíveis fósseis e implementação gradativa do uso do hidrogênio limpo.

O terceiro capítulo abordará as principais tecnologias de produção do hidrogênio, sua classificação e ainda tratará dos seus meios de armazenamento e transporte.

No quarto capítulo é tratado o uso do hidrogênio como fonte de energia, expondo as tecnologias utilizadas nas células a combustível, assim como suas vantagens e desvantagens.

Já o quinto capítulo abordará o hidrogênio no âmbito da geração distribuída, trazendo a sua importância para a democratização energética e mostrando a situação do hidrogênio verde na geração distribuída.

O sexto capítulo, trata-se do cenário atual do hidrogênio no Brasil, com foco no hidrogênio verde. E o último capítulo abordará as considerações finais do estudo.

2. O FIM DA ERA DO PETRÓLEO E A NOVA ERA DO HIDROGÊNIO

2.1. SOBRE O PETRÓLEO

O petróleo é atualmente um insumo extremamente significativo para as relações econômicas e geopolíticas mundiais, suas oscilações de custo interferem diretamente nos valores de muitos produtos, pois ainda é a fonte combustível mais utilizada no mundo e matéria-prima para a fabricação de diversos produtos. Ou seja, ainda predomina a dependência do petróleo perante a sociedade.

Em 1859 em Titusville, na Pensilvânia, o coronel Drake furou o primeiro poço de petróleo, daí em diante pode-se afirmar que o poder americano eclodiu simultaneamente e como consequência do triunfo do petróleo, e isso ainda tem grande influência na vida moderna. O autor enfatiza que “Um sem o outro não poderia ter existido” (SILVA, 2005).

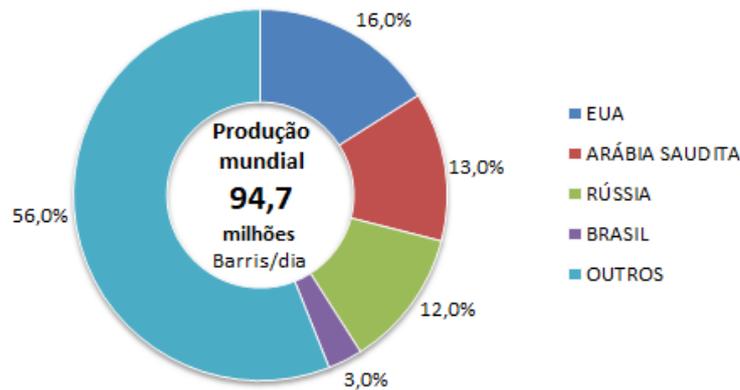
Na década de 50, os Estados Unidos portavam 50% da produção mundial do petróleo e nesse mesmo período surgiram novas tecnologias e começaram a intensificar as explorações marítimas. Já na década de 60 foi prospera a exploração no Oriente Médio e na União Soviética, além disso, houve uma eclosão de popularidade pela grande produção e custos baixos. Na década seguinte, houve um grande aumento nos preços e uma escassez nas grandes reservas americanas e simultaneamente a isso foram descobertas reservas em países de terceiro mundo. E por fim nos anos 80 e 90 foram reduzidos os custos, através do avanço tecnológico, e de um significativo aumento nas reservas mundiais, surgindo um novo ciclo econômico (THOMAS et al, 2001).

Cerca de uma década à frente, em 2001, após os ataques terroristas aos EUA, cresceu a preocupação dos países com relação à concentração na produção do petróleo, pois vários países são dependentes da importação do petróleo (ALDABÓ, 2004). Nos tempos atuais, ainda é crescente essa preocupação. A exemplo disso, o conflito entre Rússia e Ucrânia gerou incertezas para vários países com relação ao petróleo, pois de acordo com o jornal BBC (2022), a Rússia é atualmente um dos maiores produtores de petróleo, então sanções vindas de diversos países poderiam paralisar a produção e exportação, interrompendo a oferta, com isso, muitos países poderiam sofrer crises energéticas e consequentemente econômicas.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), no ano de 2018 os EUA foi líder na produção mundial de petróleo, seguido por Arábia Saudita e Rússia. Se-

guidos de Canadá, Irã, Iraque, Emirados Árabes, China, Kuwait e em décimo lugar o Brasil, juntamente de outros países que também possuem uma pequena parcela na produção. Totalizando uma produção diária de 94,7 milhões de barris, como se pode notar na Figura 1.

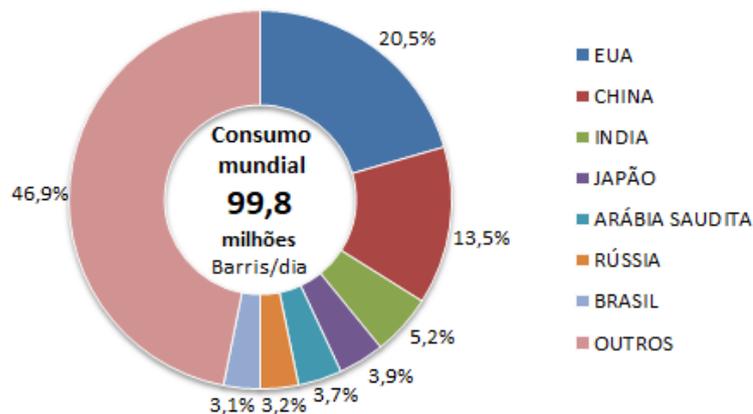
Figura 1: Produtores mundiais de petróleo.



Fonte: modificado de IBP, 2020.

Ainda segundo dados do IBP (2020), o país que mais consumiu petróleo no ano 2018 foi o EUA, seguido da China e da Índia. E o Brasil ficou em sétimo lugar no ranking, como se pode analisar através da Figura 2.

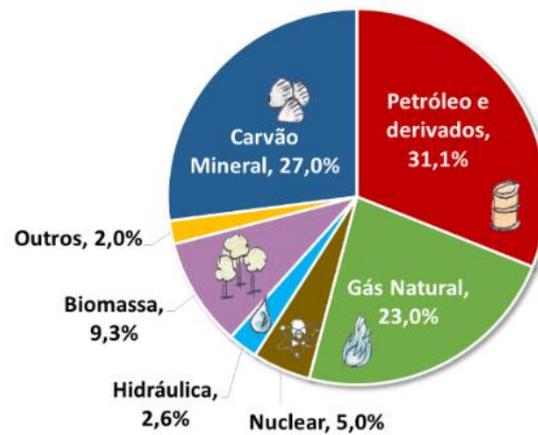
Figura 2: Consumidores mundiais de petróleo.



Fonte: modificado de IBP, 2020.

Nos tempos atuais, o petróleo e seus derivados ainda possuem parcela expressiva na matriz energética mundial, estando em primeiro lugar no Ranking, como se observa na Figura 3. E por ele ter essa parcela significativa na matriz, o torna mais uma barreira para o processo de redução na emissão de gases poluentes.

Figura 3: Matriz energética mundial em 2019.



Fonte: EPE, 2022.

Além disto, existe uma crescente preocupação mundial com a situação das reservas petrolíferas, pois é uma matéria-prima até então limitada, ou seja, chegará o momento do seu fim e a sociedade precisa de previsões bem delimitadas, para que esteja preparada para esse momento, no que diz respeito à economia e a outros recursos energéticos.

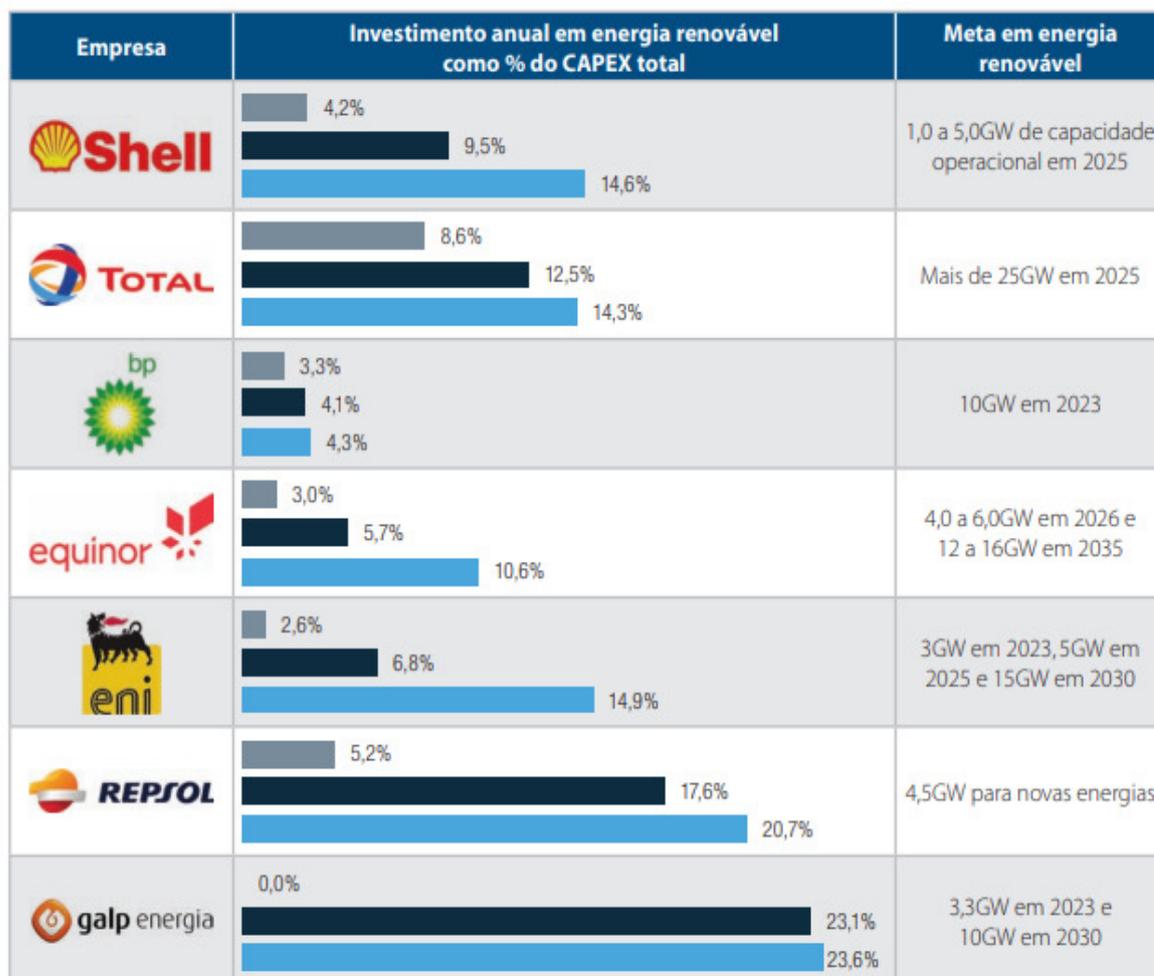
De acordo com Rifkin (2002):

“Os geólogos podem até discordar quanto a data exata em que a produção global do petróleo deve atingir o pico, mas concordam em que dois terços das reservas petrolíferas remanescentes no globo após o pico da produção estarão no Oriente Médio. Assim o domínio sobre o petróleo regressará à região nos próximos anos. E, quando o fizer, aqueles que exercerem o poder estarão na posição de ditar os termos do mercado mundial do produto, simplesmente porque não haverá outras fontes de petróleo bruto em grandes quantidades.”

