



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Garanhuns

Bacharelado em Engenharia Elétrica

RHAYSSA DA SILVA ALMEIDA

**VISÕES E METAS DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: Comparação das
Abordagens no PNE e no PDE para o Setor Elétrico**

Garanhuns - PE

2024

RHAYSSA DA SILVA ALMEIDA

**VISÕES E METAS DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: Comparação das
Abordagens no PNE e no PDE para o Setor Elétrico**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Coordenação do Curso Superior Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Severino da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Mendonça Rocha Barros

Garanhuns - PE

2024

A447v

Almeida, Rhayssa da Silva.

Visões e metas do hidrogênio verde no Brasil : comparação das abordagens no PNE e no PDE para o setor elétrico / Rhayssa da Silva Almeida ; orientador Márcio Severino da Silva , 2024.

60f. : il.

Orientador: Márcio Severino da Silva.

Coorientador Rafael Mendonça Rocha Barros,

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2024.

1. Hidrogênio como combustível - Brasil. 2. Política energética – Brasil. 3. Energia limpa. 4. Energia – Fontes alternativas. I. Título.

CDD 621.312429

Andréa Maria Lidington Lins –CRB4/868

RHAYSSA DA SILVA ALMEIDA

**VISÕES E METAS DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL: Comparação das
Abordagens no PNE e no PDE para o Setor Elétrico**

Prof. Dr. Márcio Severino da Silva (orientador)

Prof. Dr. Rafael Mendonça Rocha Barros (coorientador)

Prof. Dr. Diego Soares Lopes (examinador interno)

Prof. Dr. Pedro Henrique Campello Santos (examinador externo)

Garanhuns - PE

2024

Dedico este trabalho aos meus pais, que, sob muito sol,
me guiaram até aqui, na sombra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus guias, regentes do meu orí e dos meus caminhos, que não permitiram que eu desistisse dessa jornada.

Também agradeço aos meus pais, Gilmar e Renata, que são minha base em tudo; e aos meus irmãos, Gabriel e Giovana, que fazem minha vida ter mais cor.

Agradeço à mina melhor amiga, Déborah, e aos amigos que fiz durante essa caminhada; em especial, aos membros do 'povo do meet', Esdras, Felipe, Fernando, Jaciel, José Vitor e Ingrid, que foram cruciais para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Ao meu amor, Jonas, por sempre acreditar em mim e me motivar a seguir em frente. Sua presença em minha vida tornou tudo mais leve e feliz.

Gostaria de agradecer a ACETEC Consultoria, empresa júnior de engenharia, que me ajudou a começar a traçar minha carreira profissional.

Não posso deixar de agradecer aos meus gatos, Chico e Lulu, em especial a Melzinha, que estiveram ao meu lado durante essa caminhada, me fornecendo apoio emocional e roubando minhas canetas.

*“Se estiver se sentindo desmotivado ou sentindo que não é bom o suficiente,
incendeie o seu coração, enxugue as lágrimas e siga em frente”.*

Rengoku, Kimetsu no Yaiba

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo examinar as políticas energéticas brasileiras, com foco no impacto do hidrogênio verde no setor elétrico. A pesquisa foi realizada por meio da análise comparativa entre o Plano Nacional de Energia (PNE) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), além da coleta de dados sobre hidrogênio verde. Os resultados indicam que a falta de alinhamento entre o PNE e o PDE pode comprometer a implementação de projetos de hidrogênio verde, gerando insegurança para investidores. Conclui-se que é essencial uma abordagem integrada nas políticas energéticas para promover a transição para o hidrogênio verde, garantindo um mercado competitivo e sustentável.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde, Transição Energética, Setor Elétrico.

ABSTRACT

This work aims to examine Brazilian energy policies, focusing on the impact of green hydrogen in the electric sector. The research was conducted through a comparative analysis between the National Energy Plan (PNE) and the Decennial Energy Expansion Plan (PDE), as well as the collection of data on green hydrogen. The results indicate that the lack of alignment between the PNE and the PDE may compromise the implementation of green hydrogen projects, generating insecurity for investors. It is concluded that an integrated approach in energy policies is essential to promote the transition to green hydrogen, ensuring a competitive and sustainable market.

Keywords: Green Hydrogen, Energy Transition, Electric Sector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).....	16
Figura 2.1 – Eixos temáticos do 3Ds.....	21
Figura 2.2 – Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023.....	22
Figura 2.3 – Rota de produção do hidrogênio.....	23
Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de eletrólise.....	24
Figura 2.5 – Potenciais projetos no Brasil.....	27
Figura 2.6 - Potencial de Produção de Hidrogênio renovável no Brasil.....	28
Figura 2.7 – Ônibus movido a célula de hidrogênio desenvolvido pela Coppe.....	32
Figura 4.1 – Estrutura do capítulo.....	37
Figura 4.2 - Mapa síntese do PDE 2030	41
Figura 4.3 - PDE 2030 x PDE 2029: Comparação entre previsões de carga de energia no SIN.....	42
Figura 4.4 - Mapa síntese do PDE 2031	44
Figura 4.5 - PDE 2031 x PDE 2030: Comparação entre previsões de carga de energia no SIN.....	45
Figura 4.6 – SIN: Carga de energia (GWmédio) PDE 2032.....	46
Figura 4.7 – SIN: Carga de energia (GWmédio), PDE 2034.....	47
Figura 4.8 – Evolução Projetada da Demanda de Energia no Brasil (2030-2034).....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das cores do hidrogênio de acordo com a tecnologia de produção.	23
Tabela 2.2 – Projetos e investimentos confirmados no Brasil em H2V.	28
Tabela 4.1 – Síntese das comparações entre os planos.....	54

