

INSTITUTO FEDERAL
Paraíba

Campus
João Pessoa

UNIDADE ACADÊMICA DE CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BIANCA LIMA DE CARVALHO OLIVEIRA

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL:
COMPARAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO HIDROGÊNIO COM OUTRAS FONTES

JOÃO PESSOA
2023

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

O48t

Oliveira, Bianca Lima de Carvalho.

Transição energética no Brasil: comparação da infraestrutura do hidrogênio com outras fontes / Bianca Lima de Carvalho Oliveira. – 2023.

33 f. : il.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilvan Vieira de Andrade Júnior.

1. Fontes energéticas - Brasil. 2. Transição energética. 3. Hidrogênio – Fonte de energia. 4. Eficiência energética. 5. Sustentabilidade. I. Título.

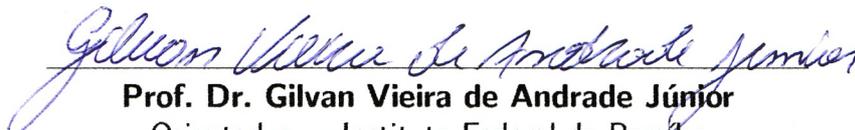
CDU 620.91

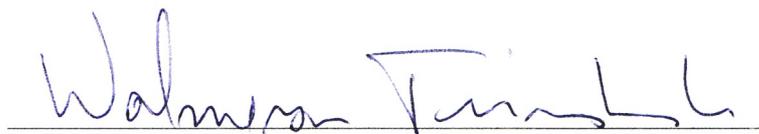
BIANCA LIMA DE CARVALHO OLIVEIRA

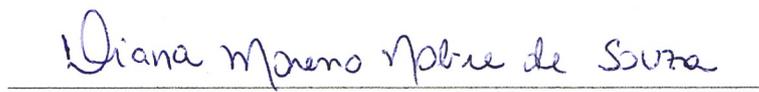
**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL:
COMPARAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO HIDROGÊNIO COM OUTRAS FONTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Elétrica do Instituto
Federal da Paraíba, como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Gilvan Vieira de Andrade Júnior
Orientador — Instituto Federal da Paraíba


Prof. Dr. Walmeran José Trindade Júnior
Membro da banca — Instituto Federal da Paraíba


Prof. Dra. Diana Moreno Nobre de Souza
Membro da banca — Instituto Federal da Paraíba

João Pessoa, 7 de novembro de 2023

BIANCA LIMA DE CARVALHO OLIVEIRA

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL:
COMPARAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO HIDROGÊNIO COM OUTRAS FONTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilvan Vieira de Andrade Júnior

JOÃO PESSOA
2023

Aos meus pais,
Wellington Costa Oliveira e Fernanda Lima de
Carvalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por suas misericórdias que se renovam a cada dia e que me sustentam a cada passo.

Agradeço aos meus pais, Wellington Costa Oliveira e Fernanda Lima de Carvalho, por todo o apoio e incentivo, sem o qual jamais chegaria aqui. Tudo o que hoje sou e um dia serei é reflexo de todo o esforço e dedicação que vocês depositam sobre mim. Esse agradecimento estende-se ao meu irmão Davi Lima de Carvalho Oliveira, por toda a torcida desde o momento em que iniciei a graduação.

Agradeço ao meu esposo Kerven Maciel Monteiro de Albuquerque, por todo apoio em momentos de estudo e por todas as palavras de incentivo. É uma honra compartilhar a jornada da vida ao seu lado. Obrigada por me impulsionar em cada passo que dou.

Agradeço à minha família, representada por meu avô, José Tibúrcio de Carvalho, por todas as orações que me mantiveram de pé até aqui.

Agradeço aos meus amigos, Andréa Guimarães Pontes e Renan Ferreira de Araújo, por toda torcida durante o processo de elaboração deste trabalho. A amizade de vocês é preciosa demais para mim.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal da Paraíba, por todos os momentos proporcionados ao longo do curso, e aos professores que compõem o corpo docente do curso Bacharelado em Engenharia Elétrica, por todos os ensinamentos dentro da sala de aula, em especial, ao professor Gilvan Vieira de Andrade Júnior, pelo apoio enquanto meu orientador deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho analisa a infraestrutura do hidrogênio no Brasil em comparação com fontes energéticas consolidadas, como energia solar, eólica, biomassa e nuclear. Explora-se a implantação do hidrogênio na matriz energética nacional, considerando desafios e estratégias. Embora o país possua uma matriz diversificada, o hidrogênio, especialmente o verde, desponta como alternativa promissora, dependente de investimentos para expansão. A infraestrutura do hidrogênio está em estágio inicial, necessitando de pesquisa, tecnologia e regulamentações para consolidação. A análise revela que, embora a infraestrutura do hidrogênio esteja em estágios iniciais de desenvolvimento, apresenta um potencial significativo para impulsionar a transição energética do país para um sistema mais sustentável.

Palavra chave: hidrogênio; Brasil; transição energética.

ABSTRACT

This study examines the infrastructure of hydrogen in Brazil compared to established energy sources such as solar, wind, biomass, and nuclear energy. It explores the implementation of hydrogen in the national energy matrix, considering challenges and strategies. Despite the country having a diversified energy matrix, hydrogen, particularly the green variant, emerges as a promising alternative, contingent upon investments for expansion. The hydrogen infrastructure is in an initial stage, requiring research, technology, and regulations for consolidation. The analysis reveals that while the hydrogen infrastructure is in its early stages of development, it holds significant potential to drive the country's energy transition toward a more sustainable system.

Keyword: hydrogen; Brazil; energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Obtenção do Hidrogênio	4
Figura 2 – Armazenamento do Hidrogênio	6
Figura 3 – Matriz energética brasileira	8
Figura 4 – Sistema fotovoltaico	10
Figura 5 – Comparação de percentual de eficiência energética	22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	TECNOLOGIAS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	2
2.1.1	Células de baixa temperatura de operação	2
2.1.2	Células de alta temperatura de operação	3
2.2	PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	3
2.2.1	Produção de Hidrogênio da decomposição da água	3
2.2.2	Produção de Hidrogênio a partir da Biomassa	4
2.2.3	Produção de Hidrogênio a partir de fontes fósseis	5
2.3	ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO	5
2.3.1	Armazenamento físico	5
2.3.2	Armazenamento Químico	6
2.4	TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO DO HIDROGÊNIO	7
2.5	SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL	7
2.6	POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS	8
2.7	FONTES DE ENERGIA ABORDADAS NA COMPARAÇÃO	10
2.7.1	Energia solar	10
2.7.2	Energia eólica	11
2.7.3	Energia nuclear	12
2.7.4	Biomassa	13
3	ESTRATÉGIAS DE IMPLANTAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL NO CENÁRIO ATUAL	14
3.1	PROJETOS IMPLANTADOS PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO	14
3.1.1	Usinas comerciais produtoras de hidrogênio	14
3.1.2	Produção de H ₂ V nas usinas nucleares Angra 1 e 2	15
3.1.3	Projeto de geração de hidrogênio verde no Porto do Açu	15
3.1.4	Hub de hidrogênio verde do complexo de Pecém	16
3.2	USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL EM TRANSPORTES	16
3.2.1	Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio	17
3.2.2	Estações experimentais de abastecimento	18
3.3	PROJETOS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL	18
4	COMPARAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL COM OUTRAS ALTERNATIVAS DE ENERGIA	20

4.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	20
4.1.1	Hidrogênio	20
4.1.2	Energia solar	21
4.1.3	Energia eólica	21
4.1.4	Biomassa	21
4.1.5	Energia nuclear	22
4.1.6	Comparação	22
4.2	CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO E OPERAÇÃO	23
4.2.1	Hidrogênio	23
4.2.2	Energia solar	23
4.2.3	Energia Eólica	24
4.2.4	Biomassa	24
4.2.5	Energia nuclear	24
4.2.6	Comparação	25
4.3	DISPONIBILIDADE DE RECURSOS E INFRAESTRUTURA EXISTENTE	25
4.3.1	Energia solar	25
4.3.2	Energia Eólica	26
4.3.3	Biomassa	26
4.3.4	Energia nuclear	27
4.3.5	Comparação	27
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

No atual contexto global, a busca por alternativas energéticas sustentáveis tornou-se uma prioridade incontestável. A transição para fontes de energia mais limpas e renováveis é um passo crucial na mitigação das mudanças climáticas e na redução das emissões de gases de efeito estufa (LIMA; HAMZAGIC, 2022).

O Brasil, com seu vasto território e riqueza em recursos naturais, tem potencial para liderar essa transição e desempenhar um papel fundamental na adoção de novas fontes de energia. No cenário atual do país, podemos encontrar uma matriz energética consideravelmente diversificada, com destaque para a energia hidrelétrica, que historicamente representa a maior parte da produção de eletricidade.

A energia solar e eólica também têm ganhado espaço significativo nos últimos anos, com investimentos crescentes e políticas de incentivo que impulsionaram a expansão dessas fontes. A biomassa, principalmente derivada da cana-de-açúcar para a produção de biocombustíveis, é uma fonte consolidada no país. A energia nuclear, embora represente uma parcela menor da matriz, também desempenha um papel na geração de eletricidade (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

Em contraste com as fontes energéticas mais estabelecidas, a infraestrutura para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio no Brasil está em estágios iniciais de desenvolvimento. Embora o país possua vastos recursos naturais ideais para a produção de hidrogênio verde - especialmente através de fontes renováveis como solar, eólica e biomassa -, a infraestrutura correspondente ainda requer investimentos substanciais (VARGAS et al., 2006).

Comparativamente, a energia solar e eólica têm infraestruturas mais maduras e são mais amplamente adotadas em escala comercial, enquanto a biomassa já possui uma presença estabelecida, especialmente no setor de biocombustíveis. A energia nuclear, embora existente, enfrenta desafios associados à aceitação pública e à gestão de resíduos nucleares.

Este trabalho propõe uma análise aprofundada da infraestrutura do hidrogênio no Brasil, comparando-a com outras alternativas energéticas já estabelecidas, como energia solar, eólica, biomassa e nuclear. Além disso, examina estratégias de implantação do hidrogênio no cenário energético nacional, considerando os desafios, as oportunidades e os caminhos para sua adoção efetiva no país.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve alguns conceitos importantes para o desenvolvimento deste trabalho. A seção 2.1 aborda as tecnologias de células de combustível. As três próximas seções embasam a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio, sendo divididas em produção (seção 2.2), armazenamento (seção 2.3), transporte e distribuição (seção 2.4). Por fim, as duas últimas seções abordam a sustentabilidade e impacto ambiental (seção 2.5), e políticas públicas e incentivos no Brasil (seção 2.6).

2.1 TECNOLOGIAS DE CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

De acordo com Reitz (2007), as células a combustível são dispositivos que atuam como baterias, ou seja, são conversores diretos de energia química em eletricidade e calor, funcionando de maneira contínua (ao contrário das baterias convencionais). Elas geram corrente contínua através do processo de combustão eletroquímica a frio de um combustível, sendo o hidrogênio comumente utilizado para esse fim.

As reações eletroquímicas que ocorrem nas células a combustível envolvem a quebra das ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e oxigênio. A ruptura das moléculas diatômicas H₂ e O₂ requer uma quantidade significativa de energia de ativação, da mesma ordem de grandeza que as energias de formação dessas moléculas, quando as reações ocorrem de forma homogênea em fase gasosa (TICIANELLI; CAMARA; SANTOS, 2005). No entanto, nas células a combustível, ambas as reações são heterogêneas e ocorrem na interface entre o eletrodo e o eletrólito, sendo catalisadas na superfície do eletrodo.

Normalmente, os diferentes tipos de células a combustível são classificados de acordo com o tipo de eletrólito que utilizam e, como resultado, pela faixa de temperatura em que operam. As próximas subseções tratam sobre os principais tipos de células de baixa e alta temperatura de operação.