Com a estipulação que a temperatura do planeta se elevará por volta de 1,4°C a 5,8°C até o século 22 (Aldabó, 2004), continuar com a exploração de combustíveis fósseis poderá configurar numa elevação da temperatura ainda maior que a estipulada, e a consequência disso poderá ser bastante agressiva ao ambiente, disto surge à necessidade de descarbonização da matriz energética.

Diante dessa atual conjuntura, muitas petrolíferas vêm focando seus esforços no processo de descarbonização, planejando e investindo na migração para energias renováveis, como se pode observar através da Figura 4, a parcela de investimentos em despesa de capital das petrolíferas com energia renovável vem crescendo com o decorrer dos anos. Além disso, vale ressaltar que essa migração é necessária que aconteça antes das primícias da escassez do petróleo, para que não haja déficits na produção energética mundial.

Figura 4: Investimentos de petrolíferas em energias renováveis.



■ 2019 ■ 2020 ■ 2021

Fonte: Delgado e Nogueira, 2021.

2.2. SOBRE O HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o primeiro elemento da tabela periódica, possui apenas um próton e um elétron e é o átomo mais abundante do universo. É encontrado em forma de gás (H_2) na natureza. Ele é incolor, inodoro e insolúvel, além disso, é conhecido por ser bastante inflamável. Ele também pode ser encontrado nas estrelas em forma de plasma.

O hidrogênio foi analisado pela primeira vez por um cientista britânico Henry Cavendish, em 1776, ele realizou uma experiência em que produzia água combinando oxigênio e hidrogênio, através de uma centelha elétrica. Como ainda não tinham sido nomeados, o cientista chamou o oxigênio de “ar sustentador da vida” e o hidrogênio de “ar inflamável”. Só no ano de 1785 que o químico francês Antoine Lavoisier renomeou os gases, ao refazer a experiência, chamando-os então de oxigênio e hidrogênio (ALDABÓ, 2004).

Porém apenas por volta dos anos 90, com a preocupação sobre a emissão de gás carbônico na atmosfera a partir da queima de combustíveis fósseis, foi crescente o interesse pelo hidrogênio como fonte energética. Em 1988, a União Soviética adaptou um avião para funcionar parcialmente com hidrogênio líquido, já em 1992, na Alemanha foi desenvolvida a primeira residência solar, utilizando hidrogênio para armazenar energia. Em seguida, no ano de 1999, a Islândia anunciou um plano para tornar o país pioneiro na economia do hidrogênio (RIFKIN, 2003).

Gradativamente o hidrogênio vem tomando espaço nos interesses de vários países, pela sua característica de armazenar energia, pela sua versatilidade de produção e aplicações, pela sua abundância no planeta e principalmente pela expectativa de substituição dos combustíveis fósseis, possibilitando a redução da emissão de carbono.

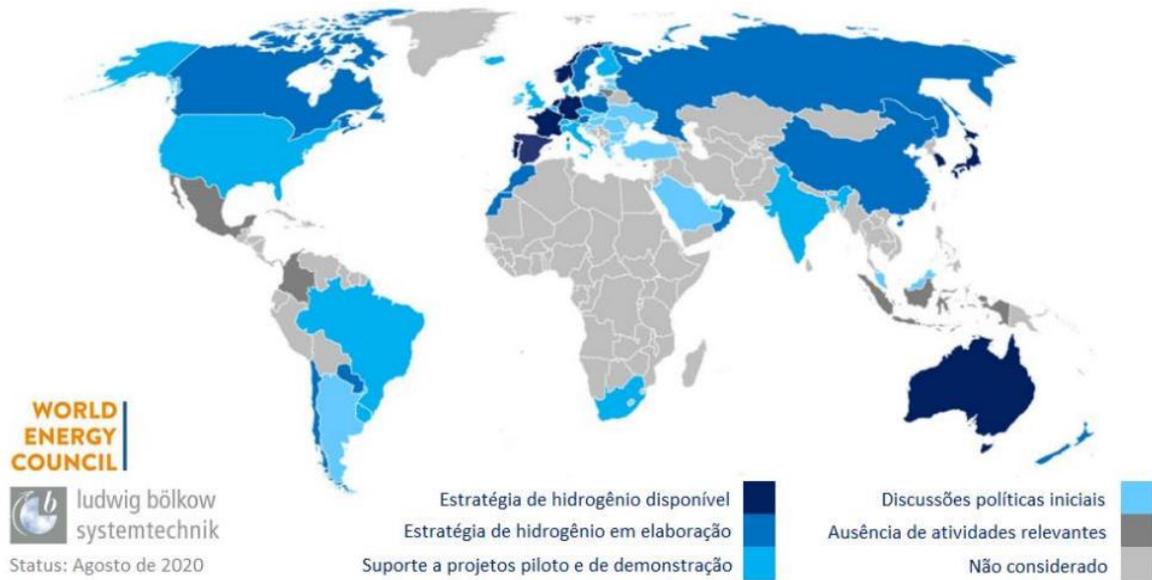
De acordo com Rifkin (2003), o hidrogênio é visto como uma vantajosa solução sustentável para o progresso da humanidade na Terra, uma vez que ele tem grande potencial para ser o substituto do petróleo, sem perda ou diminuição de capacidade energética, e também, sem necessidade de modificações significativas nas tecnologias existentes para a geração de energia. Ainda segundo o autor, dentre as formas de energia, o hidrogênio é a mais leve e mais imaterial, além disso, é a mais eficiente quando “queima”.

Além disso, pode-se afirmar que a grande vantagem do hidrogênio é sua capacidade de armazenamento de energia. Utilizando-o como portador de energia química, composto de moléculas e não apenas de elétrons, como é a eletricidade, o que torna mais viável o transporte e armazenamento de forma similar a outros combustíveis MME (2021). Ou seja, pode-se produzir eletricidade através de qualquer fonte primária de energia e armazenar essa energia através do hidrogênio.

Pode-se observar através da Figura 5 o conjunto de países que fomentam a iniciativa da transição energética para a era do hidrogênio, nota-se que o Brasil compõe os países que impulsionam o desenvolvimento de projetos pilotos, no Capítulo 6 serão expostos esses projetos.

O hidrogênio em si não é suficiente para a descarbonização, tendo em vista que de acordo com IEA (2021), a produção de hidrogênio por meio de combustíveis fósseis em 2020, emitiu a mesma proporção de CO₂ que a junção da Indonésia e os EUA. Então, é importante que haja uma transição dos seus meios de produção, para que haja uma produção mais limpa e sustentável.

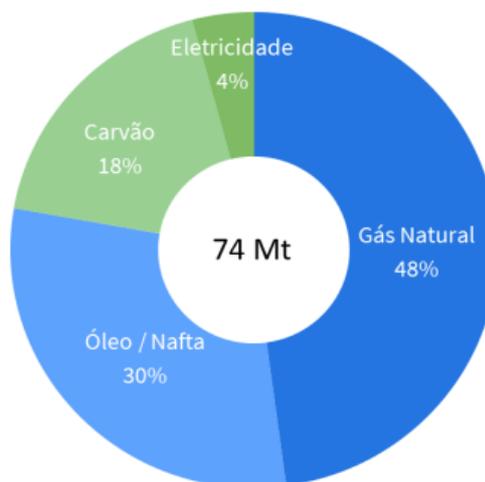
Figura 5: Panorama mundial de ações no âmbito do hidrogênio em 2020.



Fonte: MME, 2021.

Diante disso, sua tecnologia de produçaõ através da eletrólise da água, com a eletricidade utilizada provinda de energias renováveis, com emissão zero de carbono, vem tomando interesses de vários paı́ses, para o avanço da descarbonizaçaõ mundial. Na Figura 6, pode-se observar que a geraçaõ de hidrogênio limpo ainda é pouco significativa no cenário mundial, tendo em vista que a maior parcela da produçaõ ainda é através de combustı́veis fósseis.

Figura 6: Fontes de geraçaõ de hidrogênio no mundo em 2018.



Fonte: MME, 2021.

Para a produçaõ do hidrogênio verde, que é o obtido através da eletrólise, sabe-se que é necessária a utilizaçaõ de eletricidade provinda de fontes renováveis, sendo assim paı́ses que

já são grandes produtores de energias renováveis podem se tornar potenciais fornecedores deste tipo de hidrogênio. Neste aspecto o Brasil se destaca, pois naturalmente tem grande potencial de produção de energia renovável.

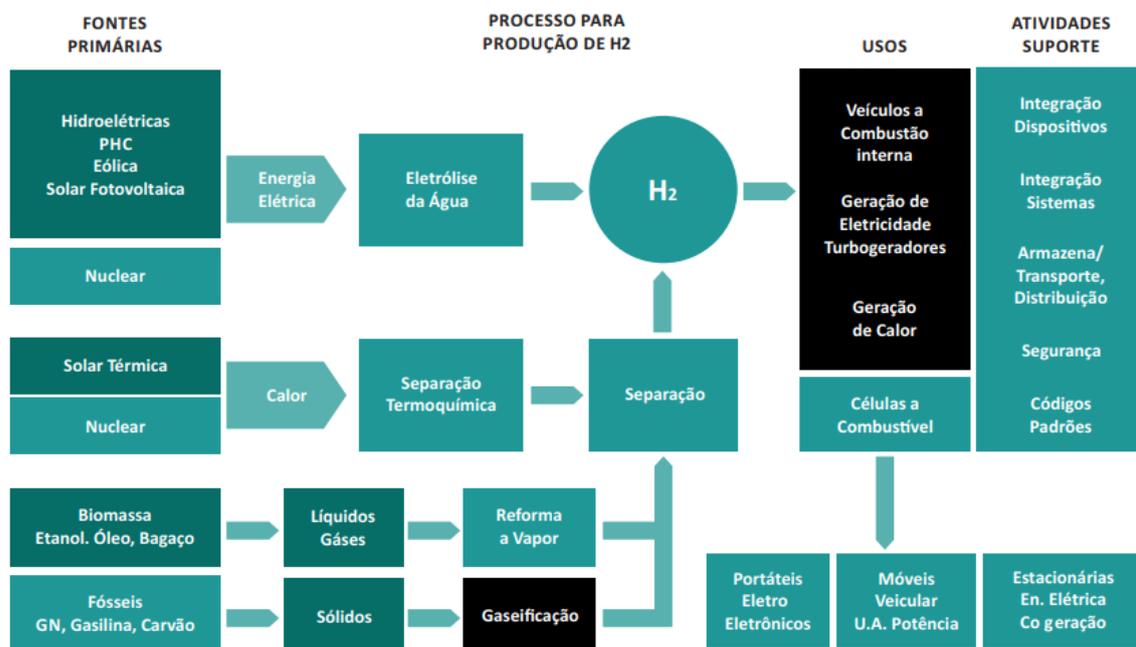
Por fim, de acordo com o MME (2021), o hidrogênio é um elemento químico com grande potencial energético. Se comparado, por exemplo, com o diesel, esse potencial pode ser três vezes superior, ou seja, 1 kg de hidrogênio tem aproximadamente de três vezes o conteúdo energético de 1 litro de óleo diesel. Isso, pois o poder calorífico inferior do hidrogênio é igual a 33,29 kWh/kg e 1 litro de diesel contém 10,24 kWh, já que o seu poder calorífico é igual a 12,0 kWh/kg e a sua densidade (nas CNTP) é igual a 0,853 kg/L.

3. TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio é um elemento químico muito leve e raramente é encontrado de forma isolada no planeta terra, ou seja, ele sempre vem acompanhado de outro elemento químico. Sendo assim se torna necessário a utilização de técnicas e métodos para separar ou extrair o hidrogênio de seus elementos combinados, para que seja possível produzi-lo de forma isolada e assim utilizá-lo como combustível para inúmeras aplicações.

O hidrogênio pode ser obtido de diversas formas, o que o torna bem versátil. Podendo ser obtido através da eletricidade por eletrólise da água, através de fontes como: hidrelétricas, eólicas, solar, dentre outras. Também pode ser obtido a partir da biomassa por reforma catalítica ou gaseificação, seguida de purificação, tais como: etanol, resíduos etc. No entanto, as fontes mais viáveis economicamente são os combustíveis fósseis, tais como: petróleo, carvão e gás natural. Essa versatilidade para captá-lo facilita para que cada país escolha a melhor forma de produzi-lo, de acordo com suas próprias disponibilidades de fontes e tecnologias (LINARDI, 2011). Na Figura 7, podem-se observar as prováveis rotas de produção do hidrogênio, além de algumas aplicações.

Figura 7: Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético.



Fonte: CENEH, citado por CGEE (2010).

De acordo com a sua forma de obtenção e de seus níveis de produção de CO₂, o hidrogênio pode ser classificado por cores, desde as formas mais poluentes até as com poluição zero, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação do hidrogênio por cores

Tipo	Caracterização
Hidrogênio Marrom	O hidrogênio marrom é obtido através da gaseificação do carvão mineral, sem a captura do carbono, sendo assim ele é considerado agressivo para o meio ambiente.
Hidrogênio Cinza	O hidrogênio cinza é o produzido através da reforma a vapor do gás natural, e também sem a captura do carbono, então ele também é considerado nocivo ao meio ambiente.
Hidrogênio Azul	O hidrogênio azul é obtido através da reforma a vapor de combustíveis fósseis, porém com a captura e reutilização do carbono, então ele já é mais eficiente comparado ao cinza e ao marrom.
Hidrogênio Branco	É produzido através da extração do hidrogênio natural, ou seja, sem nenhum elemento acompanhando e não gera nenhuma emissão de carbono.
Hidrogênio Turquesa	Produzido através da pirólise do metano e não gera emissão de carbono.
Hidrogênio Verde	O hidrogênio verde é produzido através da eletrólise da água, com a eletricidade utilizada para a eletrólise proveniente de fontes renováveis. Possui zero emissão de carbono.
Hidrogênio Musgo	É o hidrogênio obtido através de reforma catalítica, gaseificação de plásticos residuais, ou biodigestão anaeróbica de biomassas ou biocombustíveis, com ou sem captura do carbono produzido.
Hidrogênio Rosa	Produzido através da eletrólise, porém a energia utilizada é a partir de fontes de energia nuclear.

Fonte: Modificado de EPE, 2022.

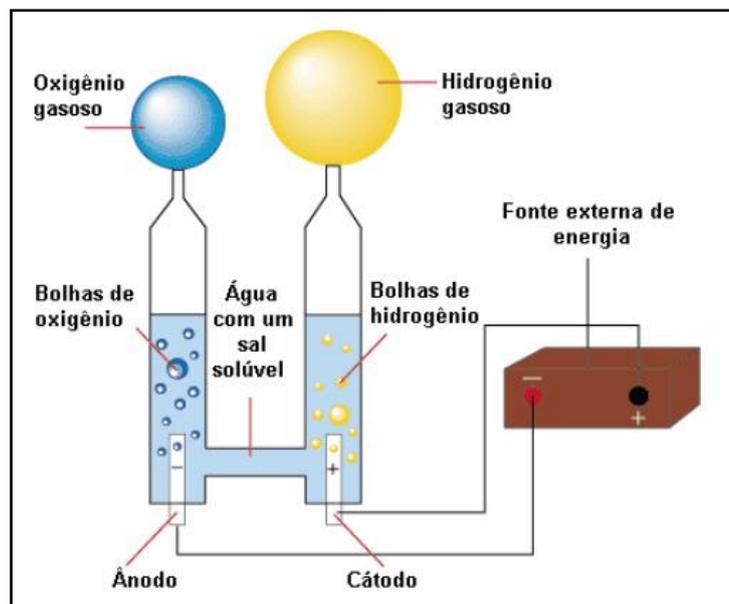
Podem-se observar a partir da Tabela 1, que o hidrogênio verde e o rosa são os mais limpos, entretanto como o hidrogênio rosa depende das tecnologias de produção de energia nuclear e as mesmas ainda não são bem-aceitas pela comunidade, tornando-as pouco usuais, principalmente no Brasil, sendo assim, podemos definir que o hidrogênio verde é o mais viável de utilização, pois não produz carbono e depende apenas de fontes de energia renovável com tecnologias mais propagadas perante a comunidade.

Neste trabalho será mais enfatizado o hidrogênio verde, por ele ser considerado promissor para o processo de descarbonização mundial. Diante disso, a seguir serão apresentados os principais métodos para obtenção do hidrogênio, evidenciando melhor a eletrólise da água, pois através dessa tecnologia é produzido o hidrogênio verde.

3.1. ELETRÓLISE DA ÁGUA

A eletrólise é um método que se baseia na quebra de moléculas da água a partir de uma passagem de corrente contínua, como mostrado na Figura 8.

Figura 8: Eletrólise da água



Fonte: Longo, (2008)

Funciona basicamente com dois eletrodos, um positivo e o outro negativo, submersos em água pura, com sua condutividade aumentada através da adição de um eletrólito. Quando uma corrente contínua é aplicada, o gás hidrogênio desloca-se com direção ao eletrodo do cátodo e o oxigênio desloca-se com direção ao eletrodo do ânodo, fazendo assim a quebra da molécula de H_2O (RIFKIN, 2003). O produto resultante dessa reação é somente oxigênio e hidrogênio (em sua forma gasosa), ou seja, é realizada apenas a quebra da molécula da água.

Esse tipo de tecnologia possibilita a existência de vários sistemas de produção, o que os distingue é, em suma, o material do condutor iônico. O método mais utilizado pela indústria utiliza o hidróxido de potássio como material condutor iônico e pode ser empregado em série, que é a configuração bipolar, ou em paralelo, que é a configuração unipolar (GOLDEMBERG et al, 2012).

Ainda de acordo com o autor, a eletrólise é um processo utilizado há mais de um século, sendo assim a tecnologia já possui uma eficiência energética significativa, onde cerca de 80% a 85% da eletricidade utilizada encontra-se na energia química do hidrogênio produzido.

Segundo Aldabó (2004) a eletrólise já é uma tecnologia firmada, entretanto por causa dos seus custos elevados, ainda é uma tecnologia pouco empregado, sendo mais utilizada em plantas industriais que precisam de um hidrogênio com grande pureza, muito utilizado para a produção de semicondutores e produtos farmacêuticos. De acordo com SÁ et al. (2014) esse método contribui apenas com aproximadamente 5% da produção do hidrogênio.

Então os esforços para melhoramento dessa tecnologia se dão na tentativa de redução dos custos dos materiais a cerca dela, diminuindo esses custos torna possível a concorrência dessa tecnologia de produção, com a mais empregada atualmente no mercado, que é a reforma a vapor.

3.2. TIPOS DE ELETROLISADORES

Atualmente podem-se encontrar três tipos de tecnologias para eletrolisadores no mercado, os alcalinos (AEC), os de membrana de troca de prótons (PEM) e os de membrana de óxido sólido (SOE). A tecnologia dos alcalinos é a mais antiga e conseqüentemente a mais disseminada no mercado. Na Tabela 2 pode-se observar a caracterização dos três tipos.

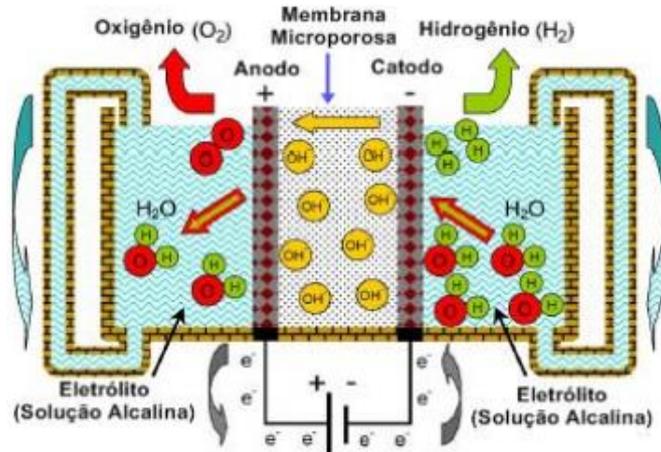
Tabela 2: Caracterização dos eletrolisadores

Tipo	Material utilizado	Temperatura de trabalho
Alcalino	Eletrólitos aquosos de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NAOH)	Inferior a 80°C
PEM	Eletrólitos de polímero de sólido	Inferior a 80°C
SOE	Eletrodos de material cerâmico sólido	Superior a 700°C

Fonte: Souto e Nogueira, 2021.

Os eletrolisadores alcalinos utilizam-se de eletrólitos líquidos, separados por uma membrana microporosa permeável aos íons de hidróxido (OH⁻). Funciona basicamente com uma corrente elétrica aplica a célula ou uma pilha dessas células, que faz com que os íons de hidróxido (OH⁻) se movimentam do cátodo para o ânodo através do eletrólito, gerando hidrogênio no cátodo e oxigênio no ânodo, os dois em suas formas gasosas, como se pode observar na Figura 9.

Figura 9: Esquema de funcionamento de um eletrolisador alcalino.

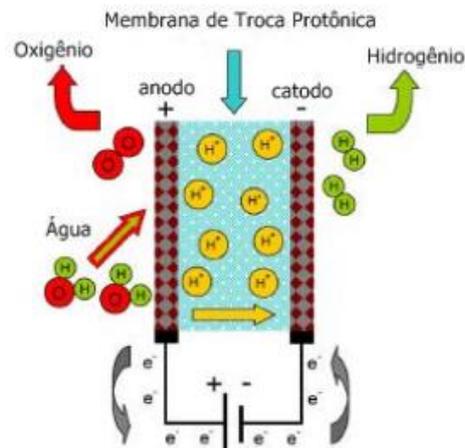


Fonte: URSÚA et al, 2012

Os eletrolisadores do tipo PEM utilizam-se de um eletrólito de polímero sólido. Este tipo de eletrólito suporta o transporte de íons H^+ com grande condutividade. Ele se sobressai em relação ao alcalino, pois produz um hidrogênio com maior pureza, o que para algumas aplicações é algo necessário.