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1.....	23
Equação 2.2.....	24
Equação 2.3.....	24
Equação 2.4.....	24
Equação 2.5.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

3Ds	Descarbonização, Descentralização e Digitalização
ABC	Agência Brasileira de Cooperação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono (Carbon, Capture and Storage)
CCUS	Captura, Armazenamento e Uso de Carbono (Carbon, Capture, Usage and Storage)
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	Dióxido de carbono
DEA	Análise de Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis)
EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agência Alemã de Cooperação Internacional)
H ₂	Hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio Verde
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável (International Renewable Energy Agency)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDI	Modelo Computacional de Decisão de Investimentos
MEN	Matriz Energética Nacional
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Medida Provisória
MRE	Mecanismo de Realocação de Energia

ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIE	Outras Instalações de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PDE	Plano Decenal de Energia
PEM	Membrana de troca protônica (Proton Exchange Membrane)
PIB	Produto Interno Bruto
PMR	Parceria para a Preparação de Mercados (Partnership for Market Readiness)
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
PNE	Plano Nacional de Energia
PNH2	Plano Nacional de Hidrogênio
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROCaC	Programa de Conversão e Armazenamento de Carbono
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROH2	Programa de Hidrogênio Verde
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SEE	Sistema Elétrico Estadual
SOE	Sistema Operacional de Energia
TAP	Planos de Ação Tecnológica
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Transição energética	19
2.2 Hidrogênio verde como vetor energético	22
2.3 Políticas Energéticas Nacionais	29
2.3.1 Plano Nacional de Energia (PNE) e Plano Decenal de Energia (PDE)	30
2.3.2 Plano Nacional de Energia (PNE)	35
3 METODOLOGIA	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Visão Geral do PNE	38
4.2 Visão geral do PDE	40
4.2.1 PDE 2030	40
4.2.2 PDE 2031	43
4.2.3 PDE 2032	45
4.2.4 PDE 2034	46
4.3 Análise Comparativa	48
4.3.1 Abordagem do Hidrogênio Verde nos planos	48
4.3.2 Objetivos e metas	48
4.3.3 Integração aos planos de expansão	49
4.3.4 Políticas e estratégias	50
4.3.5 Desafios e oportunidades	50
4.3.6 Identificação de lacunas	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERENCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A transição energética tem se tornado uma pauta prioritária a nível global, à medida que a sociedade reconhece a urgência de promover uma mudança fundamental em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis. A crescente preocupação com as mudanças climáticas e o aquecimento global tem impulsionado uma transformação significativa no setor energético em todo o mundo (Garcia, 2024).

Conscientes dos impactos significativos das emissões de gases poluentes na atmosfera, governos, organizações e sociedade civil têm se unido em um esforço coletivo para reduzir essas emissões e buscar alternativas mais sustentáveis para o suprimento de energia. Como apontado por Castro (2021), o setor elétrico desempenha um papel central na crise climática, sendo um dos maiores emissores de gases poluentes em virtude da geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis.

Dessa forma, essa tendência é reforçada por acordos internacionais, como o Acordo de Paris, que estabelecem metas ambiciosas para a mitigação das mudanças climáticas e limitação do aumento da temperatura global.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1.1) fazem parte da Agenda 2030, um conjunto de ações com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável por meio da tríade econômica, ambiental e social. Esses planos estão diretamente ligados à necessidade de utilizar o hidrogênio verde (H₂V) e outras formas de energia sustentável. Por exemplo, o ODS 13, "Ação contra a Mudança Global do Clima", busca implementar estratégias para minimizar as mudanças climáticas. Da mesma forma, o ODS 7, "Energia Limpa e Acessível", tem como meta aumentar o uso de energias renováveis na matriz energética global até 2030 (Madruga, 2023; Gehrke et al., 2021; Raman, 2022; Nações Unidas Brasil, 2019).

Figura 1.1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).



Fonte: Adaptado de Portal Gov.br (2024).

Com o objetivo de atenuar o aquecimento global e, conseqüentemente, assegurar um futuro sustentável para o nosso planeta, é substancial reduzir as emissões de gases de efeito estufa de maneira significativa, com ênfase especial no dióxido de carbono (CO₂). Para alcançar esse propósito, torna-se essencial a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renovável. Conforme destacado por Bezerra (2021), uma das maneiras de viabilizar a transição energética rumo a uma economia de baixo carbono é através da utilização do hidrogênio (H₂) em processos industriais e como um combustível alternativo aos derivados de fontes fósseis.