2.1.1 Células de baixa temperatura de operação

Dentre as células de baixa temperatura de operação, as células alcalinas desempenham um papel importante em aplicações restritas, como em naves espaciais ou em situações onde há disponibilidade de hidrogênio extremamente puro. Esse tipo de célula serviu de base para as células mais modernas que utilizam diversos tipos de eletrólitos e operam em uma ampla variedade de condições.

Adicionalmente, as células a membrana polimérica trocadora de prótons representam as alternativas mais promissoras na eletrificação, substituindo os motores de combustão interna. Elas apresentam vantagens notáveis, incluindo robustez, facilidade de acionamento e desligamento, alta eficiência e emissões reduzidas, ou mesmo nulas, de poluentes. Essas

células são adequadas tanto para sistemas estacionários de geração de energia local como para dispositivos portáteis geradores de energia, como celulares e notebooks (REITZ, 2007).

Conforme Wendt, Götz e Linardi (2000), as células a ácido fosfórico não são sensíveis ao dióxido de carbono e são pouco sensíveis ao monóxido de carbono, o qual pode envenenar o catalisador nas células a membrana polimérica trocadora de prótons. Isso permite que as células a ácido fosfórico operem com um teor de até 1% de monóxido de carbono no gás de alimentação, a uma temperatura de operação de 200°C. O principal objetivo dessas células foi conquistar o mercado das usinas queimadoras de metano.

2.1.2 Células de alta temperatura de operação

Dentro da categoria das células de alta temperatura de operação, destacam-se as células a carbonato fundido que operam a 600°C. Essas células possuem a capacidade de realizar a reforma endotérmica do gás natural para produzir hidrogênio diretamente na coluna de unidades de células. Isso elimina a necessidade de um reformador separado, ao mesmo tempo em que resfria as células. Essa abordagem otimiza a engenharia do sistema e reduz os custos envolvidos.

As células de óxido sólido operam em uma faixa de temperatura que varia de 800°C a 1000°C. Esse tipo de célula apresenta várias vantagens em comparação com outros tipos de células, como a facilidade de gerenciamento do eletrólito, uma vez que é sólido, e a não necessidade do uso de metais nobres como catalisadores. A principal aplicação dessas células é a geração de energia em unidades estacionárias. No entanto, a alta temperatura de operação implica em algumas limitações tecnológicas, como o aumento de processos de degradação e fadiga dos diversos componentes, tensões térmicas, entre outros desafios.

2.2 PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

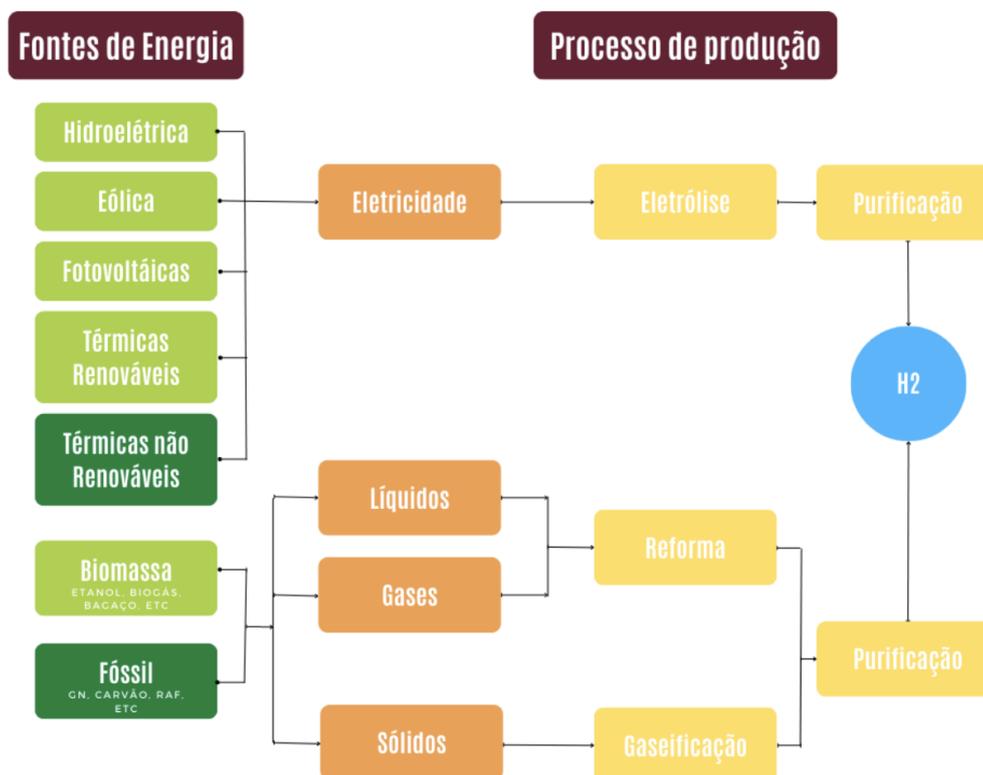
A produção de hidrogênio é um processo chave para várias indústrias, principalmente no contexto da transição energética. Ele pode ser produzido de diversas formas, como reforma a vapor de gás natural, eletrólise da água, gaseificação de biomassa, entre outros métodos, conforme podemos observar na Figura 1. As próximas subseções destacam resumidamente algumas das formas pelas quais o hidrogênio pode ser produzido.

2.2.1 Produção de Hidrogênio da decomposição da água

A eletrólise da água é capaz de gerar hidrogênio e oxigênio gasosos a partir das moléculas de água, que se transformam em um cátion e um ânion elementares por meio da aplicação de energia elétrica. A produção de hidrogênio pela decomposição da água é considerada uma das formas mais limpas de gerar hidrogênio verde, visto que a eletricidade requerida, em sua maioria, provém de fontes renováveis, como energia solar, eólica, geotérmica, entre outras.

O processo de eletrólise da água ocorre em dispositivos chamados eletrolisadores, que são classificados de acordo com o eletrólito utilizado. Podem ser eletrolisadores alcalinos, de

Figura 1 – Obtenção do Hidrogênio



(SILVA, 2023)

membrana de troca de prótons e de óxidos sólidos.

Os eletrolisadores alcalinos baseiam seu funcionamento a partir do uso de eletrólitos que podem ser compostos por hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio. Já os eletrolisadores de membrana de troca de prótons, contam com um eletrólito polimérico sólido responsável por conduzir prótons, separar produtos gasosos e isolar eletricamente os eléctrodos. Por fim, o modo de operação dos eletrolisadores de óxidos sólidos consiste em inserir vapor no cátodo, o que resulta na geração do gás hidrogênio (GOMES, 2022).

2.2.2 Produção de Hidrogênio a partir da Biomassa

A biomassa pode ser obtida de várias fontes orgânicas, incluindo resíduos agrícolas, como cascas de arroz e de café, bem como resíduos florestais, e a partir da cana-de-açúcar, a qual o Brasil é um dos maiores produtores. A produção de hidrogênio a partir de biomassa pode ser realizada por meio de abordagens termoquímicas e biológicas. A rota termoquímica inclui processos como pirólise, gaseificação, reforma a vapor, ciclo termoquímico e oxidação parcial. Enquanto isso, a rota biológica se subdivide em fermentação, microbiana, bio-fotólise e eletrólise enzimática.

Segundo Aziz, Darmawan e Juangsa (2021), a biomassa lignocelulótica, é um material

altamente complexo, composto principalmente por celulose, lignina e hemicelulose, além de outros elementos como minerais e diversos extrativos. A presença desses componentes complexos pode reduzir o rendimento da conversão. Inicialmente, a biomassa bruta precisa passar por um processo de redução da umidade, uma vez que ela pode ter um teor de umidade tão alto quanto 70% em peso em condições úmidas. Esse pré-tratamento é importante para reduzir os problemas associados aos processos de conversão.

No entanto, a produção de hidrogênio a partir da biomassa apresenta desvantagens, como os custos significativos associados ao tratamento da biomassa, a dependência da disponibilidade sazonal da matéria-prima e a geração de subprodutos, como alcatrão e carvão.

2.2.3 Produção de Hidrogênio a partir de fontes fósseis

A produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis, sendo o mais comum a utilização do gás natural, é frequentemente realizada por meio de um processo chamado reforma a vapor. Nesse método, o gás natural é combinado com vapor de água em altas temperaturas (geralmente acima de 700°C) e sob pressão, em presença de um catalisador, resultando na produção de hidrogênio e monóxido de carbono (CO) (ALVES; ABREU, 2006). O hidrogênio é então separado do CO por meio de processos adicionais, como a purificação por membranas ou o processo de shift para converter o CO em dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio adicional.

Embora a reforma a vapor seja um processo comum e viável para a produção de hidrogênio em larga escala, especialmente devido à disponibilidade de gás natural, ela tem desvantagens significativas relacionadas às emissões de carbono. O CO₂ é um subproduto desse processo, o que torna essa forma de produção de hidrogênio não tão sustentável quanto as alternativas que não geram emissões de carbono.

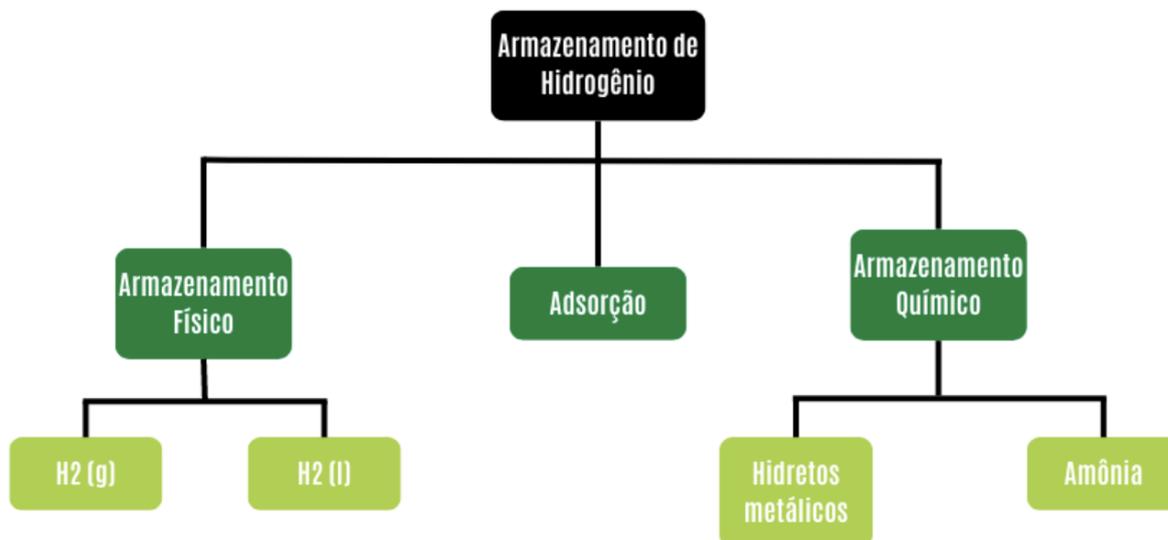
2.3 ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO

O armazenamento de hidrogênio é um aspecto crucial para sua utilização em larga escala como fonte de energia. Dado que o hidrogênio tem baixa densidade energética por unidade de volume, encontrar métodos eficientes e seguros de armazenamento é essencial. As próximas subseções abordarão alguns dos principais métodos de armazenamento, conforme podemos observar na Figura 2.

2.3.1 Armazenamento físico

O armazenamento físico do hidrogênio compreende duas abordagens principais: armazenamento gasoso e armazenamento líquido. O armazenamento gasoso envolve a compressão do hidrogênio a altas pressões em tanques especialmente projetados. Quanto maior a pressão, mais hidrogênio pode ser armazenado, embora isso exija materiais robustos para garantir a segurança.

Figura 2 – Armazenamento do Hidrogênio



(SILVA, 2023)

Já o armazenamento líquido consiste na refrigeração do hidrogênio a temperaturas extremamente baixas, transformando-o em estado líquido para ocupar menos espaço. No entanto, esse método demanda um isolamento térmico eficiente para manter o hidrogênio em temperaturas criogênicas, o que pode resultar em custos significativos de energia.