De acordo com Souto e Nogueira (2021) funciona basicamente com uma membrana de polímeros que admite apenas a passagem dos prótons. Quando a água em seu estado puro entrar em contato com o ânodo, desassocia o hidrogênio e o oxigênio na camada catalisadora do ânodo, o hidrogênio atravessa a membrana de polímeros e entra em contato com a camada catalisadora do cátodo, sendo assim, no ânodo a água é decomposta e forma oxigênio e no cátodo é constituído o hidrogênio, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Esquema de funcionamento de um eletrolisador do tipo PEM

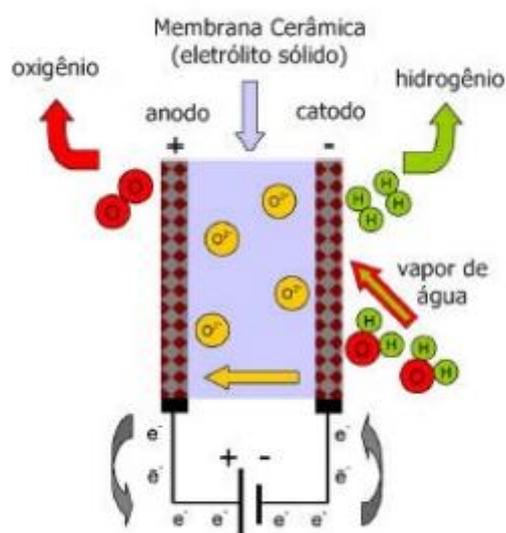


Fonte: URSÚA et al, 2012

Ainda segundo os autores, há um aumento da temperatura, pois acontecem perdas ôhmicas, então parte da energia fornecida é convertida em energia térmica.

Os eletrolisadores SOE se destacam na sua eficiência e na pureza do hidrogênio produzido, com relação aos alcalinos e tipo PEM. Esta tecnologia ainda se encontra em fase de estudos e funciona similar ao eletrolisador alcalino, porém é utilizada uma membrana cerâmica, no lugar da membrana microporosa, como se pode observar na Figura 11.

Figura 11: Esquema de funcionamento de um eletrolisador do tipo SOE



Fonte: URSÚA et al, 2012.

Analisando os aspectos de cada tipo de eletrolisador, Viola (2015) reitera que o eletrolisador alcalino é a tecnologia mais desenvolvida e disponível no mercado, possui capacidade de produção variando entre de 1 a 500 Nm³/h e eficiência em torno de 75%. O eletrolisador do tipo PEM também é disponível no mercado, entretanto apresenta custo mais alto e menor capacidade de produção do hidrogênio, variando cerca de 0,29 a 30 Nm³/h, e são utilizados geralmente associados com painéis fotovoltaicos. Já o eletrolisador do tipo SOE vem com o propósito de elevar a eficiência da eletrólise com o aumento da temperatura de operação, apesar disso, ele ainda está em fase de pesquisa, mas há uma expectativa de disponibilidade no mercado para médio e longo prazo.

3.3. REFORMA A VAPOR

Atualmente a tecnologia mais usada para a produção do hidrogênio em grande escala é a reforma a vapor, que consiste na separação do hidrogênio e carbono existentes no metano ou

no metanol. De acordo com Rifkin (2002) aproximadamente metade da produção mundial do hidrogênio vem da reforma a vapor, que utiliza o metanol ou metano do gás natural.

Ainda segundo o autor, o processo é basicamente a reação do gás natural com o vapor de água em altas temperaturas num transformador catalítico, extraindo assim os átomos de hidrogênio e obtendo o dióxido de carbono como subproduto. Podemos simplificar a reação através da Equação 1.



Também é possível extrair o hidrogênio de outros materiais através da reforma a vapor, porém o mais viável economicamente é o gás natural. De acordo com SÁ et al. (2014) esse método contribui com aproximadamente 40% da produção do hidrogênio, então embora seja a forma mais comercializada para a produção do hidrogênio em grande escala, a reforma a vapor do gás natural também produz o CO₂ no seu processo, então para que esse método se torne menos agressivo ao efeito estufa, se faz necessário a utilização de tecnologia de captura e armazenamento do dióxido de carbono, o que possivelmente tornaria a tecnologia um pouco mais cara.

E de acordo com Azevedo (2012), grande parte das aplicações do hidrogênio o próprio gás natural pode realizar, sem ser necessária a conversão, além disso, é mais fácil armazenar e distribuir o gás natural do que o hidrogênio. Ou seja, converter o gás natural em hidrogênio não é a melhor solução para a energia do futuro, mesmo que o mercado favoreça esse vetor energético.

3.4. PRODUÇÃO BIOLÓGICA

Neste método de produção, o hidrogênio é obtido por meio do produto resultante de atividades metabólicas de micro-organismos, podendo ser de microalgas, cianobactérias, bactérias foto-fermentativas ou fermentativas. Sintetizando, o processo se resume a degradação de substratos para a produção de biogás (LOURENÇO, 2012). O que torna esse método atrativo é a oportunidade de reutilização de resíduos como biomassa, tornando o processo ainda mais sustentável. Porém, de acordo com SÁ et al. (2014) esse método contribui apenas com cerca de 1% da produção do hidrogênio.

Pode-se produzir hidrogênio através do processo biológico basicamente de quatro formas, e estas formas podem ser combinadas entre si. A caracterização desses processos pode ser observada através da Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização dos processos biológicos para produção de hidrogênio.

Tipo	Caracterização
Biofotólise direta da água	Utiliza-se de alga verde, em condições anaeróbicas, e da energia luminosa para produzir hidrogênio pela decomposição da água.
Biofotólise indireta da água	Utiliza-se de cianobactérias, que usam a energia contida nos carboidratos provindas da fotossíntese e geram hidrogênio a partir da decomposição da água.
Fotofermentação	Utiliza-se de bactérias fotossintéticas que usam a energia luminosa para transformar ácidos orgânicos em hidrogênio e carbono.
Fermentação anaeróbica	Utiliza-se de bactérias fermentativas anaeróbicas que convertem carboidratos em hidrogênio.

Fonte: SÁ et al., 2014

Podemos observar que a grande desvantagem nos métodos de biofotólise da água e fotofermentação é a necessidade de luminosidade para que os processos sejam realizados, isso torna o método de fermentação anaeróbica mais vantajoso, pois ele pode produzir o hidrogênio de forma contínua.

3.5. OXIDAÇÃO PARCIAL DE HIDROCARBONETOS

O processo de oxidação parcial de hidrocarbonetos é bastante semelhante com o processo de reforma a vapor, entretanto nesse caso é utilizado o oxigênio ao invés do vapor de água, a fim de separar o hidrogênio do carbono. Utiliza-se geralmente para a produção de hidrogênio por esse método o gás natural, o carvão, o petróleo e a biomassa, que são materiais ricos em hidrogênio (CRUZ, 2010). Podemos simplificar através da Equação 2.



É notório que no processo de oxidação de hidrocarbonetos, é necessário o uso de mais matéria-prima para a produção da mesma quantidade de hidrogênio obtido através da reforma a vapor. De acordo com SÁ et al. (2014) esse método contribui com aproximadamente 30% da produção do hidrogênio.

3.6. GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO

A expressão “Gaseificação” é a conversão termoquímica de um estado sólido ou líquido para o estado gasoso. Então, por esse método, o hidrogênio é obtido a partir do aquecimento do carvão em altas temperaturas, reagindo com o oxigênio para produzir um gás de síntese, que é uma mistura majoritariamente de hidrogênio e monóxido de carbono. E em seguida são realizados processos de separação dos dois gases. De acordo com SÁ et al. (2014) esse método contribui com aproximadamente 18% da produção do hidrogênio.

Segundo Ribeiro (2012), este método é comercialmente desenvolvido, entretanto é mais complexo do que a produção por gás natural, por exemplo, e seu custo é também mais elevado. Porém, como o carvão é um material abundante em alguns lugares e já é utilizado como fonte de energia, torna favorável o desenvolvimento de tecnologias para melhor aproveitá-lo.

3.7. ARMAZENAGEM E TRANSPORTE

As tecnologias de armazenamento e distribuição do hidrogênio são de grande importância para o avanço da implementação do mesmo como fonte de energia, por ainda existir idealização de ele ser um composto perigoso. Apesar disso, de acordo com Aldabó (2004), os métodos nas normas de segurança são similares aos métodos para gasolina e gás natural, por exemplo. Entretanto, ainda segundo o autor, como o hidrogênio é mais leve que o ar, ele se dissemina com mais facilidade do que outros combustíveis, sendo assim em caso de acidentes por vazamento os riscos seriam reduzidos nesse aspecto, porém como ele é inodoro e sua chama é quase invisível, seria necessário o uso de corantes para detectar e controlar uma possível queima.

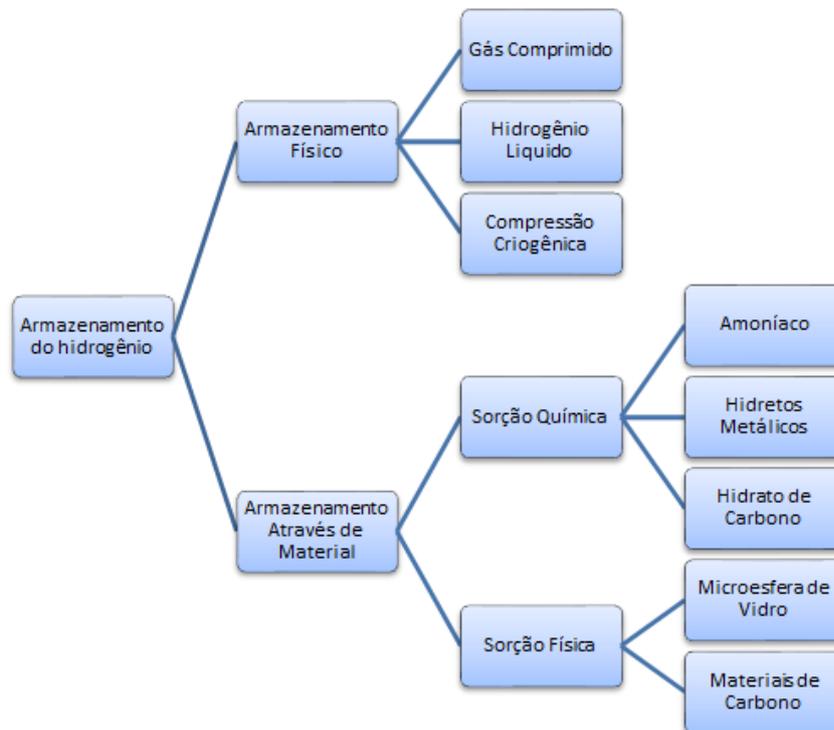
Quanto ao seu armazenamento, já existem vários processos em uso, podendo ser divididos em armazenamento físico, nos estados líquido e gasoso e armazenamento através de outro composto, por sorção química e física, como se pode observar na Figura 12.

No que se refere ao seu transporte, de acordo com Linardi (2010), a energia contida em 1,0 kg de hidrogênio corresponde à energia de 2,75 kg de gasolina. Entretanto, devido à sua massa específica [...] a energia de um litro de hidrogênio equivale à energia de 0,27 litros de gasolina. Então, o hidrogênio possui maior densidade de energia por massa do que a densidade de energia por volume, e isso se torna um empecilho para o transporte, pois os veículos possuem espaço limitado e o transporte deste requer grandes espaços.

Diante disso, podemos apontar que o transporte do hidrogênio está claramente ligado aos métodos de armazenamento, pois é necessário compactar o volume do hidrogênio para transportá-lo na intenção de obter quantidades significativas de energia.

De acordo com CGEE (2010), o armazenamento e transporte do hidrogênio líquido é o mais viável economicamente, pois quando o hidrogênio é modificado do estado líquido para o gasoso, seu volume é 853 vezes maior. Porém, de acordo com Moradi (2019), esse método necessita de muita energia, com cerca de 40% da energia perdida no processo de liquefação.

Figura 12: Processos de armazenamento de hidrogênio



Fonte: Adaptado de Moradi, 2019.

Os métodos mais promissores para o transporte do hidrogênio até 2050 é o armazenamento por amônia em navios, utilizado para grandes deslocamentos e redes de dutos, podendo aproveitar redes já existentes de gás natural, para pequenos deslocamentos. Porém ainda existem gargalos nos elevados custos de transporte e armazenamento, entretanto os mesmos poderiam ser reduzidos através de melhoramento das tecnologias a fim de reduzir o uso de energia nos processos de mudança de estado do hidrogênio e também através do alargamento na escala de produção, armazenamento e transporte, fazendo com que a experiência global torne as tecnologias mais firmadas (IRENA, 2020).

Entretanto, se analisarmos a introdução gradativa da produção do hidrogênio de forma descentralizada, na geração distribuída, as adversidades e os custos evidenciados através do transporte não mais seriam obstáculos, pois não haveria a necessidade de seu deslocamento para a distribuição, apenas do seu armazenamento em pequenas escalas.

4. O HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA

O atual modo de produção de energia necessita do uso de combustíveis fósseis, esgotando os recursos naturais e piorando a situação ambiental do planeta, pois esses combustíveis não são renováveis e sua utilização produz poluentes atmosféricos como o dióxido de carbono, que é o maior causador do efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global (Aldabó, 2004). Diante disso, temos uma grande busca por fontes alternativas de energia, que utilize de forma eficiente e renovável os recursos naturais. Nesse aspecto o hidrogênio se apresenta com bastante potencial de efetivação no mercado.

De acordo com a Nota Técnica, Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicada em 2021, o hidrogênio pode ser usado diretamente como fonte de energia com baixa ou zero emissão de carbono, dependendo do seu método de produção e como vetor utilizado para armazenamento de energia, possibilitando maior introdução de renováveis como a eólica, a solar etc. Sendo assim, o hidrogênio é enxergado como um recurso capaz de facilitar a junção dos mercados de combustíveis, elétrico e industrial.

Como o gás hidrogênio (H_2) não é encontrado ainda no meio ambiente em proporções significativas, ele não é tão considerado como fonte de energia e sim um armazenador de energia, em outros termos um vetor energético. Então, para seu aproveitamento energético ele precisa ser extraído de uma fonte primária (LINARDI, 2011), como visto anteriormente.

A compreensão de o hidrogênio ser o mais provável vetor energético do futuro reflete significativamente ao grande volume de investimento mundial que se multiplica ano a ano, mais especificamente na América do Norte (Estados Unidos e Canadá), Europa (representando cerca de 20 países) e Ásia (Japão, China e Coreia do Sul) em tecnologia de hidrogênio e células de combustível (CGEE, 2002).

Esses grandes investimentos de alguns países, faz com que eles possam futuramente possuir as melhores tecnologias com relação à célula a combustível e a produção do hidrogênio, os tornando possíveis potências mundiais, como hoje alguns países são com relação ao petróleo e ao gás natural, que são os combustíveis mais utilizados no mundo.

De acordo com Bezerra (2021), o hidrogênio possui flexibilidade de aplicações, podendo ser utilizado como matéria-prima, combustível ou como transporte e armazenamento de energia, além disso, é muito promissor aos setores de indústria, transporte, energia e edifícios, por reduzir a emissão de CO_2 , diminuindo assim a poluição do ar quando utilizado. Ofe-

recendo aos especialistas e a sociedade em geral uma opção para descarbonizar processos industriais e em setores econômicos, onde a redução das emissões de carbono é mais alarmante.

Uma combinação de hidrogênio com a tecnologia de células a combustível é elencada como promissora na produção de energia elétrica. De acordo com a CGEE (2002), podemos caracterizar as células a combustível como sendo dispositivos que convertem a energia química de alguns combustíveis em energia elétrica, sem precisar do processo de combustão e ainda com menores proporções de emissão de poluentes e maior eficiência se comparado a dispositivos já utilizados. E o combustível ideal para tais células é o hidrogênio, que pode ser produzido de diversas formas e através de vários tipos de recursos.

Através das células a combustível torna-se realizável a produção de uma energia elétrica de forma descentralizada e constante, e com a utilização do hidrogênio verde como combustível, pode-se enxergar um método de produção de energia limpa, contribuindo para a descarbonização do planeta e com grande confiabilidade, diminuindo os riscos de blecautes. A seguir são apresentadas as tecnologias utilizadas nas células a combustível e suas vantagens e desvantagens.

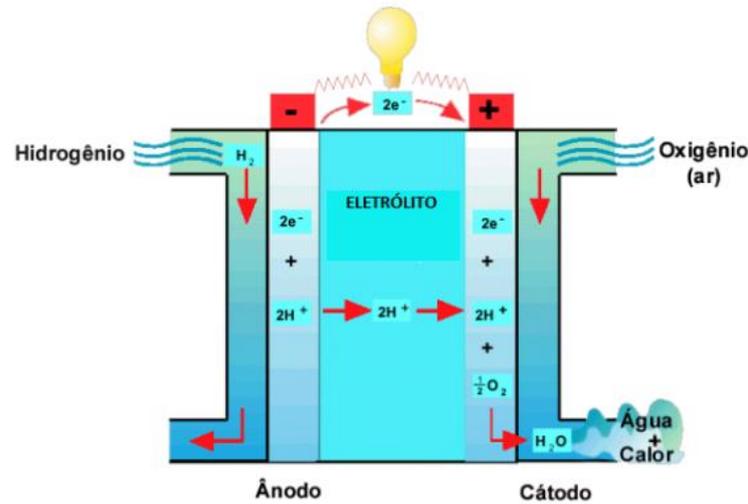
4.1. TECNOLOGIAS UTILIZADAS NAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível é composta por dois eletrodos e o eletrólito. O seu funcionamento é similar ao das baterias, entretanto com a diferença de que a energia convertida na célula a combustível não fica armazenada, pois é fornecida à medida que é ofertado o combustível e o oxidante. Os elementos resultantes dessas células são geralmente calor, energia elétrica e água, como se pode observar na Figura 13. Vale salientar que apesar do nome ser sugestivo, a célula a combustível não requer combustão em seu processo.

De acordo com Aldabó (2004), as células a combustível possuem inúmeras aplicações, através de sua geração estacionária, para usos residenciais, comerciais e industriais. Além disso, ela pode ser empregada para substituir o motor à combustão interna de carros e para substituir baterias em aparelhos eletroeletrônicos.

Geralmente classificam-se as células a combustível de acordo com o eletrólito utilizado e por sua faixa de temperatura. Na Tabela 4 apresentam-se os diferentes tipos de células a combustível, exibindo o eletrólito utilizado, a faixa de temperatura, suas vantagens e desvantagens e as principais aplicações para cada tipo.

Figura 13: Esquema de funcionamento da célula a combustível.



Fonte: Modificado de CAPAZ e MARVULLE, 2006.

Tabela 4: Tipos de células a combustível.

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de Temp. (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	KOH (OH ⁻)	60 – 90	- Alta eficiência (83% teórica)	- Sensível a CO ₂ - Gases ultra puros, sem reforma do combustível	- Espaçonaves - Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H ₃ O ⁺)	80 – 90	- Altas densidades de - 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 de porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão	- Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO ₃ ²⁺)	650 – 700	- Tolerância a CO/CO ₂ - Eletrodos à base de Ni	- Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO ₂ - Interface trifásica de difícil controle	- Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor

Cerâmicas (SOFC)	ZrO ₂ (O ²⁻)	800 - 900	- Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula	-Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma	-Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW -Cogeração eletricidade/calor
-------------------------	-------------------------------------	--------------	---	---	---

Fonte: WENDT, et al., 2000.

Junior et al. (2022) compara os tipos de células, afirmando que a Alcalina (AFC) apresenta elevada eficiência e opera em baixas temperaturas, entretanto seu custo operacional é bastante elevado pois precisa da utilização de hidrogênio e oxigênio puro para que não haja contaminação do eletrólito. Já as de eletrólito polimérico (PEMFC) tem operação bem flexível, pois apresenta tamanho e peso reduzido, sendo ideal para aplicações em automóveis elétricos. Contudo, células de ácido fosfórico (PAFC), operam com temperaturas mais altas, entre 160°C e 200°C e tem potência na ordem de megawatt (MW), entretanto sua eficiência poderá ser limitada através da corrosão da célula pelo ácido fosfórico.

As células a combustível vêm tomando espaço nas pesquisas e no mercado de energia, se tornando uma tecnologia promissora devido a sua flexibilidade de aplicações, entretanto como a maioria das tecnologias, as células a combustível têm seus pontos positivos e seus pontos negativos, sendo assim a seguir serão apresentadas as vantagens e as desvantagens da sua utilização.

4.1.1. VANTAGENS

A principal vantagem atualmente, com uso das células a combustível é a baixa ou nula produção de gases poluentes, pois como vimos anteriormente, o resultado da reação, quando o combustível utilizado for o hidrogênio, é apenas calor, eletricidade e água. Além disso, como a célula não tem componentes móveis, também possui uma baixa emissão de sons, diminuindo assim a poluição sonora e podendo ser instalado em locais onde requer pouco barulho.

Outro aspecto positivo é sua eficiência, pois as células realizam a conversão direta da energia química para a energia elétrica, sem a necessidade de combustão e ainda com a possibilidade de cogeração, tendo em vista que a reação interna da célula produz calor, que também poderá ser utilizado para diversas aplicações. O calor resultante da “combustão” do hidrogênio por unidade de massa é maior que o de outros combustíveis usuais como a gasolina e o diesel, tornando a utilização do hidrogênio a mais eficiente (SILVA, 2016). No mais, as células a combustível também possuem uma flexibilidade de aplicações, o que as tornam ain-

da mais viáveis e competitivas no mercado, podendo ser utilizadas na geração distribuída, na cogeração, nos transportes, dentre outros.

4.1.2. DESVANTAGENS

A maior desvantagem das células a combustível ainda é o elevado custo, pois ela se torna mais viável com o uso do hidrogênio como combustível e o hidrogênio por sua vez ainda possui um custo alto de produção, armazenamento, transporte e distribuição.

De acordo com Rifkin (2003), a produção das células a combustível ainda não alcançou o seu ponto crítico para tornar possível uma redução considerável de custo por unidade manufaturada. Além disso, o método menos poluente de produção do hidrogênio, que é através da eletrólise, ainda é pouco utilizado, contribuindo aproximadamente com apenas 5% da produção do hidrogênio.

5. O HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é vista como a forma de democratização da energia, tornando-a mais acessível a todos, descentralizando sua comercialização e aumentando o poder de escolha do usuário final. Há alguns anos, pouco se notava a produção de energia elétrica através da microgeração e minigeração, porém atualmente, com a popularização das tecnologias de produção, tornou-se crescente o aumento da introdução de pequenos produtores de energia no sistema elétrico.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define-se geração distribuída como:

Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas - ou não - pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. (ANEEL, 2021).

A opção pela geração distribuída se torna relevante para a garantia de abastecimento de energia elétrica, tendo em vista que essa tecnologia denota de um benefício crucial que é a independência das redes de transmissão e distribuição das concessionárias, além disso, possibilita aumentar a eficiência energética (LORA e HADDAD, 2006).

Aldabó (2004) acrescenta que nos países em desenvolvimento a geração de energia em pequena escala poderá reduzir a emissão de carbono em 42%, e ainda proporcionará a inserção de fontes energéticas mais baratas e limpas em vez de criar usinas térmicas e expandir linhas de transmissão. Entretanto, em vários países o mercado ainda favorece o modelo centralizado, pois as concessionárias ainda enxergam a geração distribuída como uma ameaça.