O armazenamento gasoso é mais comum em aplicações de veículos, enquanto o armazenamento líquido pode ser mais viável para aplicações em larga escala. No entanto, ambos enfrentam desafios em relação ao volume ocupado e à eficiência de armazenamento, incentivando a pesquisa contínua em novos materiais e tecnologias para melhorar a segurança, a densidade de armazenamento e a viabilidade econômica do armazenamento físico de hidrogênio (AMARAL, 2021).

2.3.2 Armazenamento Químico

O armazenamento químico de hidrogênio utiliza substâncias específicas para absorver e liberar hidrogênio por meio de reações reversíveis. Por exemplo, certos compostos, como amônia ou líquidos orgânicos, têm a capacidade de incorporar hidrogênio em sua estrutura molecular. Quando necessário, esses materiais liberam o hidrogênio por meio de reações controladas (RODRIGUES, 2013).

Além disso, alguns materiais sólidos, como hidretos metálicos ou estruturas porosas, podem absorver e armazenar hidrogênio, liberando-o posteriormente mediante aquecimento ou pressurização. O armazenamento químico oferece maior densidade de armazenamento e, frequentemente, é considerada mais segura do que alguns métodos físicos. Contudo, enfrenta desafios relacionados à eficiência das reações, estabilidade dos materiais e custos de produção.

2.4 TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO DO HIDROGÊNIO

A utilização viável do hidrogênio renovável exige um sistema de transmissão e distribuição com uma relação custo-benefício favorável. A longo prazo, uma rede de gasodutos e tubulações, semelhantes às usadas para gás natural, se destaca como a opção mais eficiente em termos de custo para a distribuição.

Entretanto, a curto e médio prazo, a estratégia mais competitiva implica em posicionar a produção de hidrogênio no local ou em proximidade das regiões com recursos abundantes. Essa estrutura permite conectar áreas com alta disponibilidade de recursos diretamente aos centros de demanda por meio de caminhões, trens, postos de abastecimento e consumidores industriais menores.

Para distâncias maiores, o transporte marítimo é uma opção viável, mas requer a conversão do hidrogênio para aumentar sua densidade. Todavia, no Brasil, os estudos para o transporte de hidrogênio em navios-tanque estão em estágios iniciais de desenvolvimento.

Segundo Oliveira (2022a), existem várias abordagens em potencial para o transporte de hidrogênio, porém três delas — hidrogênio líquido (LH₂), compostos orgânicos líquidos (LOHC) e amônia (NH₃) — estão ganhando destaque como transportadores neutros em carbono. A escolha entre essas opções deve considerar o uso final do hidrogênio, visando determinar a solução mais eficiente em termos de custo e benefício.

2.5 SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL

O Brasil possui uma matriz energética bem diversificada e é conhecido por sua forte dependência de fontes de energia limpa e renovável, principalmente a energia hidrelétrica, que historicamente tem sido a principal fonte de eletricidade do país, no entanto, segundo Oliveira (2022b), o país ainda depende muito do consumo de petróleo, mesmo havendo uma diminuição considerável nas últimas duas décadas (desde 2000). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2022a), as principais fontes de energia participantes da matriz energética brasileira são: petróleo (34,4%), gás natural (13,3%), hidráulica (11,0%) e derivados da cana (16,4%), conforme podemos observar na Figura 3.

A infraestrutura de hidrogênio pode contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira. O hidrogênio verde, que é produzido a partir de fontes renováveis, resulta em um combustível limpo, sem emissões diretas de gases de efeito estufa, pode ser usado em veículos a células de combustível, tornando o transporte mais limpo e reduzindo as emissões de poluentes. Além disso, segundo o Brasil (2022b), o hidrogênio poderá ser utilizado como uma fonte de armazenamento de energia para fortalecer a estabilidade do sistema energético, atuando como uma espécie de reserva energética. Isso é particularmente importante em um país com um grande setor de transporte rodoviário como o Brasil.

Outro avanço possível com a utilização do hidrogênio é a capacidade de armazenar energia de forma eficaz ao longo de extensos períodos, e pode ser empregado tanto na mobilidade

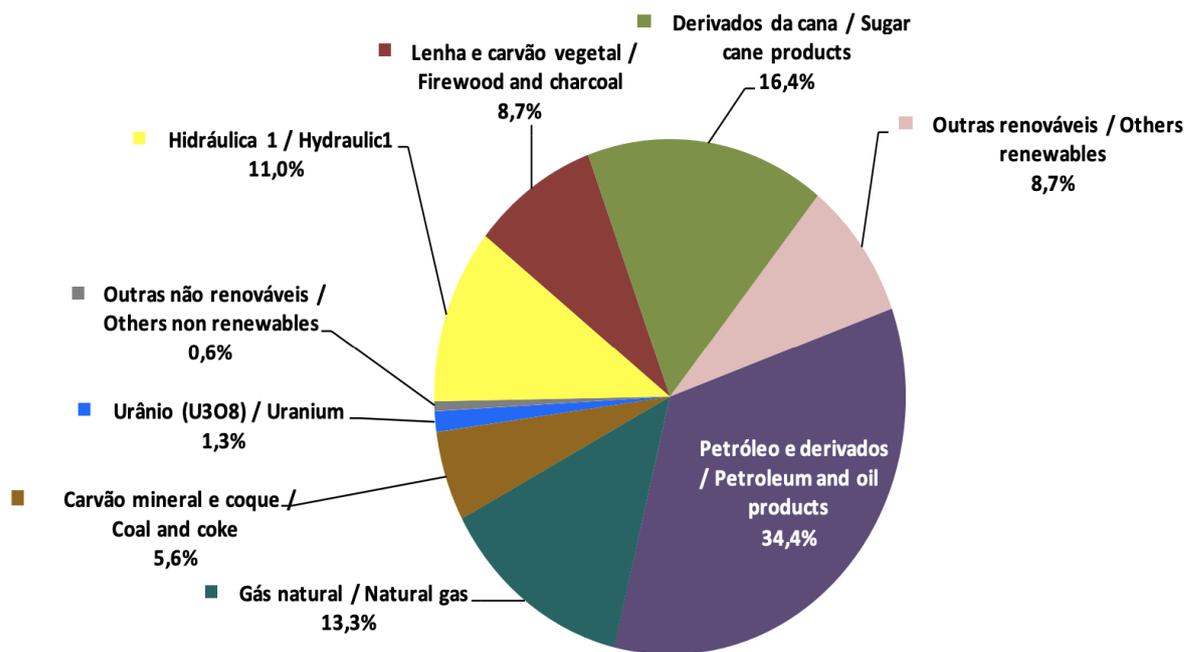


Figura 3 – Matriz energética brasileira

(BRASIL, 2022a)

como na geração distribuída de energia (LEAL, 2023). Além disso, tanques de hidrogênio comprimido têm a capacidade de armazenar energia por longos períodos e, adicionalmente, são mais fáceis de manusear do que as baterias de íons de lítio devido à sua leveza.

De acordo com Oliveira (2022a), o país está vivenciando um momento crucial na adoção do hidrogênio como vetor energético, com previsões de investimentos nos próximos anos que já ultrapassam os 27 bilhões de dólares, somente no Brasil. Empresas como a Ungel já estão desenvolvendo projetos para a utilização do hidrogênio (H2V). Os centros industriais localizados nas regiões costeiras apresentam as condições mais favoráveis para a implementação de projetos de H2V, visando atender ao mercado internacional. Além disso, foram identificadas diversas oportunidades no mercado interno, incluindo a área de fertilizantes para o agronegócio e o fornecimento de combustíveis para o setor de mineração.

2.6 POLÍTICAS PÚBLICAS E INCENTIVOS

Nos últimos anos, o Brasil vem demonstrando um crescente interesse no desenvolvimento de tecnologias limpas e sustentáveis, nesse contexto, a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio desempenha um papel importante. Embora o hidrogênio como vetor energético ainda esteja em estágios iniciais de desenvolvimento, quando comparado outras fontes de energia limpa, o governo brasileiro tem adotado políticas e incentivos para promover sua expansão e adoção no país.

Em 2002, o Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil apresentou o “Programa Brasileiro de Células a Combustível” (PROCaC) (BRASIL, 2002), que concentrou-se na promoção do uso do hidrogênio como vetor energético e nas tecnologias de células de combustível como uma forma eficiente e limpa de converter hidrogênio em eletricidade, além de prever o fornecimento de incentivos e financiamento para projetos de pesquisa e desenvolvimento. Em 2005, o programa foi reformulado, passando a ser chamado de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2).

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), através da publicação “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025” (BRASIL, 2010), recomendou que os Ministérios de Ciência, Tecnologia e Inovação, Minas e Energia e Meio Ambiente, em conjunto com agências governamentais e instituições de pesquisa fossem incluídas no incentivo à economia do hidrogênio do Brasil. A partir disso, foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) em 2017, sendo uma iniciativa para organizar as ações e recursos da economia do hidrogênio do Brasil.

Em 2020, o Ministério de Minas e Energia lançou o Plano Nacional de Energia 2050 (BRASIL, 2020), que traça as metas para o setor energético brasileiro até o ano de 2050. Nesse plano, o hidrogênio é listado como uma estratégia de longo prazo, visando tornar a matriz energética brasileira mais diversa e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, ele estabelece metas para a produção de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica.

Atualmente, o Ministério de Minas e Energia do Brasil propôs o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) (BRASIL, 2021), que delinea metas para a produção, distribuição e utilização do hidrogênio no Brasil. Este plano visa estimular investimentos em pesquisa e desenvolvimento, bem como em infraestrutura, para tornar o país uma referência em tecnologias de hidrogênio verde, que é gerado através de fontes renováveis como energia solar e eólica, e azul, que é produzido através do gás natural. O Brasil possui experiência com os dois tipos de hidrogênio, o que o coloca em uma posição estratégica para se tornar um importante produtor de hidrogênio.

Para viabilizar a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio, o governo brasileiro tem incentivado parcerias público-privadas e investimentos em pesquisas e inovações tecnológicas. Isso inclui o avanço na construção de postos de abastecimento de hidrogênio, principalmente nas regiões com maior potencial de produção de energias renováveis, como Sul e Sudeste. Além disso, segundo o PNH2, o Brasil busca promover a internacionalização de suas tecnologias de hidrogênio, abrindo espaço para exportações e colaborações em âmbito global, tendo trabalhado em conjunto com outros governos e organizações internacionais para desenvolver padrões e regulamentações que facilitem o comércio de hidrogênio e seus derivados.

2.7 FONTES DE ENERGIA ABORDADAS NA COMPARAÇÃO

Esta seção aborda alguns conceitos a respeito das fontes de energia utilizadas na comparação realizada no Capítulo 4.

2.7.1 Energia solar

A energia solar é uma fonte de energia renovável e sustentável proveniente da luz do sol. Ela é capturada e convertida em eletricidade por meio de painéis solares, compostos por células fotovoltaicas, conforme observado na Figura . Essa tecnologia revolucionária tem ganhado cada vez mais destaque devido aos seus inúmeros benefícios ambientais, econômicos e sociais.

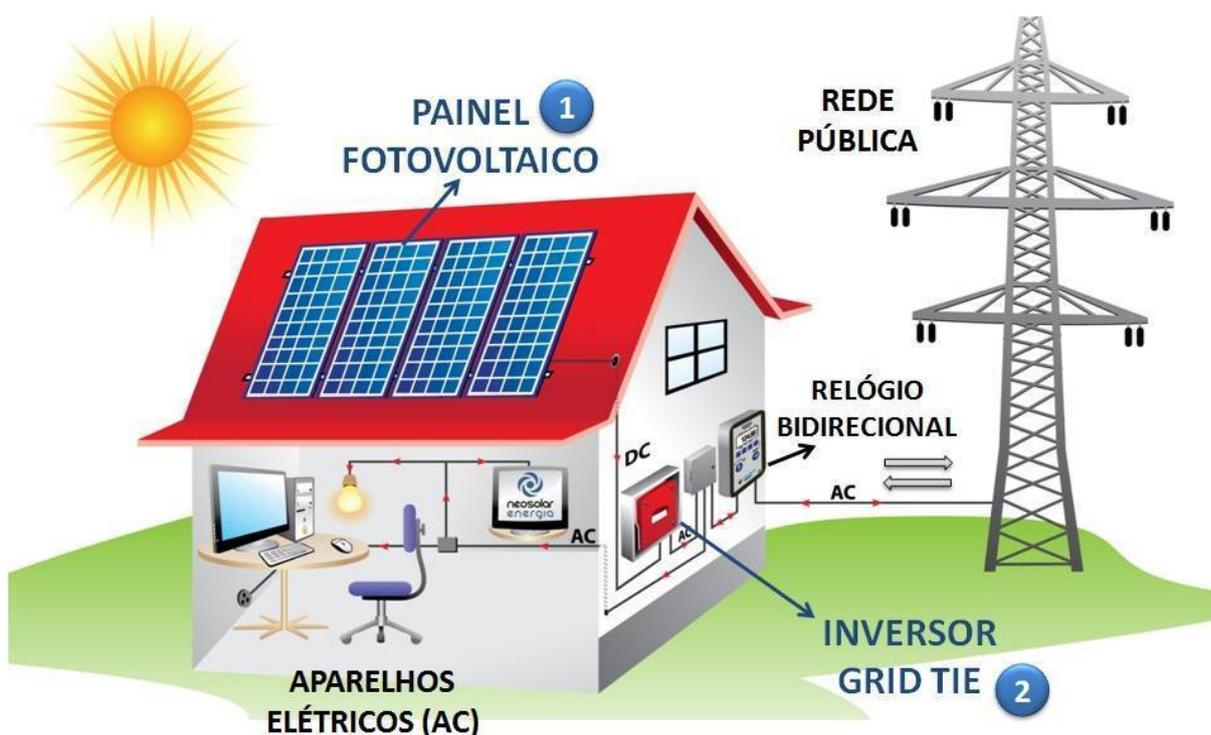


Figura 4 – Sistema fotovoltaico

(SOLAR, 2022)

Uma das principais vantagens da energia solar é a sua abundância e disponibilidade. A luz solar é uma fonte inesgotável, presente em todo o planeta, sendo especialmente valiosa em regiões ensolaradas. Sua utilização não emite poluentes nem contribui para o aquecimento global, diferentemente de outras fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Além disso, os sistemas de energia solar podem ser instalados em diversos locais, desde residências e edifícios comerciais até grandes usinas solares. Isso democratiza o acesso à energia, possibilitando a geração própria e reduzindo a dependência de redes elétricas centralizadas.

Do ponto de vista econômico, investir em energia solar pode gerar economia a longo prazo. Embora os custos iniciais de instalação dos painéis solares possam ser consideráveis, a redução significativa nas contas de eletricidade ao longo do tempo compensa esse investimento inicial. Em muitos casos, a energia solar também permite que proprietários de sistemas fotovoltaicos vendam o excedente de energia de volta à rede, gerando uma fonte adicional de renda.

Contudo, é importante considerar alguns desafios associados à energia solar, como a variação na geração de energia devido às condições climáticas e a necessidade de armazenamento para uso durante a noite ou em dias nublados. Avanços tecnológicos na área de armazenamento de energia estão sendo desenvolvidos para lidar com esses desafios, tornando a energia solar uma opção ainda mais viável e atrativa.

No geral, a energia solar representa uma das melhores alternativas para a produção de eletricidade de forma limpa, sustentável e acessível. Seu contínuo desenvolvimento e adoção em larga escala têm o potencial de transformar significativamente a maneira como obtemos e utilizamos energia, promovendo um futuro mais sustentável para o nosso planeta.

2.7.2 Energia eólica

A energia eólica é uma forma poderosa e renovável de gerar eletricidade, aproveitando a força dos ventos para girar turbinas eólicas e converter essa energia cinética em energia elétrica limpa. Essa fonte de energia tem ganhado destaque significativo como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, oferecendo uma série de benefícios ambientais, econômicos e sociais.

O principal benefício da energia eólica é sua abundância e disponibilidade em muitas partes do mundo. Os ventos são uma fonte inesgotável de energia, e muitas regiões têm um potencial eólico considerável para a geração de eletricidade. Ao contrário dos combustíveis fósseis, a energia eólica não emite gases de efeito estufa nem poluentes atmosféricos, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental e das mudanças climáticas (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

A implantação de parques eólicos em terra e no mar também pode ter impactos positivos na economia local. A construção e manutenção desses parques criam empregos na indústria de energia renovável, estimulando o crescimento econômico e diversificando as fontes de receita em regiões onde são instalados.

Além disso, a energia eólica oferece uma vantagem importante: pode ser complementar a outras formas de energia renovável. Por exemplo, enquanto a energia solar é produzida durante o dia, a energia eólica pode ser gerada tanto de dia quanto à noite, oferecendo uma solução para a intermitência de fontes de energia renovável.

No entanto, existem desafios associados à energia eólica. A principal questão é a variabilidade do vento, o que pode levar a flutuações na produção de energia. Estratégias de armazenamento de energia estão sendo desenvolvidas para mitigar esse problema, permitindo o

armazenamento do excesso de energia gerada em momentos de vento forte para uso posterior.

Apesar dos desafios, a energia eólica continua a se expandir globalmente, com avanços tecnológicos que aumentam sua eficiência e viabilidade econômica. A combinação da energia eólica com outras fontes renováveis e o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia estão pavimentando o caminho para um futuro energético mais sustentável e independente dos combustíveis fósseis.

2.7.3 Energia nuclear

A energia nuclear é uma forma de energia obtida a partir do processo de fissão nuclear, no qual o núcleo de átomos pesados, como o urânio, é dividido, liberando uma grande quantidade de energia. Essa energia é capturada e utilizada para gerar eletricidade em usinas nucleares (CARDOSO et al., 2012).

Uma das principais vantagens da energia nuclear é sua alta densidade energética, ou seja, uma pequena quantidade de material nuclear pode produzir uma grande quantidade de energia. Isso torna as usinas nucleares eficientes na geração de eletricidade em larga escala, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e contribuindo para a diversificação da matriz energética.

Além disso, as usinas nucleares não emitem gases de efeito estufa durante a geração de eletricidade, ajudando a mitigar as mudanças climáticas. Essa característica tem sido um ponto de destaque na busca por fontes de energia mais limpas e de baixo carbono.

No entanto, a energia nuclear também apresenta desafios e preocupações significativas. Um dos principais é a questão da segurança. Acidentes nucleares, como os de Chernobyl e Fukushima, evidenciaram os riscos associados à operação de usinas nucleares e seus impactos devastadores para o meio ambiente e a saúde pública. A segurança operacional é uma prioridade absoluta na indústria nuclear, e o gerenciamento adequado dos resíduos radioativos gerados é crucial para evitar danos.

Além disso, a questão do armazenamento de resíduos nucleares é um desafio complexo e de longo prazo. O descarte seguro e a gestão desses resíduos radioativos, que podem permanecer perigosos por milhares de anos, são áreas de preocupação e debate contínuo na adoção e expansão da energia nuclear.

A proliferação nuclear também é uma preocupação, já que o mesmo conhecimento e tecnologia usados para geração pacífica de energia nuclear podem, em certos casos, ser desviados para o desenvolvimento de armas nucleares.

Devido a esses desafios, a energia nuclear permanece um tópico controverso, com opiniões divergentes sobre seu papel na matriz energética global. O futuro da energia nuclear depende não apenas de avanços tecnológicos para aumentar sua segurança e eficiência, mas também de considerações éticas, regulatórias e de gestão de resíduos para garantir seu uso responsável e sustentável.

2.7.4 Biomassa

A biomassa é uma fonte de energia renovável obtida a partir de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, florestais, restos de alimentos e até mesmo certos tipos de lixo. Esses materiais são transformados em energia por meio de processos como a queima direta, fermentação ou conversão em biocombustíveis (GOLDEMBERG, 2009).

Uma das grandes vantagens da biomassa é sua versatilidade e disponibilidade. Ela pode ser obtida de uma variedade de fontes renováveis, o que reduz a dependência de combustíveis fósseis e contribui para a diminuição dos resíduos orgânicos, além de promover a geração de energia de forma mais sustentável.

A queima direta de biomassa em instalações de energia, como usinas termelétricas, produz calor que pode ser convertido em eletricidade, reduzindo as emissões de carbono se comparado aos combustíveis fósseis. Além disso, a biomassa é considerada uma fonte de energia de base renovável, pois, por meio da replantação ou regeneração natural, é possível repor as fontes de matéria-prima.

Outra aplicação importante da biomassa está na produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, que podem substituir parcial ou totalmente os combustíveis derivados do petróleo em veículos e maquinários. Esses biocombustíveis são produzidos a partir de culturas energéticas, como milho, cana-de-açúcar, soja, entre outras.

No entanto, a utilização da biomassa também apresenta desafios. Um dos principais está relacionado à competição com a produção de alimentos. Quando culturas energéticas são priorizadas para a produção de biocombustíveis, isso pode afetar a disponibilidade e os preços dos alimentos, especialmente em regiões onde a segurança alimentar já é um problema.

Além disso, a queima de biomassa em grande escala pode gerar emissões atmosféricas e poluentes, embora em menor quantidade do que os combustíveis fósseis. Portanto, é essencial investir em tecnologias avançadas de controle de emissões para minimizar o impacto ambiental negativo.

A biomassa continua a ser uma parte importante do panorama energético renovável, especialmente quando combinada com práticas sustentáveis de cultivo e utilização responsável dos recursos naturais. Seu desenvolvimento futuro depende da inovação tecnológica, da consideração dos impactos ambientais e sociais e do equilíbrio entre a produção de energia e a segurança alimentar.

3 ESTRATÉGIAS DE IMPLANTAÇÃO DO HIDROGÊNIO NO BRASIL NO CENÁRIO ATUAL

As condições climáticas favoráveis no Brasil posicionam o país como um potencial exportador de hidrogênio de baixo carbono, pois favorecem a geração de energia por meio de fontes renováveis, como por exemplo, eólicas, solares e hídricas. Este capítulo é destinado a aprofundar o estudo sobre as estratégias de implantação do hidrogênio no Brasil. Sendo dividido em três seções que abordaram os projetos de geração implantados, a utilização do hidrogênio no cenário atual do Brasil e os projetos de pesquisa e desenvolvimento nessa área no país.

3.1 PROJETOS IMPLANTADOS PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

Nos últimos dois anos, o Brasil testemunhou o anúncio de dezenas de projetos voltados para a produção de hidrogênio verde, totalizando um investimento conjunto estimado em mais de US\$ 30 bilhões. Embora a maioria desses projetos ainda esteja em fase de estudo de viabilidade, alguns já avançam para além dos memorandos de entendimento, adentrando a fase de implementação. Estes incluem tanto iniciativas piloto quanto plantas industriais em escala maior.

Os esforços concentram-se nos portos-indústria do país, locais que agregam características cruciais para esses empreendimentos. Além de já possuírem infraestrutura para exportação do hidrogênio, esses portos contam com potenciais consumidores no mercado doméstico e estão estrategicamente próximos a grandes projetos de energia eólica offshore, com capacidade significativa de produção de energia renovável. As próximas subseções abordam sobre algumas usinas comerciais de hidrogênio e projetos implantados no Brasil.

3.1.1 Usinas comerciais produtoras de hidrogênio

Dentre os projetos que estão sendo implantados no Brasil, podemos citar algumas usinas comerciais de hidrogênio. A empresa Unigel, por exemplo, possui uma planta que está em processo de construção, e será a primeira planta de produção em larga escala de hidrogênio verde no Brasil. A planta fica localizada no Polo Petroquímico de Camaçari, na Bahia e o investimento previsto para o empreendimento até 2027 é de US\$ 1,5 bilhão. A fábrica tem como meta produzir anualmente 100 mil toneladas de hidrogênio verde e 600 mil toneladas de amônia verde (EPR, 2023).