De acordo com MME (2021), o Japão foi pioneiro na inserção de célula a combustível de hidrogênio na geração distribuída, de 2009 a 2020 comercializou cerca de 300 mil unidades desta tecnologia e pretende atingir a meta de mais de 5 milhões de unidades até 2030. As unidades operam em conjunto com a rede elétrica e com essa inserção foi possível uma redução de aproximadamente 50% nas emissões domésticas de CO₂.

5.1. CENÁRIO ATUAL DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Numa perspectiva mundial, a principal fonte de geração empregada na GD atualmente é a energia solar fotovoltaica, sendo assim, quando se refere à geração distribuída, é primordial falar sobre aspectos que tangem esta tecnologia de geração. Desta forma, de acordo com

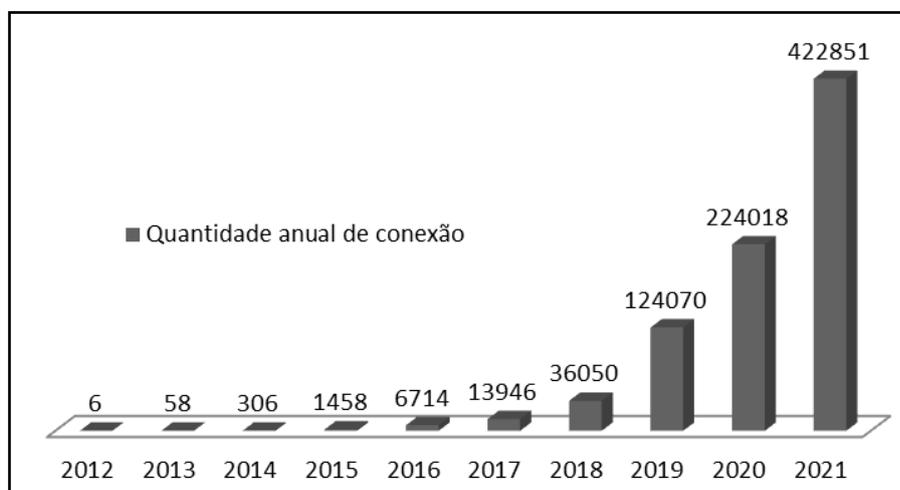
Kozelinski (2021), a potência instalada de energia solar fotovoltaica no mundo, no ano de 2018 foi de 215 GW, com uma perspectiva de crescimento para atingir 530 GW no ano de 2024.

No Brasil não é diferente, há um expressivo crescimento da geração distribuída, considerando os últimos 10 anos. De acordo com dados da ANEEL, em 2012 no Brasil foram conectadas apenas 6 unidades de GD, sendo todas elas provindas da geração solar fotovoltaica. Entretanto, em abril de 2012, foi aprovada a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, tornando possível o consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica e, além disso, conceder o seu excedente de geração para a concessionária de sua região. Com o vigor desta resolução, foi notório o aumento da inclusão da GD no sistema elétrico brasileiro.

Em 2015, a Resolução Normativa nº 482/2012 foi revisada e modificada pela Resolução Normativa nº 687/2015 trazendo melhorias e facilitando ainda mais o acesso a GD no Brasil. Dentre as melhorias estão o aumento do tempo de validade dos créditos de compensação, o detalhamento na fatura, a inclusão do autoconsumo remoto e da geração compartilhada, entre outros.

Sendo assim, nove anos após entrar em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, e cinco anos após a modificação pela Resolução Normativa nº 687/2015, no ano de 2021 foram conectadas 422.932 unidades de GD, com uma variedade de fontes como: energia solar fotovoltaica, térmica, eólica e hídrica. E até maio de 2022 já haviam sido conectadas 150.757 unidades de GD sendo a sua grande maioria proveniente da energia solar fotovoltaica, mas também de térmicas e eólicas, de acordo com a Figura 14.

Figura 14: Gráfico da evolução da geração distribuída no Brasil.



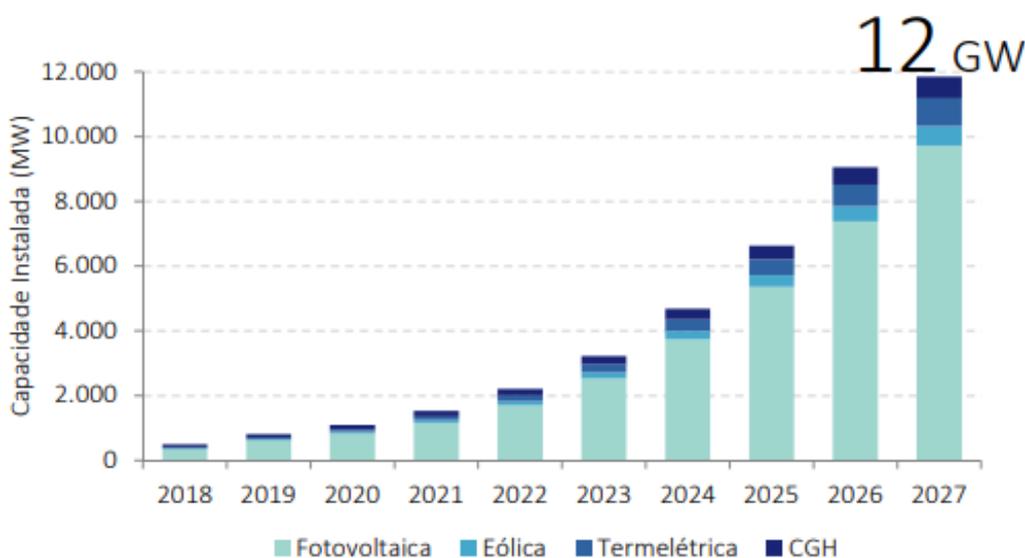
Fonte: Modificado de ANEEL, 2022.

Os investimentos em GD são fundamentados pelas benfeitorias que pode trazer ao sistema elétrico, como: postergar a necessidade de expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, diminuir o carregamento das redes, reduzir as perdas, diversificar as fontes e frear impactos ambientais (ANEEL, 2022).

Em 2019, foram instalados 1,5 GW em sistemas de geração distribuída no Brasil, sendo a produção através de energia solar a segunda maior fonte em acréscimos de capacidade instalada na matriz elétrica brasileira para este ano, ultrapassando o valor da energia eólica e da energia solar fotovoltaica centralizada, mantendo-se atrás somente da hidrelétrica (EPE, 2021).

Observa-se que há um grande crescimento em optantes por energia solar fotovoltaica no Brasil, de maneira que, pode-se justificar essa ampla adesão por múltiplos fatores, entre eles, os incentivos fiscais, o custo acessível e o potencial geográfico de geração solar fotovoltaica, tornando o sistema viável economicamente. De acordo com a EPE (2021), há indicadores de que em 2027 o Brasil terá 1,35 milhão de adeptos a geração distribuída, somando 11,9 GW e com relação à capacidade instalada, poderá atender cerca de 2,4% da carga total nacional, conforme é possível notar na Figura 15.

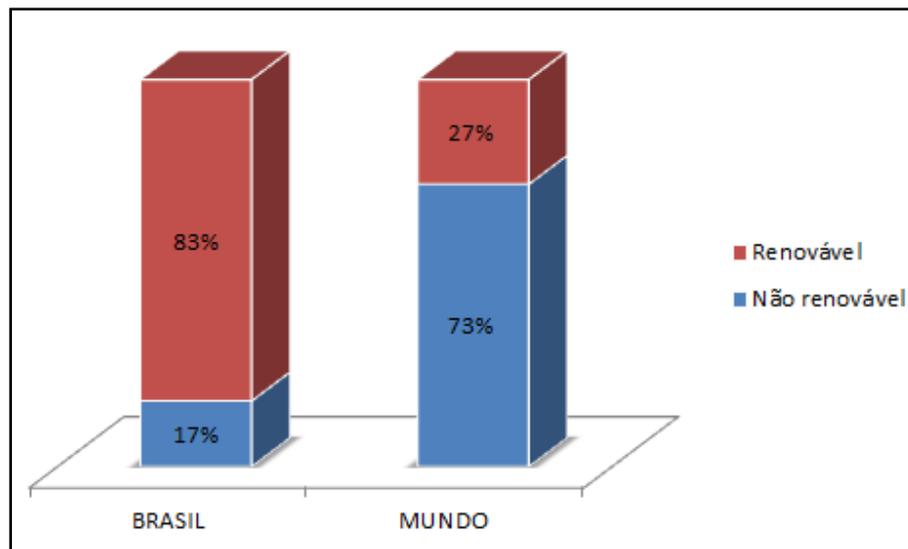
Figura 15: Previsão para a capacidade instalada de geração distribuída no Brasil.



Fonte: EPE, 2021

Além disso, vale salientar, que na matriz elétrica brasileira, atualmente prevalece o uso de energias renováveis, tornando o Brasil mais limpo no âmbito da produção de energia, em relação à matriz elétrica mundial. Como se pode observar através da Figura 16.

Figura 16: Uso de fontes renováveis e não renováveis para a geração de energia elétrica no ano de 2019.



Fonte: Adaptado de EPE, 2022.

Sendo assim, como as tecnologias renováveis estão bem difundidas no país, torna mais viável a interseção entre tecnologias renováveis e geração distribuída.

5.2. O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA DEMOCRATIZAÇÃO DA ENERGIA

Como o hidrogênio tem uma flexibilidade na sua forma de obtenção, vários lugares poderão produzi-lo de formas diferentes, sendo assim através do hidrogênio observa-se pela primeira vez na história da humanidade uma possibilidade real de democratização da energia, que possivelmente trará mais desenvolvimento e reduzirá os conflitos políticos (RIFKIN, 2003).

É notável que quando se cita o hidrogênio como fonte de energia, há uma representação de que ele é uma fonte limpa e renovável, porém como vimos nos capítulos anteriores, essa afirmação só é verdadeira quando o hidrogênio é obtido por meio de alguma fonte renovável, como é o caso do hidrogênio verde, que é produzido sem emissões de CO₂.

A fonte renovável mais difundida e mais promissora no mercado atualmente é a solar e de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia para 2026 da Empresa de Pesquisa Energética:

Dentre as tecnologias de geração distribuída de pequeno porte, destaca-se a baseada no aproveitamento solar fotovoltaico. Essa tecnologia se apresenta com maior potencial de penetração no horizonte decenal, em razão da sua modularidade e custo decrescente. Adicionalmente, é considerada no Plano a contribuição de sistemas a biogás de pequeno porte (EPE, 2017).

Por meio da geração distribuída, cada residência, empresa e comunidade do mundo terá o potencial de se tornar produtor e/ou consumidor e poderá vender e comprar seu próprio hidrogênio e eletricidade (RIFKIN, 2003). E com o advento da “economia do hidrogênio”, as células a combustível serão empregadas à geração distribuída de energia elétrica, com produções de pequeno porte comparando-as com as grandes centrais elétricas (LINARDI, 2011).

Segundo Aldabó (2004) há um consenso entre os especialistas na área, de que no futuro a célula a combustível ocupará a liderança no mercado da geração distribuída, por causa da sua eficiência, da sua flexibilidade e da sua modularidade. Além de sua confiabilidade, diminuindo as interrupções e blecautes de energia elétrica.

Sendo assim, pode-se afirmar que o hidrogênio é promissor no que se refere à democratização da energia elétrica, pois quando suas tecnologias forem mais bem difundidas, cada residência, indústria ou comércio poderá gerar sua própria energia limpa, através das células a combustível de hidrogênio verde, diminuindo a necessidade de extensas linhas de transmissão e grandes redes de distribuição.

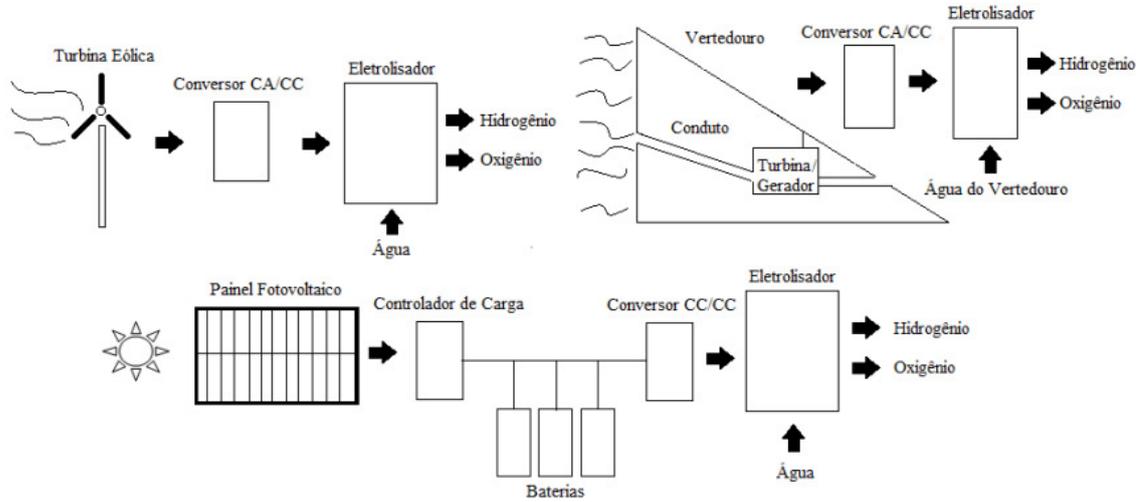
5.3. HIDROGÊNIO VERDE NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O hidrogênio verde é produzido através do processo de eletrólise da água, onde a eletricidade utilizada para a realização da eletrólise é provinda de fontes de energia renováveis e limpas como, por exemplo: energia solar fotovoltaica e energia eólica. De acordo com Viola (2015), a produção de hidrogênio verde é realizada basicamente por três etapas: obtenção da energia elétrica primária, a compatibilização da energia elétrica utilizada pelo eletrolisador e pôr fim a própria produção de hidrogênio. Na Figura 17 pode-se observar a demonstração dessas três etapas para três fontes primárias distintas: a eólica, a solar fotovoltaica e a hidrelétrica.

A primeira indústria a produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água e com o uso de energia renovável e limpa iniciou suas atividades no ano de 1995 no estado da Califórnia - EUA, o estado se tornou pioneiro na tecnologia, era produzido de 42 a 56 metros cúbicos de hidrogênio por dia (ALDABÓ, 2004).

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis - IRENA (2020), é a popularização das energias renováveis que influencia na redução de seus custos e acompanhado do aprimoramento das tecnologias dos eletrolisadores é capaz de diminuir os custos do hidrogênio verde. Tudo isso também, com a interferência da necessidade de descarbonização da matriz energética.

Figura 17: Diagrama da produção de hidrogênio verde.



Fonte: Viola, 2015.

Acrescentando a afirmação anterior, de acordo com a EPE (2022):

O hidrogênio verde foi identificado como substituto estratégico dos combustíveis fósseis para a obtenção de energia limpa no longo prazo para os setores de difícil abatimento e como tecnologia de armazenamento de energia para lidar com a maior inserção de fontes renováveis variáveis nos sistemas elétricos.

Vale ressaltar que há uma necessidade ambiental no que se refere à descentralização da produção de energia, pois mesmo com o estereótipo de que as energias renováveis não geram impactos ambientais, a sua produção em grande escala, através de enormes centrais elétricas, ainda têm características prejudiciais ao meio ambiente, sendo capaz de trazer impactos à fauna e flora da região, podendo trazer também poluição sonora e visual, dentre outros danos à comunidade local.

De acordo com IRENA (2020), com base no cenário atual, há uma previsão de queda nos custos de energia renovável e de melhorias nas tecnologias dos eletrolisadores, tornando o custo do hidrogênio verde competitivo com os combustíveis fósseis, até o ano de 2030.

Então, tomando como pressuposto que o hidrogênio verde é o vetor energético mais promissor para os próximos tempos, torná-lo acessível aos consumidores e inseri-lo na geração descentralizada através das células a combustível é um fator crucial para o desenvolvimento socioeconômico sustentável do mundo.

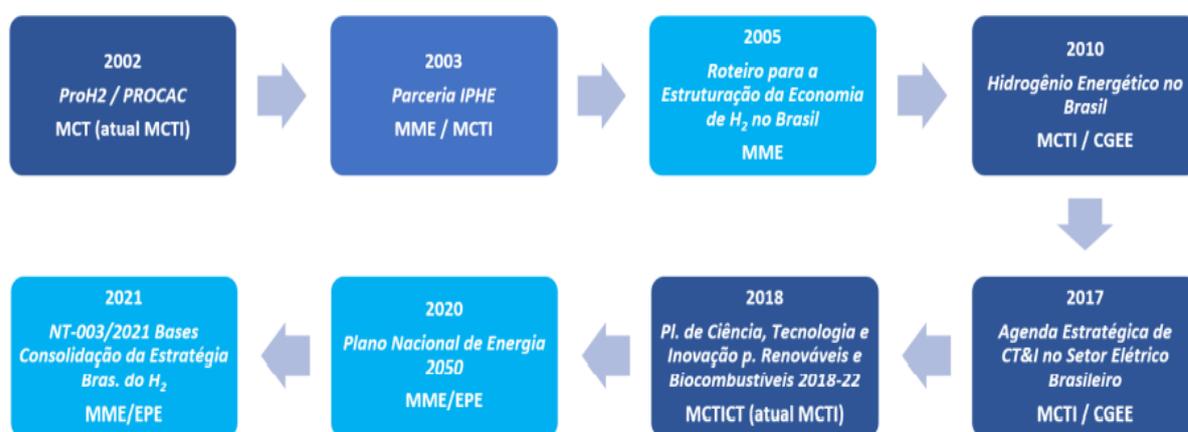
Além disso, se cada residência, indústria, comércio e demais unidades consumidoras pudessem produzir seu próprio hidrogênio a partir de fontes renováveis, a título de exemplo

com painel solar fotovoltaico, armazená-lo e utilizá-lo nos períodos noturnos e de insuficiência solar, tornaria obsoleta a necessidade de utilização de baterias, tornando os sistemas de geração distribuída autossuficientes, ou seja, independentes das concessionárias de energia elétrica. Vale ressaltar que segundo Viola (2015), neste caso é imprescindível que os valores de tensão e de corrente no ponto de máxima potência do painel solar estejam o mais aproximado possível dos valores de operação dos eletrolisadores, isso é possível adicionando a quantidade de módulos correta em série e utilizando o sistema de forma isolada apenas para a produção do hidrogênio.

6. CENÁRIO ATUAL DO HIDROGÊNIO NO BRASIL

No Brasil é possível observar ações de políticas públicas relevantes para a implementação da cadeia de produção do hidrogênio a partir do início dos anos 2000, com a criação do Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a economia do hidrogênio (MME, 2021). Na Figura 18 podem-se observar as movimentações do poder público no âmbito do hidrogênio no país.

Figura 18: Movimentações governamentais para o hidrogênio no Brasil.



Fonte: MME, 2021.

Como as fontes de energias renováveis são significantes na matriz energética brasileira e também possuem grande potencial de crescimento, há um aumento na expectativa para produção do hidrogênio verde no país, e já podem ser observadas movimentações que favorecem esse avanço.

A exemplo disto há a criação da proposta de lei do hidrogênio, a PL 725/2022, que tramita no congresso nacional em sua fase inicial e tem como propósito preencher a falta de legislação sobre a entidade que seria responsável pela regulamentação do hidrogênio e também firma meios de incentivo para o uso do hidrogênio verde.

O projeto estabelece que convenha a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), regular, autorizar e fiscalizar as atribuições no âmbito do hidrogênio, ou seja, a ANP possivelmente será o órgão alocado para regulamentar e fiscalizar a produção, o transporte e o armazenamento do hidrogênio.

De acordo com a PL 725/2022, há uma previsão de que, até 2032, seja inserido no mínimo 5% de hidrogênio na rede de gasodutos e ainda que até 2050 esse percentual já esteja em 10%. A PL também incentiva o uso do hidrogênio verde, determinando que 60% do hidrogê-

nio inserido a partir de 2032 sejam deste e ainda que a partir de 2050 essa fração já esteja em 80%.

Ainda segundo a PL 725/2022, com essas medidas o Brasil passa a integrar o conjunto de países que veem o hidrogênio verde como uma das soluções promissoras para futuro energético do planeta, assim como, Chile, Estados Unidos, China, Reino Unido, Alemanha, França, Países Baixos, Arábia Saudita e Austrália.

Também exemplificando o crescimento da expectativa sobre o hidrogênio verde no Brasil, temos o anúncio do projeto-piloto para a implementação da primeira usina de hidrogênio verde do país, divulgado em 2021 e que terá suas instalações no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no estado do Ceará.

De acordo com o Governo do Ceará a planta terá capacidade de 3 MW e um módulo eletrolisador moderno, que garante a produção do combustível de fonte renovável. A unidade modular será capaz de produzir cerca de 250 Nm³ por hora de gás hidrogênio. Os esforços vêm da multinacional EDP BRASIL, investindo cerca de R\$42 milhões nesse novo empreendimento e assim o estado do Ceará se torna pioneiro em usina de hidrogênio verde no país.

Ainda no estado do Ceará, em março de 2022, o governo anunciou mais uma empresa interessada em investir em hidrogênio verde no Complexo do Pecém, a empresa H₂ Green Power. De acordo com o governo do estado, a intenção é elevar o Ceará a uma posição de destaque no que se refere a energias renováveis no país.

Pode-se afirmar que o Brasil é um país que possui grande potencial para a geração de hidrogênio verde, justificado pela diversificação de energias renováveis produzidas no país e considerável fração destas na matriz energética, além de possuir expectativas significativas para a capacidade de crescimento da área.

Confirmado pela EPE (2022), “O esperado avanço na demanda mundial pelo hidrogênio verde coloca o Brasil em destaque como potencial supridor internacional, dada a riqueza local de recursos renováveis e consequente competitividade de geração, com destaque para as fontes eólica e fotovoltaica”.

Ainda segundo o órgão, poderá haver concorrência em busca de recursos renováveis para a geração de eletricidade, pois tanto o Sistema Interligado Nacional (SIN), quanto à indústria terão demanda para este. Como consequência disto, o mercado de energias renováveis poderá ser impulsionado (EPE, 2022).

Além da produção do hidrogênio verde, no Brasil já estão sendo desenvolvidas pesquisas que estudam potenciais fontes de hidrogênio branco, que é o hidrogênio natural, em alguns estados como Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Roraima, Bahia e Ceará.