A empresa Qair Brasil, pertencente ao grupo francês Qair, planeja investir aproximadamente US\$ 3,9 bilhões até 2032 na criação de duas usinas no Complexo Industrial e Portuário de Suape, localizado em Pernambuco. Esses empreendimentos consistem em uma unidade para produção de hidrogênio verde e outra planta destinada à produção de hidrogênio azul, utilizando gás natural com tecnologia de captura de carbono. Além disso, a Qair em conjunto

com outras empresas, como Fortescue e AES Brasil, planejam replicar um projeto semelhante no Complexo Portuário Industrial do Pecém (CIPP), situado no Ceará (PECÉM, 2023).

A White Martins, subsidiária do grupo alemão Linde, iniciou a produção de hidrogênio verde em escala média em dezembro de 2022, em Pernambuco, com uma expectativa de produção de 156 toneladas de H₂V por ano. Inicialmente, o combustível produzido atenderá a demanda do mercado pernambucano, mas há planos de expansão na produção e fornecimento. A empresa já estabeleceu memorandos de entendimento para produzir hidrogênio por eletrólise em locais como Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Ceará.

3.1.2 Produção de H₂V nas usinas nucleares Angra 1 e 2

O projeto de produção de hidrogênio verde na Central Nuclear de Angra dos Reis, localizada no Rio de Janeiro, encontra-se em fase de estudo de viabilidade. Essa iniciativa está sendo desenvolvida por meio de uma parceria entre a Eletronuclear, Furnas e o Parque Tecnológico de Itaipu. A proposta visa explorar a possibilidade de gerar hidrogênio a partir da energia produzida na central nuclear, possivelmente utilizando processos de eletrólise da água com o objetivo de produzir hidrogênio limpo e sustentável.

O avanço significativo dessa proposta reside especialmente no emprego da água do mar no processo de produção de hidrogênio a partir da fonte nuclear. Essa abordagem é particularmente relevante considerando a escassez de água doce em muitas regiões, reservadas principalmente para consumo humano.

Essa tecnologia, caso seja desenvolvida em grande escala, oferece a vantagem de gerar menores custos e ter um impacto ambiental reduzido em comparação com a utilização de água proveniente de rios ou aquíferos no processo de produção de hidrogênio. Até o momento, não foram registrados impactos ambientais ao longo de períodos operacionais prolongados, superiores a 25 anos. Isso destaca a viabilidade potencial dessa abordagem como uma alternativa de produção de hidrogênio mais amigável ao meio ambiente. (ELETROBRÁS; INB, 2022).

3.1.3 Projeto de geração de hidrogênio verde no Porto do Açu

Em maio de 2022, o Porto do Açu e a Shell Brasil assinaram um memorando de entendimento para formalizar acordos e alinhar expectativas. Esse documento refere-se ao desenvolvimento conjunto de uma planta piloto de geração de hidrogênio verde nas instalações do Porto do Açu, no norte do Rio de Janeiro. O projeto tem foco em aprendizados laboratoriais, testes de descarbonização e no impulsionamento da indústria nacional de hidrogênio verde. A expectativa é que a multinacional britânica invista entre US\$60 milhões e US\$120 milhões em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação ao longo do ano de 2022.

A planta está programada para ser concluída até 2025, inicialmente com capacidade de 10 megawatts, podendo ser ampliada para até 100 megawatts. O projeto propõe a conexão de energia elétrica oriunda de uma rede ou de uma planta de eletrólise, tendo o hidrogênio renovável como principal produto. Parte desse hidrogênio será viabilizado para armazenamento

e envio a potenciais consumidores, enquanto o restante será direcionado para a planta de geração de amônia renovável (SHELL, 2022).

O Porto do Açú possui individualmente 12 iniciativas em estudo para o desenvolvimento de energia eólica offshore, ou seja, no mar, além de ter obtido licenciamento aprovado para a construção de uma usina solar a partir de 2024. Sua infraestrutura portuária é reconhecida como uma das melhores do Brasil, o que se torna um ponto forte para o desenvolvimento de projetos com baixa emissão de carbono e para alcançar objetivos de descarbonização na indústria (AÇU, 2022).

3.1.4 Hub de hidrogênio verde do complexo de Pecém

Em fevereiro de 2021, foi inaugurado o Hub de Hidrogênio Verde pelo Complexo do Pecém, a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará. Os hubs são espaços físicos e/ou virtuais onde empresas podem trabalhar para facilitar o crescimento de projetos, oferecendo acesso simplificado para contatar investidores e fornecedores. O objetivo deste projeto é transformar o território do estado do Ceará em um grande fornecedor global de hidrogênio verde, criando novas oportunidades de emprego, renda e contribuindo significativamente para a descarbonização global (CRUZ, 2022).

A região do Ceará apresenta um grande potencial para a obtenção e geração de energias renováveis, um requisito fundamental para viabilizar o mercado de Hidrogênio Verde. Este estado possui capacidade para instalar fontes renováveis, como energia eólica e fotovoltaica, e novas instalações destas tecnologias, possibilitando um processo híbrido. Isso significa aproveitar tanto fontes solares quanto eólicas, criando um ambiente planejado e propício para a produção deste combustível.

Devido à localização estratégica do Porto do Pecém no Ceará, o desenvolvimento da cadeia de produção, distribuição, armazenamento e transporte do Hidrogênio Verde (HV) torna-se altamente favorável. Sua proximidade com mercados globais e o Porto de Roterdã, um dos principais centros de trânsito marítimo, se tornam explicativos para sua localização. Isso porque o Porto do Pecém apresenta vantagens logísticas para escoar o HV para países europeus interessados no Brasil como parceiro nesse negócio. Além dos países europeus, o HUB já está estudando o potencial de exportação do combustível para potências asiáticas, como China, Japão e Coreia do Sul (CEARÁ, 2022).

3.2 USO DE HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL EM TRANSPORTES

No Brasil, o uso de hidrogênio em transportes tem sido explorado como um projeto-piloto e parte de iniciativas de pesquisa e desenvolvimento para tecnologias de veículos mais limpos e sustentáveis. Algumas cidades, como São Paulo e Rio de Janeiro, testaram ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio em suas frotas de transporte público.

Esses ônibus utilizam um sistema de propulsão baseado em células de combustível do

tipo membrana polimérica trocadora de prótons, resultando em zero emissão de poluentes. As próximas subseções abordam alguns projetos, que envolvem o uso de hidrogênio com combustível em transportes, que foram implementados no Brasil.

3.2.1 Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio

Segundo REGINA e LOPES (2012), o Ônibus a Célula a Combustível Hidrogênio para Transporte Urbano no Brasil é um ponto de partida crucial para o desenvolvimento de uma solução mais limpa no transporte público urbano. Essa iniciativa visa explorar e implementar a tecnologia de ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio como uma alternativa mais ambientalmente amigável em comparação com os ônibus tradicionais movidos a diesel.

Em 2010, foi lançado o primeiro ônibus a hidrogênio do Brasil, apresentando uma tecnologia inteiramente nacional. Desenvolvido pela Coppe/UFRJ em colaboração com a Fetranspor, as secretarias municipal e estadual de transportes, esse veículo é considerado um marco na evolução do transporte urbano. O projeto recebeu financiamento da Finep, Petrobras, CNPq e Faperj. Atualmente, o ônibus opera na Cidade Universitária, oferecendo transporte para professores, alunos e funcionários. Uma segunda versão está planejada para ser utilizada durante os Jogos Olímpicos de 2016, para o deslocamento dos atletas entre diferentes centros olímpicos (FINEP, 2022).

O projeto ônibus brasileiro a hidrogênio, conduzido pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP), em colaboração com o Ministério de Minas e Energia (MME), o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), o Global Environmental Facility (GEF) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), representa um marco importante para o avanço de tecnologias mais sustentáveis no transporte público no Brasil.

O projeto envolve a aquisição, operação e manutenção de quatro ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio, juntamente com a construção de uma estação de produção de hidrogênio por eletrólise para abastecer esses ônibus. Essa estação está em fase final de instalação na EMTU/SP, em São Bernardo do Campo/SP. Além disso, o projeto inclui o monitoramento da infraestrutura de abastecimento e do desempenho dos veículos que serão utilizados no Corredor Metropolitano São Mateus/Jabaquara, atravessando diversos municípios na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A implementação desse projeto brasileiro de ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio foi embasada em aspectos econômicos e ambientais que justificaram o investimento, segundo REGINA e LOPES (2012). A evolução dessa tecnologia coloca o Brasil em um nível semelhante ao de nações desenvolvidas, destacando a excelência da engenharia nacional. Esta iniciativa não só impulsiona a inovação tecnológica, mas também contribui significativamente para a redução da pegada ambiental no transporte público da região metropolitana (FONSECA et al., 2010).

3.2.2 Estações experimentais de abastecimento

A Shell está inaugurando a primeira estação experimental de abastecimento de hidrogênio renovável do mundo, derivado do etanol, no Brasil. Este lançamento, que ocorreu em agosto de 2023, na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, representa a aposta da empresa em ampliar o uso de hidrogênio no país. A ideia é simplificar o transporte com uma abordagem baseada no etanol, em parceria com a Raízen.

O projeto conta com um investimento total de R\$ 50 milhões, proveniente de recursos da cláusula de PD&I da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Como parceiros no desenvolvimento da estação, participam a Hytron, a Raízen, o SENAI CETIQT e a Universidade de São Paulo, por meio do Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI). Além disso, para testar a viabilidade desse projeto, todas as partes envolvidas assinaram um memorando de entendimento juntamente com a Toyota para a experimentação do hidrogênio em um veículo (EXAME, 2023).

No conjunto de equipamentos a ser instalado no local, destaca-se um reformador a vapor de etanol desenvolvido e produzido pela empresa Hytron. Este equipamento é responsável por converter o etanol em hidrogênio através da reforma a vapor. Durante o funcionamento da estação experimental, os pesquisadores irão validar os cálculos relacionados às emissões e aos custos do processo de produção de hidrogênio.

A planta-piloto ocupará uma área de 425 metros quadrados e terá a capacidade de produzir 4,5 quilos de H₂ por hora, voltada para o abastecimento de até três ônibus e um veículo leve. O hidrogênio produzido na estação será utilizado para abastecer os ônibus fornecidos pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP), que operarão exclusivamente dentro da cidade universitária.

Além disso, para testar a performance do hidrogênio, a Toyota disponibilizou ao projeto o Mirai, o primeiro veículo movido a hidrogênio do mundo comercializado em larga escala. O Mirai utiliza células de combustível para carregar suas baterias por meio da reação química entre hidrogênio e oxigênio (Fuel Cell Electric Vehicle) (EXAME, 2023).

3.3 PROJETOS DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO NO BRASIL

A Resolução N^o. 2, de 10 de fevereiro de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética (BRASIL, 2021a), estabeleceu diretrizes importantes sobre pesquisa e desenvolvimento no setor de energia no Brasil. Essas orientações têm como foco a alocação estratégica de recursos de pesquisa para diversos temas, incluindo o hidrogênio. Por outro lado, a Resolução N^o. 6, de 20 de abril de 2021, também do Conselho Nacional de Política Energética (BRASIL, 2021b), determinou a realização de um estudo para propor diretrizes destinadas ao Programa Nacional do Hidrogênio.

O objetivo principal é desenvolver e fortalecer o mercado de hidrogênio no Brasil, visando uma inserção internacional competitiva economicamente. Além disso, o hidrogênio foi destacado

como um dos temas prioritários para investimento em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). É relevante ressaltar que o Brasil se destaca como líder em PD&I para tecnologias de hidrogênio na América Latina. Essas resoluções refletem o compromisso do país em explorar e impulsionar o potencial do hidrogênio como fonte de energia limpa e renovável, alinhando-se com tendências globais e focando no desenvolvimento sustentável do setor energético nacional.