O Brasil por ser grande em extensão territorial abrange várias zonas propícias à geração e preservação do hidrogênio branco. Os processos iniciais das pesquisas mostraram grandes potenciais para a exploração do hidrogênio. As pesquisas foram realizadas em parceria com a Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) e a empresa Engie Brasil e obteve ótimos resultados.

Foram constatadas grandes concentrações de hidrogênio em reservas profundas da Bacia do São Francisco, comprovando a existência de sistemas ativos de hidrogênio nas áreas (EPE, 2022). Além disso, de acordo com MME (2021), há reservas de hidrogênio branco conhecidas em, pelo menos, quatro estados brasileiros, como: Ceará, Roraima, Tocantins e Minas Gerais, entretanto ainda não são exploradas.

Agregando a isto, estão sendo desenvolvidos projetos no âmbito da produção do hidrogênio com baixa emissão de carbono, na Tabela 5 exemplificam-se alguns projetos, sendo a maioria para a produção do hidrogênio verde, além disso, pode-se observar que grande parte está sendo desenvolvido na região nordeste, com destaque para o estado do Ceará.

Tabela 5: Projetos no âmbito do hidrogênio no Brasil

Projeto	Empresa	Local	Escala	Estágio
Purificação de H ₂ gerado	Eletronuclear	Angra I e II - RJ	150-300 kg H ₂ /d	P&D
H ₂ V	PTI	Foz do Iguaçu - PR	Piloto	P&D
H ₂ V híbrido (UHE e FV)	PTI	CESP - SP	Piloto	P&D
H ₂ V híbrido (UHE e FV)	Furnas	Itumbiara - GO	Piloto	P&D
Reforma a vapor de bioCH ₄ para produzir bioH ₂ e NH ₃ V	Yara com Raízen	Interior de SP	20.000 m ³ /d	Comercial em 2023
H ₂ V em transporte público	Neoenergia	CE		MoU
Fertilizante (NH ₃ V)	Unigel	Camaçari - BA	Comercial	Conversão no final de 2022
H ₂ V e NH ₃ V de eólica	Enterprize Energy	RN	Comercial	MoU
H ₂ V	Fortescue	Porto do Açu - RJ	Comercial (300 MW e 250 kt NH ₃)	MoU
H ₂ V	Fortescue	Porto do Pecém - CE	Comercial	MoU
H ₂ V	Energix	Porto do Pecém - CE	Comercial (600 kt H ₂)	MoU
H ₂ V	Qair	Porto do Pecém - CE	Comercial (540 MW)	MoU
H ₂ V	White Martins (Linde/Praxair)	Porto do Pecém - CE	Comercial	MoU

H ₂ V	EDP	Porto do Pecém - CE	Comercial (250 m ³ H ₂ /h)	MoU
H ₂ azul e verde	Qair	Porto de Suape - PE	Comercial (540 MW)	MoU
H ₂ V	Neoenergia	PE	Piloto	MoU

Fonte: EPE, 2022.

Por fim, pode-se observar que o Brasil vem se preocupando de forma crescente com a necessidade de transição energética, investindo em estudos para desenvolvimento do hidrogênio verde no país, para assim utilizar melhor suas fontes naturais e renováveis de energia. Desenvolvendo não só um melhoramento no aspecto ambiental, mas também fomentando a economia do país.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que o uso do hidrogênio é visto como promissor para os próximos anos, isso é justificado através da sua abundância e versatilidade de produção. Além disso, com a expectativa de escassez do petróleo, existe a necessidade de um novo combustível para sucedê-lo no mercado, tornando o hidrogênio um elemento crucial para este feito, entretanto este ainda é produzido majoritariamente através de tecnologias que emitem GEE.

Diante do exposto, é possível considerar que à medida que as tecnologias de produção do hidrogênio verde estiverem se difundindo e se aprimorando, tornará mais propícia a inserção deste tipo de hidrogênio na geração distribuída, alavancando ainda mais a utilização da energia renovável e diminuindo consideravelmente a emissão de GEE. E ainda aumentando a variedade de formas de produção de energia para a geração distribuída e conseqüentemente a possibilidade de escolha do consumidor final.

É possível observar que o Brasil é bastante promissor na produção do hidrogênio verde, tendo em vista os fatores naturais para a produção de energia renovável e diante disso há um crescimento na movimentação de investimentos por parte dos governantes e de empresas, o que pode tornar o país um grande produtor de hidrogênio verde, alavancando a economia nacional e gerando emprego e renda para a população.

Para a introdução efetiva do hidrogênio na economia, nota-se que é imprescindível um melhoramento nos métodos de transporte e armazenamento do hidrogênio e ainda para sua produção “verde” é necessário diminuir os custos dos eletrolisadores. Entretanto os problemas com transportes seriam reduzidos, se aplicada a produção através da geração distribuída.

Por fim, é notável a necessidade de disseminação desta transição energética, para que haja mais esforços e conseqüentemente mais investimentos no desenvolvimento de tecnologias e criação de políticas públicas de incentivo no âmbito do hidrogênio verde e sua inserção na geração distribuída.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho se ateve apenas a exposição do que envolve o hidrogênio na geração distribuída, entretanto há outros aspectos na inserção da economia do hidrogênio para uma matriz energética mais limpa. Sendo assim outros assuntos são importantes para serem abordados, no panorama do hidrogênio, como por exemplo:

- Os impactos ambientais da produção de forma centralizada do hidrogênio verde, com a inserção de grandes parques eólicos e fotovoltaicos;
- Impactos ambientais com a utilização da água para o processo de eletrolise em grande escala;
- Perspectiva de desenvolvimento e implementação dos eletrolisadores mais eficientes, os do tipo SOE.
- Comparação da eficiência energética entre o hidrogênio e o gás natural, para verificar a viabilidade da implementação massiva do hidrogênio como combustível.

BIBLIOGRAFIA

ALDABÓ, Ricardo. **Célula combustível a hidrogênio: fonte de energia da nova era.** Artiber, 2004.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 956, 2021.** Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>> Acesso: 10 de maio de 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de informações da geração da ANEEL - SIGA.** Disponível em: < <https://bit.ly/2IGf4Q0>> Acesso em: 09 de maio de 2022

BBC, 2021. **CO2: os gráficos mostram que mais da metade das emissões ocorreram nos últimos 30 anos.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-59013520#:~:text=Cerca%20de%2086%25%20das%20emiss%C3%B5es,por%20petr%C3%B3leo%20e%20g%C3%A1s%20natural>>. Acesso em: 17 de maio de 2022.

BBC, 2022. **Dólar, inflação e petróleo: os impactos do conflito da Ucrânia para o Brasil.** Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60487877>> Acesso em: 17 de maio de 2022.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia.** 2021.

CAPAZ, Rafael Silva; MARVULLE, Valdecir. **Arte da tecnologia do hidrogênio: review.** Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2002). **Programa brasileiro de células a combustível.** Brasília: CGEE.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2010). **Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025.** Brasília: CGEE.

CRUZ, Flávio Eduardo da. **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação exergética e custo de produção.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DA COSTA SOUTO, Hugo José; NOGUEIRA, Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto. **O Hidrogênio Como Vetor Energético do Futuro**. Neutro à Terra, n. 28, 2021.

DA SILVA, Inara Amoroso. **Hidrogênio: Combustível do Futuro**. Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, 2016.

DELGADO, Fernanda; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **O desafio da transição energética na indústria do petróleo**. Revista Conjuntura Econômica, v. 75, n. 04, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Rio de Janeiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 12 de maio de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Rio de Janeiro, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Rio de Janeiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Rio de Janeiro, 2022.

FREIRE, Leandro Lopes de Azevedo et al. **Células a combustível e hidrogênio como fonte de energia**. 2012.

GOLDEMBERG, José et al. **Série energia e sustentabilidade energias renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2021. **Hub de H2V: Governo do Ceará assina mais um Memorando de Entendimento para produção de Hidrogênio Verde**. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2022/03/17/hub-de-h2v-governo-do-ceara-assina-mais-um-memorando-de-entendimento-para-producao-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2021. **O Ceará receberá a primeira usina de hidrogênio verde do Brasil com operação já em 2022.** Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2021/09/01/ceara-recebera-a-primeira-usina-de-hidrogenio-verde-do-brasil-com-operacao-ja-em-2022/>>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

GRUPO DE ESTUDOS DO SETOR ELÉTRICO UFRJ (GESEL). **Observatório de hidrogênio**, n. 4, 2021. Disponível em: <<http://www.gesel.ie.ufrj.br/index.php/Posts/index/1426>>. Acesso em: 5 de julho de 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (IBP). **COVID -19 e os impactos sobre o mercado do petróleo**, 2020.

International Energy Agency (IEA). **Global Hydrogen Review 2021.** Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/5bd46d7b-906a-4429-abdae9c507a62341/GlobalHydrogenReview2021.pdf>>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

International Renewable Energy Agency (IRENA). **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050.** 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>>. Acesso em: 07 de maio de 2022.

International Renewable Energy Agency (IRENA). **Green hydrogen cost reduction.** 2020. Disponível em: <<https://irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>>. Acesso em: 01 de maio de 2022.

JUNIOR, Silvio Gentil Jacinto et al. Células a combustível: possibilidades e limitações. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, 2022.

KOZELINSKI, Guilherme Carvalho. **Políticas da geração distribuída de energia elétrica no Brasil e no mundo.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LINARDI, MARCELO. **Hidrogênio e células a combustível: Programa brasileiro de I&D.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, 2011.

LONGO, V.A.M. **Produção biológica de hidrogênio.** Florianópolis: UFSC, 2008.

LORA, Electo Eduardo Silva et al. **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais.** Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

LOURENÇO, Rafaela David Fernandes. **Valorização de resíduos agro-industriais para a produção biológica de hidrogênio**. 2012. Tese de Doutorado. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/8820/1/ulfc104271_tm_Rafaela_Louren%C3%A7o.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2022.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**, 2021.

MORADI, Ramin; GROTH, Katrina M. **Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 23, 2019.

RIBEIRO, Cláudia Garrastazu. **Análise técnica e financeira da produção de hidrogênio com a utilização do software Homer**. 2012.

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

SÁ, Lívian R.; CAMMAROTA, Magali C.; FERREIRA-LEITÃO, Viridiana S. **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia-aspectos gerais e possibilidade de utilização de resíduos agroindustriais brasileiros**. Química Nova, v. 37, p. 857-867, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140138>. Acesso em: 01 de junho de 2022.

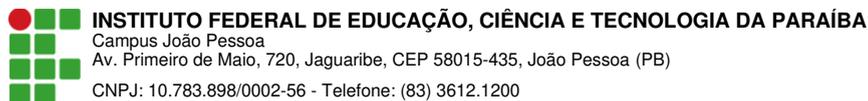
SILVA, António Costa. **A luta pelo petróleo**. Relações Internacionais, v. 6, 2005.

THOMAS, José Eduardo et al. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. ed. Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

URSÚA, Alfredo; GANDÍA, Luis M.; SANCHIS, Pablo. **Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends**. Proceedings Of The IEEE, New York, 2012.

VIOLA, Luigi. **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. 2015.

WENDT, Hartmut; GÖTZ, Michael; LINARDI, Marcelo. **Tecnologia de células a combustível**. Química Nova, v. 23, 2000.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC

Assunto: Entrega de TCC
Assinado por: Thamyres Andrade
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Thamyres de Andrade Silva, ALUNO (20151610287) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 12/09/2022 12:37:32.

Este documento foi armazenado no SUAP em 12/09/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 621616
Código de Autenticação: 48a0e63d24