Os esforços de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) voltados para o hidrogênio têm sido significativos tanto na academia quanto na indústria. O projeto Energy Big Push (Grande Impulso Energia) é um exemplo dessas iniciativas, uma parceria entre a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Ministério de Minas e Energia (MME), o Centro de Gestão e Gestão Estratégica (CGEE), a Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) e diversos parceiros nacionais e internacionais, com destaque para a Agência Internacional de Energia (IEA).

Durante o período de 2013 a 2018, instituições federais como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) financiaram 91 projetos associados ao hidrogênio e/ou às pilhas a combustível, totalizando um investimento de 34 milhões de reais (R\$), equivalentes a 6,2 milhões de dólares em 2022. Esses investimentos abrangeram diferentes tipos de projetos: o FNDCT financiou 74 projetos de curto prazo (cerca de 2 anos) com um orçamento médio de R\$ 76.000 (USD 14.000), enquanto os projetos da ANEEL e da ANP tinham uma duração média de cerca de 4 anos, com um investimento médio de R\$ 1,9 milhão (USD 348.000) (MELO, 2022).

As regiões Sudeste e Nordeste lideram em número de centros de PD&I no Brasil, representando 34%, seguidas pelas regiões Sul (22%), Centro-Oeste (7%) e Norte (3%). A temática dos projetos foi diversificada, com 66% focados na produção de hidrogênio, 13% em pilhas a combustível e 9% no armazenamento, refletindo o amplo espectro de interesses e investimentos em diferentes áreas ligadas ao hidrogênio e suas aplicações. Esses números ilustram o compromisso do país com a inovação e o desenvolvimento tecnológico em energia limpa e sustentável (MELO, 2022).

4 COMPARAÇÃO DA INFRAESTRUTURA DO HIDROGÊNIO NO BRASIL COM OUTRAS ALTERNATIVAS DE ENERGIA

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e a busca por reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado uma intensa pesquisa e desenvolvimento de tecnologias energéticas alternativas em escala global. Nesse contexto, o hidrogênio desponta como uma opção promissora, oferecendo potencial para mitigar os desafios ambientais e contribuir para a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente.

No entanto, a implementação efetiva do hidrogênio como fonte de energia requer uma infraestrutura robusta e eficiente. A comparação da infraestrutura atual do hidrogênio com outras alternativas energéticas é fundamental para compreender as potencialidades, desafios e possíveis direções estratégicas na transição energética nacional.

Este capítulo visa realizar uma análise comparativa entre a infraestrutura do hidrogênio no Brasil e outras alternativas de energia relevantes, incluindo fontes renováveis como energia solar, eólica e biomassa, bem como outras tecnologias emergentes. Ao compreender as nuances da infraestrutura do hidrogênio em relação a outras opções energéticas, este estudo visa contribuir para o avanço do conhecimento e promover decisões informadas em direção a um futuro energético mais resiliente e alinhado com as demandas ambientais e socioeconômicas do Brasil.

As próximas quatro seções abordam análises comparativas a respeito da eficiência energética, custo de implementação e de operação, disponibilidade de recursos e infraestrutura existente, e o impacto ambiental entre o hidrogênio e outras fontes de energia. A quinta é reservada para expor os resultados e discussões a respeito das comparações realizadas.

4.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética é um indicador crucial que influencia diretamente a viabilidade e o impacto ambiental das diferentes fontes de energia. Na presente seção, será realizada uma análise minuciosa da eficiência energética associada à infraestrutura do hidrogênio no contexto brasileiro, confrontando-a com outras fontes alternativas de energia disponíveis no cenário nacional.

Este estudo visa não apenas quantificar a eficiência energética de cada alternativa, mas também contextualizar seu papel na matriz energética brasileira. As próximas subseções abordam a eficiência energética de algumas fontes de energia e última subseção faz um comparativo geral de todas fontes.

4.1.1 Hidrogênio

O hidrogênio é frequentemente produzido a partir de processos de eletrólise da água ou reforma de gás natural. A eficiência desse processo depende da fonte de energia usada

para a eletrólise, sendo mais alta se a energia utilizada for renovável. A eficiência da eletrólise moderna pode variar entre 70% a 80%, com expectativas de melhoria (FERREIRA, 2003).

Além disso, o hidrogênio é considerado uma forma de armazenamento de energia e pode ser utilizado em células de combustível para produzir eletricidade ou diretamente em veículos movidos a hidrogênio.

4.1.2 Energia solar

Os painéis solares convertem a luz solar diretamente em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. A eficiência média dos painéis solares comerciais varia entre 15% e 22%, embora algumas tecnologias mais avançadas possam atingir eficiências mais altas (OLIVEIRA; GONDIM; MIRANDA, 2015). O aproveitamento da energia solar pode ser direto, para eletricidade ou aquecimento de água, e também pode ser armazenado em baterias para uso posterior.

A energia solar, quando usada diretamente, pode ser mais eficiente do que a produção de hidrogênio, especialmente considerando as perdas ao longo do processo de eletrólise e conversão. No entanto, o hidrogênio possui vantagens significativas no armazenamento de energia para uso em momentos sem luz solar ou em setores que requerem energia de alta densidade, como o transporte.

4.1.3 Energia eólica

Os aerogeradores capturam a energia cinética do vento e a convertem em eletricidade. A eficiência dos modernos aerogeradores varia em torno de 40% a 50%, dependendo do design e das condições do vento. A eletricidade gerada pela energia eólica pode ser diretamente integrada à rede elétrica ou armazenada em baterias para uso posterior (TERCIOTE, 2002).

A geração de eletricidade a partir da energia eólica costuma ter uma eficiência direta superior à produção de hidrogênio, principalmente devido às perdas durante a etapa de eletrólise necessária para obter o hidrogênio. Todavia, apesar do hidrogênio ser menos eficiente na produção, é valorizado por sua capacidade de armazenamento e uso em momentos em que a energia eólica não está disponível, como em períodos de baixa velocidade do vento.

4.1.4 Biomassa

A biomassa é um recurso renovável que utiliza materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, madeira ou resíduos orgânicos, para gerar energia. A eficiência na produção de eletricidade a partir da biomassa pode variar significativamente, mas geralmente fica na faixa de 25% a 45% de eficiência em usinas modernas de biomassa (PINTO, 2019).

Em termos de eficiência direta na produção de eletricidade, as usinas de biomassa podem ter uma eficiência mais baixa se comparadas à produção direta de eletricidade a partir de hidrogênio, especialmente se considerarmos os processos modernos de eletrólise. O motivo disso é que biomassa frequentemente passa por processos de transformação e conversão térmica

antes de ser utilizada para gerar eletricidade, o que pode resultar em perdas de energia ao longo do processo.

4.1.5 Energia nuclear

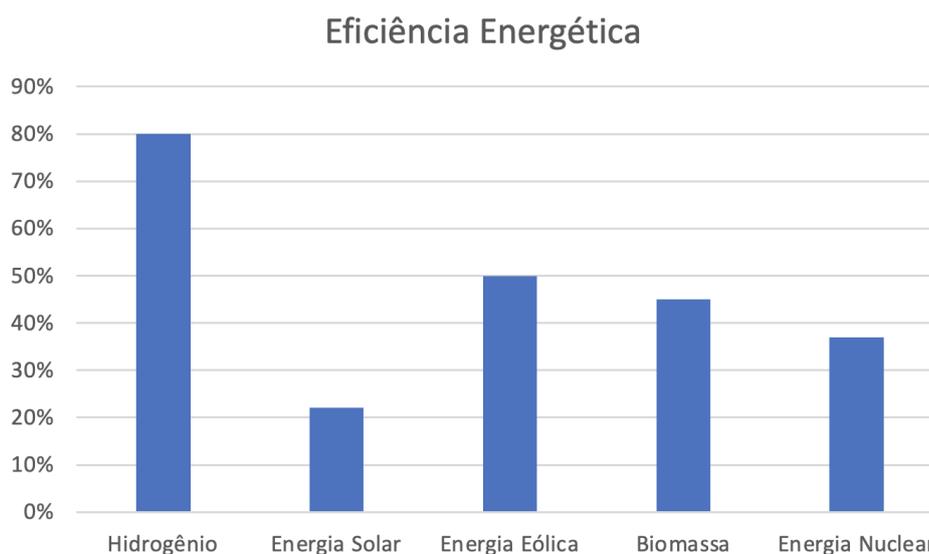
A energia nuclear é gerada pela fissão nuclear, onde o núcleo de átomos pesados, como o urânio, é dividido, liberando uma grande quantidade de energia térmica. A eficiência na conversão dessa energia térmica em eletricidade varia, mas as usinas nucleares modernas podem ter uma eficiência média em torno de 33% a 37% (SOARES; MADEIRA; CLARA, 2019).

A energia nuclear pode ter uma eficiência relativamente alta na produção direta de eletricidade quando comparada à produção de hidrogênio a partir de eletrólise, onde há perdas significativas durante o processo. Além disso, a energia nuclear é utilizada principalmente para a geração de eletricidade em usinas, enquanto o hidrogênio é frequentemente visto como um portador de energia que pode ser usado em diversos setores, incluindo transporte e indústria.

4.1.6 Comparação

A Figura 5 expõe um gráfico comparativo quantitativo entre os percentuais de eficiência energética exposto nas subseções anteriores. Nele é possível observar que o hidrogênio possui o maior percentual, quando comparado com as outras de energia. Além disso, o hidrogênio, quando comparado com a energia solar ou eólica, possui vantagens significativas de armazenamento, já que não necessita de baterias para realizar o armazenamento.

Figura 5 – Comparação de percentual de eficiência energética



Fonte: Autoria própria

Todavia, a produção do hidrogênio é menos eficiente quando comparado com a energia nuclear, eólica e solar, pois há perdas significativas no processo de eletrólise da água. Dessa forma,

as três fontes citadas possuem uma eficiência direta maior que o hidrogênio. Diferentemente da biomassa, que possui uma eficiência direta menor que hidrogênio, pois podem haver perdas durante os processos de conversão, como combustão ou gaseificação da biomassa, a depender do tipo de tecnologia utilizada para converter a energia da biomassa em eletricidade.

4.2 CUSTO DE IMPLEMENTAÇÃO E OPERAÇÃO

A viabilidade econômica é um fator determinante na adoção e na transição para fontes de energia alternativas. O custo de implementação e operação de diferentes tecnologias energéticas desempenha um papel crucial na tomada de decisões estratégicas, influenciando a adoção, o investimento e a sustentabilidade a longo prazo do sistema energético.

Nesta seção, será realizada uma análise abrangente do custo de implementação e operação associado à infraestrutura do hidrogênio no contexto brasileiro, confrontando-o com outras alternativas energéticas relevantes. O objetivo é avaliar não apenas os custos iniciais de implementação, mas também os custos operacionais ao longo do ciclo de vida de cada fonte de energia.

4.2.1 Hidrogênio

Atualmente no Brasil, os custos de instalação de sistemas de produção de hidrogênio podem variar de R\$ 5 milhões a R\$ 20 milhões para eletrolisadores de tamanho moderado a grande. Além disso, para o armazenamento, os custos de tanques de armazenamento de hidrogênio podem variar de R\$ 20.000 a R\$ 100.000 por tonelada de capacidade, dependendo do tipo e do tamanho do sistema (SILVA, 2021).

A matéria prima do hidrogênio verde é obtida através da eletrólise da água, sendo necessário a utilização de fontes renováveis. Considerando que o custo médio da eletricidade no Brasil varia regionalmente, podemos determinar que a faixa de custos está entre R\$ 0,60 a R\$ 0,80 por kWh. Além disso, também devem ser levados em consideração os custos de manutenção, que podem variar de 1% a 4% do custo total do sistema por ano, dependendo da tecnologia utilizada (SILVA, 2021).

4.2.2 Energia solar

No Brasil, custo de instalação de sistemas solares fotovoltaicos no Brasil varia amplamente, geralmente entre R\$ 15.000 e R\$ 40.000 para uma residência, dependendo do tamanho e da qualidade dos painéis. Além das placas, outros equipamentos necessários podem adicionar alguns milhares de reais ao custo total, como por exemplo, inversores e controladores de carga. O custo destes equipamentos pode variar de aproximadamente R\$ 3.000 a R\$ 15.000 ou mais, dependendo do projeto específico..

Além disso, os custos de manutenção são geralmente baixos, variando de R\$ 0,05 a R\$ 0,15 por kWh gerado, principalmente para limpeza e inspeções regulares. Desse modo, a energia

solar tende a ser mais vantajosa a longo prazo devido aos custos operacionais mais baixos após a instalação. No entanto, a escolha entre hidrogênio e energia solar também depende da finalidade e da capacidade de armazenamento energético necessário, já que o hidrogênio pode oferecer vantagens em termos de armazenamento de energia em larga escala e flexibilidade de uso (KEMERICH et al., 2016).

4.2.3 Energia Eólica

No Brasil, os custos de instalação de turbinas eólicas variam de R\$ 5 a R\$ 8 milhões por MW instalado para turbinas terrestres. Além das turbinas, há custos associados à infraestrutura, como fundações, torres e sistemas de conexão à rede, que podem representar uma parcela significativa dos custos totais (LOUREIRO; GORAYEB; BRANNSTROM, 2017).

Para manutenção, os custos de turbinas eólicas geralmente variam de 1% a 3% do custo total do projeto por ano, incluindo inspeções regulares, reparos e monitoramento. Para a operação, existem custos adicionais que incluem monitoramento remoto, seguro e despesas de gestão. De modo geral, a energia eólica apresenta custos iniciais significativos, assim como o hidrogênio, mas tende a ter custos operacionais mais baixos em comparação com a produção e armazenamento de hidrogênio.

4.2.4 Biomassa

O custo de instalação de usinas de biomassa pode variar de R\$ 6 milhões a R\$ 10 milhões por MW instalado, dependendo do tipo de biomassa e da tecnologia utilizada. Dentre os equipamentos necessários, podemos encontrar caldeiras, turbinas a vapor e sistemas de tratamento de resíduos, o que pode representar uma parcela significativa dos custos totais (NASCIMENTO; ALVES, 2016).

Os custos de manutenção para usinas de biomassa incluem operações regulares de limpeza, inspeção de equipamentos e manutenção de sistemas, com custos variando dependendo do tipo de biomassa. Para a matéria prima, embora a biomassa em si possa ser mais barata ou até gratuita, os custos de coleta, transporte e processamento podem ser consideráveis.

Quando comparado com o hidrogênio, os custos iniciais também substanciais, especialmente devido aos equipamentos de conversão, embora a biomassa em si possa ser mais acessível. Apesar disso, os custos operacionais e de matéria-prima podem variar amplamente, influenciando a viabilidade econômica de cada opção dependendo da disponibilidade local de recursos, da escala do projeto e das condições de mercado.

4.2.5 Energia nuclear

A construção de uma usina nuclear pode variar de bilhões a dezenas de bilhões de reais por GW instalado. Estimativas colocam entre R\$ 15 bilhões a R\$ 20 bilhões por GW para novas

usinas nucleares. Além disso, as despesas regulatórias e de segurança podem representar uma parcela significativa dos custos totais.

Os custos de manutenção e operação de usinas nucleares podem variar consideravelmente. Estimativas globais sugerem entre R\$ 0,15 a R\$ 0,30 por kWh gerado para a operação de usinas nucleares. A energia nuclear, embora tenha uma capacidade de geração estável, enfrenta desafios significativos de custo e segurança, enquanto o hidrogênio, embora também tenha custos iniciais, pode oferecer flexibilidade em termos de fontes de energia utilizadas para sua produção.

4.2.6 Comparação

Ao comparar o hidrogênio com diversas fontes de energia no Brasil, torna-se evidente que o custo inicial de implementação do hidrogênio varia de alguns milhões a dezenas de milhões de reais, dependendo do tamanho e da tecnologia do sistema. Os custos operacionais anuais, situados entre 1% a 4% do custo total, somados aos gastos com a eletricidade necessária para a produção, influenciam significativamente a viabilidade econômica dessa opção.

Por outro lado, fontes como a energia solar e eólica, com custos iniciais menores em comparação ao hidrogênio, têm operações com manutenção relativamente acessível, variando de alguns centavos a poucos centavos por kWh gerado.

A biomassa e a energia nuclear, embora possam fornecer energia estável, enfrentam desafios próprios em termos de custos. A biomassa apresenta um custo inicial de instalação de algumas dezenas de milhões de reais por MW instalado, com despesas operacionais dependentes do tipo de biomassa utilizado. Por sua vez, a energia nuclear exige investimentos extremamente altos, na casa dos bilhões de reais por GW instalado, acompanhados por custos operacionais que podem variar entre alguns centavos a algumas dezenas de centavos por kWh gerado.

O hidrogênio, apesar dos gastos iniciais elevados, oferece flexibilidade na escolha da fonte de energia para sua produção, enquanto as alternativas renováveis como solar e eólica se destacam por custos iniciais relativamente menores e operações mais acessíveis.

4.3 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS E INFRAESTRUTURA EXISTENTE

Nesta seção, busca-se realizar uma análise abrangente da disponibilidade de recursos associados à infraestrutura do hidrogênio no contexto brasileiro, confrontando-a com outras fontes energéticas relevantes. Além disso, será examinada a infraestrutura já estabelecida e a capacidade de expansão ou adaptação para suportar a integração dessas alternativas energéticas.

4.3.1 Energia solar

Nos últimos anos, houve um aumento significativo na instalação de sistemas de energia solar no Brasil, tanto em pequena escala (residências) quanto em grande escala (usinas solares). Isso resultou em uma infraestrutura crescente para a produção e distribuição de energia solar.

O governo brasileiro implementou políticas de incentivo, como leilões de energia solar e linhas de financiamento específicas, para promover a expansão da energia solar no país. Além disso, o Brasil é privilegiado com uma alta incidência de radiação solar ao longo do ano, especialmente em regiões como o Nordeste. Isso oferece um grande potencial para a produção de energia solar.

A energia solar tem uma infraestrutura mais desenvolvida e uma implementação mais difundida no Brasil do que o hidrogênio atualmente. No entanto, o potencial para o uso do hidrogênio, especialmente o hidrogênio verde, é alto, e espera-se que haja um crescimento significativo com investimentos e avanços tecnológicos nos próximos anos.

4.3.2 Energia Eólica

O Brasil possui um grande potencial para energia eólica, principalmente em regiões costeiras e áreas elevadas, onde os ventos são mais consistentes e fortes. Regiões como o Nordeste apresentam um alto potencial para a geração de energia por meio de turbinas eólicas.

A energia eólica tem sido amplamente adotada no Brasil, com a instalação de parques eólicos em várias regiões do país. A infraestrutura para a produção e distribuição de energia eólica está mais avançada do que a do hidrogênio, com diversos parques em operação e uma rede de distribuição em desenvolvimento.

Quando comparado com o hidrogênio, a energia eólica possui uma infraestrutura mais avançada e uma implementação mais difundida no Brasil do que o hidrogênio. Ambas as fontes renováveis têm um potencial considerável, mas a energia eólica está atualmente em um estágio mais avançado em termos de infraestrutura e produção de energia no país.

4.3.3 Biomassa

A infraestrutura para a produção de energia a partir de biomassa é robusta no Brasil, especialmente no setor sucroenergético, que utiliza o bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade. Além disso, existem plantas de biogás que convertem resíduos orgânicos em energia.

Para os recursos, o Brasil possui uma rica base de recursos para a produção de biomassa, incluindo resíduos agrícolas (como bagaço de cana-de-açúcar), resíduos florestais e outros resíduos orgânicos. A biomassa é amplamente utilizada no país para geração de energia, principalmente na forma de biocombustíveis como etanol e biodiesel. Além disso, o Brasil tem políticas e programas de incentivo para o uso de biomassa na geração de energia, como o RenovaBio, que busca aumentar a participação de biocombustíveis na matriz energética nacional.

A biomassa tem uma infraestrutura mais consolidada e uma aplicação mais difundida na geração de energia em comparação com a produção de hidrogênio a partir desse recurso. No entanto, a biomassa pode desempenhar um papel importante na produção de hidrogênio verde, mas exigirá investimentos significativos para ampliar sua utilização nesse sentido.

4.3.4 Energia nuclear

O Brasil possui tecnologia e reservas significativas de urânio, que são usadas na produção de energia nuclear. O país tem duas usinas nucleares em operação: Angra 1 e Angra 2. Essas usinas contribuem para a matriz energética brasileira, embora a participação da energia nuclear seja relativamente pequena em comparação com outras fontes.

As usinas nucleares existentes, Angra 1 e Angra 2, estão localizadas no estado do Rio de Janeiro. A infraestrutura nuclear no Brasil é relativamente limitada em comparação com outras fontes de energia, devido às preocupações de segurança e questões ambientais associadas à energia nuclear.

Todavia, o Brasil tem programas para expandir sua capacidade nuclear, incluindo a construção da usina Angra 3. No entanto, a expansão da energia nuclear enfrenta desafios devido a debates sobre segurança, gestão de resíduos nucleares e preocupações ambientais.

Em comparação com o hidrogênio, a energia nuclear tem uma infraestrutura mais consolidada e estabelecida no Brasil, apesar de enfrentar desafios relacionados à aceitação pública e questões ambientais.

4.3.5 Comparação

No Brasil, a energia solar e a eólica são fontes estabelecidas e possuem infraestruturas mais avançadas em comparação com o hidrogênio, seja derivado de fontes renováveis ou não. A abundância de recursos solares e ventos fortes permitiu um crescimento notável na produção de energia solar e eólica, com políticas públicas e investimentos impulsionando sua implementação.

No entanto, tanto o hidrogênio verde quanto a biomassa são fontes promissoras, embora ainda estejam em estágios iniciais de desenvolvimento de infraestrutura. Enquanto a biomassa já tem aplicação significativa na produção de biocombustíveis, sua contribuição para a produção de hidrogênio ainda requer avanços tecnológicos.

Por outro lado, embora a energia nuclear tenha uma presença estabelecida, sua expansão enfrenta desafios em termos de segurança, gestão de resíduos e preocupações ambientais, enquanto o hidrogênio ainda está em fase de desenvolvimento de infraestrutura no país, apesar de seu potencial usando fontes renováveis.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A eficiência energética, custos de implantação e operação, além da disponibilidade de recursos, desempenham papéis cruciais na avaliação e na seleção de fontes de energia. No contexto brasileiro, estas métricas são fundamentais ao considerar a implementação das fontes energéticas discutidas: energia solar, eólica, biomassa, nuclear e hidrogênio.

A energia solar destaca-se no Brasil devido à sua alta eficiência energética proporcionada pela grande irradiação solar em várias regiões do país. O Nordeste brasileiro, por exemplo, é conhecido por sua elevada incidência solar, tornando-a uma região propícia para usinas solares.

Similarmente, a energia eólica é altamente eficiente em regiões com ventos constantes, como no litoral nordestino, onde os parques eólicos têm se mostrado eficazes.

A biomassa é uma fonte energética consolidada devido à abundância de recursos como bagaço de cana-de-açúcar e outros resíduos agrícolas, garantindo uma alta disponibilidade de matéria-prima para a produção de energia. A energia nuclear, apesar de suas vantagens em eficiência energética, enfrenta desafios em relação à disponibilidade de recursos, principalmente devido à dependência de importações de urânio para suas usinas.

O hidrogênio, especialmente o hidrogênio verde, depende diretamente da disponibilidade de fontes renováveis para sua produção. Com vastos recursos solares, eólicos e de biomassa, o Brasil apresenta um potencial considerável para a produção de hidrogênio verde, mas sua eficiência energética e disponibilidade em escala ainda estão em estágios iniciais.

O custo de implantação e operação varia significativamente entre as diferentes fontes de energia. A energia solar, embora tenha visto uma redução considerável nos custos de implantação devido ao avanço tecnológico, ainda apresenta investimentos iniciais consideráveis. No entanto, seus custos operacionais são relativamente baixos.

A energia eólica, por sua vez, tem se tornado mais competitiva em termos de custo de implantação e operação, com uma tendência de redução nos custos devido a avanços tecnológicos e escala de produção. A biomassa, dada sua base agrícola, muitas vezes oferece custos de implantação relativamente menores, mas pode variar dependendo da infraestrutura disponível para seu processamento.

A energia nuclear, embora tenha custos iniciais elevados de implantação, apresenta custos operacionais relativamente baixos. Entretanto, os investimentos em segurança e gestão de resíduos nucleares aumentam seus custos totais.

O hidrogênio verde, enfrenta custos significativos de implantação devido à necessidade de infraestrutura específica para sua produção, armazenamento e distribuição. No entanto, com avanços tecnológicos e investimentos, espera-se uma redução progressiva desses custos ao longo do tempo.

A análise dos parâmetros de eficiência energética, custos de implantação e operação, bem como a disponibilidade de recursos, destaca as particularidades e desafios de cada fonte de energia no contexto brasileiro. Esses fatores são determinantes na formulação de políticas públicas, investimentos estratégicos e na definição de direcionamentos para uma transição energética mais eficiente, econômica e sustentável para o Brasil.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição para um sistema energético mais sustentável e diversificado no Brasil requer uma abordagem estratégica e integrada. Enquanto as fontes de energia solar, eólica, biomassa e nuclear já possuem suas posições consolidadas na matriz energética nacional, o hidrogênio representa uma oportunidade promissora, mas que demanda investimentos significativos em infraestrutura e tecnologia.

A diversificação da matriz energética brasileira é crucial para garantir a segurança energética e reduzir a pegada ambiental do país. Neste contexto, a análise comparativa entre as fontes energéticas existentes e o potencial do hidrogênio como uma alternativa promissora destaca a necessidade de abordagens multifacetadas para a transição energética. Embora a energia solar, eólica, biomassa e nuclear tenham contribuído significativamente para a matriz, a expansão do hidrogênio requer um investimento estratégico e de longo prazo.

A infraestrutura do hidrogênio, embora em estágios iniciais, apresenta um potencial extraordinário para impulsionar uma economia mais limpa e sustentável no Brasil. Estratégias de implantação que incentivem a pesquisa, inovação, infraestrutura e regulamentações favoráveis são fundamentais para ampliar a produção e o uso do hidrogênio verde. Além disso, a colaboração entre o setor público e privado desempenha um papel crucial na promoção de investimentos necessários para viabilizar o papel do hidrogênio como parte integrante da matriz energética nacional.

A transição energética é um desafio complexo que requer compromissos de longo prazo e uma visão abrangente. O Brasil possui recursos naturais vastos e diversificados que podem ser aproveitados para impulsionar a adoção de fontes de energia mais limpas. Ao explorar e investir no potencial do hidrogênio, o país pode posicionar-se na vanguarda da inovação energética, impulsionando não apenas o crescimento econômico, mas também a sustentabilidade ambiental e a resiliência energética para as gerações futuras.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M.; ABREU, A. Produção de hidrogênio a partir de resíduos. Centro para a Valorização de Resíduos (CVR), 2006. Citado na página 5.
- AMARAL, M. M. d. **Avaliação técnica do transporte e do armazenamento de hidrogênio visando a descarbonização do sistema energético nacional**. Tese (Doutorado) — Universidade Nova, 2021. Citado na página 6.
- AZIZ, M.; DARMAWAN, A.; JUANGSA, F. B. Hydrogen production from biomasses and wastes: A technological review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 68, p. 33756–33781, 2021. Citado na página 4.
- AÇU, P. 2022. Disponível em: <<https://portodoacu.com.br/shell-brasil-e-porto-do-acu-anunciam-projeto-inedito-em-hidrogenio-verde>>. Acesso em: 27 de novembro de 2023. Citado na página 16.
- BRASIL. **Sistemas célula a combustível**: programa brasileiro procac. 2002. Disponível em: <<https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5456>>. Acesso em: 24 out. 2023. Citado na página 9.
- BRASIL. **Hidrogênio energético no Brasil**: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. 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: 24 out. 2023. Citado na página 9.
- BRASIL. **Plano Nacional de Energia 20250**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-nacional-de-energia/plano-nacional-de-energia-2050>>. Acesso em: 27 out. 2021. Citado na página 9.
- BRASIL. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>>. Acesso em: 24 out. 2023. Citado na página 9.
- BRASIL. Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, do conselho nacional de política energética - cnpe. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 163-164, 2021. Citado na página 18.
- BRASIL. Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021, do conselho nacional de política energética - cnpe. Diário Oficial da União, Seção 1, p. 163-164, 2021. Citado na página 18.
- BRASIL. Balanço energético nacional. **Diário Oficial da União**, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- BRASIL, P. Hidrogênio verde e o futuro das matrizes energéticas. 2022. Disponível em: <<https://www.pwc.com.br/pt/estudos/setores-atividade/energia/2022/hidrogenio-verde-e-o-futuro-das-matrizes-energeticas.html>>. Acesso em: 27 out. 2023. Citado na página 7.
- CARDOSO, E. d. M. et al. Energia nuclear. **Rio de Janeiro**, v. 3, 2012. Citado na página 12.
- CEARÁ, Z. 2022. Disponível em: <<https://zpeceara.com.br/hubh2v/>>. Acesso em: 27 de

novembro de 2023. Citado na página 16.

CRUZ, J. 2022. Disponível em: <<https://zpeceara.com.br/hub-de-hidrogenio-verde-governo-do-ceara-assina-mais-dois-memorandos-de-entendimento>>. Acesso em: 27 de novembro de 2023. Citado na página 16.

ELETROBRÁS; INB. Proposta para otimização de recursos com recuperação de hidrogênio em centrais nucleares à beira mar. 2022. Citado na página 15.

EPR. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-de>>. Acesso em: 28 de novembro de 2023. Citado na página 14.

EXAME. 2023. Disponível em: <<https://exame.com/esg/estacao-de-abastecimento-de-hidrogenio-feito-a-partir-de-etanol-sera-construida-em-sao-paulo/>>. Acesso em: 28 de novembro de 2023. Citado na página 18.

FERREIRA, P. F. P. **Análise da viabilidade de sistemas de armazenamento de energia elétrica na forma de hidrogênio utilizando células a combustível**. Tese (Doutorado) — Unicamp, 2003. Citado na página 21.

FINEP. 2022. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>>. Acesso em: 27 de novembro de 2023. Citado na página 17.

FONSECA, A. C. B. et al. Substituição dos ônibus movidos a diesel por ônibus não-poluentes movidos a hidrogênio na unicamp. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 6, n. 2, 2010. Citado na página 17.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 32, p. 582–587, 2009. Citado na página 13.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, Casa das Ciências, v. 10, n. 2, 2022. Citado na página 4.

KEMERICH, P. D. da C. et al. Paradigmas da energia solar no brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 241–247, 2016. Citado na página 24.

LEAL, J. A. da S. **Sustentabilidade e inovação: o papel das células à combustível de hidrogênio na transição energética brasileira**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — UFPE, 2023. Citado na página 8.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. Estratégias para a transição energética: revisão de literatura. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, p. 96–120, 2022. Citado na página 1.

LOUREIRO, C. V.; GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C. Análise comparativa de políticas de implantação e resultados sociais da energia eólica no brasil e nos estados unidos. **RAEGA-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 40, p. 231–247, 2017. Citado na página 24.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015. Citado na página 10.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica.

Revista Brasileira de Ensino de Física, SciELO Brasil, v. 30, p. 1304–1, 2008. Citado na página 11.

MELO, R. R. Perspectivas do hidrogênio verde e e-combustíveis no Brasil: Uma breve revisão da literatura. 2022. Citado na página 19.

NASCIMENTO, R. S. d.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais. **XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência–Universidade do Vale do Paraíba**, 2016. Citado na página 24.

OLIVEIRA, R. C. de. Panorama do hidrogênio no Brasil. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)**, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.

OLIVEIRA, T. Evolução da matriz energética brasileira em comparação com outros países. **Universidade Federal de São Carlos**, 2022. Citado na página 7.

OLIVEIRA, W. D.; GONDIM, G. V.; MIRANDA, A. d. A. R. A eficiência energética do sistema solar fotovoltaico: Instalação de um painel solar em residência. **Rio Verde: UNIRV**, 2015. Citado na página 21.

PECÉM, C. D. 2023. Disponível em: <<https://www.complexodopecem.com.br/governo-do-ceara-e-qair-brasil-assinam-acordo-de-us-69-bilhoes-para-projetos-de-energias-renovaveis/>>. Acesso em: 28 de novembro de 2023. Citado na página 15.

PINTO, H. R. de F. Eficiência energética: mapeando os principais contornos da biomassa. **Conceitos**, p. 85, 2019. Citado na página 21.

REGINA, I. C.; LOPES, M. C. Ônibus a célula a combustível hidrogênio para transporte urbano no Brasil. **ENGENHARIA, TRANSPORTE EMTU/SP**, p. 118–120, 2012. Citado na página 17.

REITZ, W. **Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, and Applications, (Volume 1)** W. Vielstich, A. Lamm, and HA Gasteiger (editors) A Review of: “John Wiley and Sons, Ltd., 111 River St., Hoboken, NJ 07030, 2003, vol. 1, Fundamentals and Survey of Systems, 444+ pages, ISBN 0-471-49926-9.”. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

RODRIGUES, R. M. Produção de hidrogênio por reforma a vapor de biogás. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2013. Citado na página 6.

SHELL. 2022. Disponível em: <<https://www.shell.com.br/imprensa/comunicados-para-a-imprensa-2022/shell-brasil-e-porto-do-acu-anunciam-projeto-inedito-em-hidrogenio-ve.html>>. Acesso em: 27 de novembro de 2023. Citado na página 16.

SILVA, D. C. F. da. Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica. **Instituto de Energia da PUC**, 2021. Citado na página 23.

SILVA, G. d. A. d. Hidrogênio a partir do biogás: possibilidade do armazenamento de energia sustentável. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 6.

SOARES, F. d. A. da S.; MADEIRA, J. G. F.; CLARA, M. L. P. Análise energética de uma

usina nuclear com reator bwr e estudo comparativo com a usina nuclear angra 2 do modelo pwr. **Revista Brasileira de Energia** | **Vol**, v. 25, n. 1, 2019. Citado na página 22.

SOLAR, T. E. 2022. Disponível em: <<https://teresinaenergiasolar.com.br/como-a-energia-solar-pode-ser-convertida-em-energia-eletrica/>>. Acesso em: 14 de dezembro de 2023. Citado na página 10.

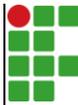
TERCIOTE, R. Eficiência energética de um sistema eólico isolado. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, SciELO Brasil, 2002. Citado na página 21.

TICIANELLI, E. A.; CAMARA, G. A.; SANTOS, L. G. Eletrocatálise das reações de oxidação de hidrogênio e de redução de oxigênio. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 28, p. 664–669, 2005. Citado na página 2.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos estudos CEBRAP**, SciELO Brasil, p. 47–69, 2007. Citado na página 1.

VARGAS, R. A. et al. Hidrogênio: o vetor energético do futuro? 2006. Citado na página 1.

WENDT, H.; GÖTZ, M.; LINARDI, M. Tecnologia de células a combustível. **Química Nova**, SciELO Brasil, v. 23, p. 538–546, 2000. Citado na página 3.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

TRABALHO DE CONCLUSÃO

Assunto:	TRABALHO DE CONCLUSÃO
Assinado por:	Gilvan Andrade
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Gilvan Vieira de Andrade Junior, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCSBEE-JP**, em 06/01/2024 17:09:04.

Este documento foi armazenado no SUAP em 06/01/2024. 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: 1046992

Código de Autenticação: bdb75786b9