O hidrogênio apresenta uma versatilidade notável, podendo ser empregado como matéria-prima, combustível ou agente de transporte e armazenamento de energia. Suas aplicações abrangem diversos setores, incluindo: indústria, com o refino de petróleo; transporte, através de veículos leves e pesados, aviação ou transporte marítimo; energia, por meio do armazenamento de energia e da geração de eletricidade; e construção, auxiliando na produção de aço. O que o torna

ainda mais significativo é o fato de que sua utilização não resulta na emissão de CO₂ e tem um impacto mínimo na qualidade do ar. Desse modo, o hidrogênio emerge como uma solução promissora para descarbonizar processos industriais e setores econômicos nos quais a redução das emissões de carbono representa um desafio significativo (Garcia, 2024).

1.1 Justificativa da pesquisa

No Brasil, as políticas energéticas são guiadas por uma série de planos e programas que buscam assegurar a segurança energética e promover a eficiência e a sustentabilidade. Entre esses instrumentos, destacam-se o Plano Nacional de Energia (PNE) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE). O PNE oferece uma visão de longo prazo (30 anos) para o setor energético, enquanto o PDE fornece um planejamento detalhado para a próxima década.

A falta de alinhamento entre esses documentos cruciais pode gerar insegurança para investidores, dificultar a tomada de decisões estratégicas e comprometer a eficiência na transição energética. A introdução do hidrogênio verde nesse contexto torna ainda mais urgente a necessidade de uma visão integrada e coerente, pois a divergência entre os planos pode retardar a implementação de projetos inovadores e a criação de um mercado competitivo para essa nova tecnologia.

1.2 Objetivos

À vista disso, o objetivo geral deste trabalho consiste em examinar as políticas planejadas pelo governo através dos lançamentos do PNE 2050 e do PDEs 2030 a 2034, a respeito dos impactos do hidrogênio verde para o setor elétrico.

De maneira mais objetiva, o estudo tem como pretensão:

- Analisar o Plano Nacional de Energia (PNE) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE);
- Coletar dados referentes aos principais aspectos, relacionados ao hidrogênio verde no Brasil, abordados nos planos;
- Comparar o PNE e o PDE;
- Realizar análise crítica, apontando pontos de semelhanças e divergências.

1.3 Estrutura do Texto

Em relação à estrutura do trabalho, a organização segue os seguintes capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução:
 - Este capítulo contextualiza o tema, fornecendo uma visão geral da transição energética e do papel do hidrogênio verde nesse contexto;
- Capítulo 2 - Fundamentação teórica:
 - Nesse capítulo, é apresentado um panorama mais detalhado da transição energética, destacando a importância do hidrogênio verde. Além disso, são discutidas as políticas energéticas nacionais, com ênfase nos planos nacional e decenal de energia, e seu impacto no setor elétrico;
- Capítulo 3 - Metodologia:
 - No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho;
- Capítulo 4 - Resultados e Discussão:
 - Esse capítulo contempla os resultados obtidos a partir das análises realizadas;
- Capítulo 5 - Considerações finais:
 - O último capítulo apresenta a conclusão final do estudo, destacando os principais resultados e fornecendo sugestões para trabalhos futuros visando o aprimoramento da análise realizada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção do trabalho tem como objetivo fornecer o embasamento teórico necessário para a compreensão do estudo proposto. Os quatro pilares principais são constituídos por: a exploração das principais tendências na transição energética global e a importância do hidrogênio verde dentro desse contexto; uma visão abrangente sobre o hidrogênio verde como uma promissora fonte energética; uma análise das políticas energéticas nacionais implementadas no Brasil; e o papel distintivo desempenhado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e pelo Plano Nacional de Energia (PNE) no cenário específico do setor elétrico brasileiro. O propósito desta seção é proporcionar uma compreensão clara do que será tratado utilizado na metodologia e na análise dos resultados obtidos.

2.1 Transição energética

A transição energética global representa um processo em constante evolução, impulsionado por uma interação complexa de diversos fatores. Estes incluem preocupações ambientais crescentes, avanços tecnológicos contínuos e mudanças nas políticas energéticas em níveis local, nacional e internacional. O objetivo fundamental dessa transformação é a substituição gradual das fontes de energia tradicionais, muitas das quais são baseadas em combustíveis fósseis altamente poluentes, por alternativas mais limpas e sustentáveis (Marques, 2023). Nesse contexto, várias tendências emergem como motores dessa mudança, refletindo a dinâmica e a diversidade dos esforços globais para remodelar o panorama energético atual em direção a um futuro mais sustentável.

A adaptação de uma matriz energética ao uso de fontes renováveis depende de três grandes processos: a descarbonização, a descentralização e a digitalização (Baldissera, 2023). Santos (2023) destaca que a descentralização, a digitalização e a descarbonização representam pilares essenciais para a transformação do setor elétrico em escala global. Essas áreas tecnológicas não apenas oferecem direcionamentos para a mudança, mas estão profundamente interligadas, especialmente através das complexas redes de distribuição elétrica. A modernização dessas redes é um desafio crítico, pois requer investimentos substanciais não apenas

para o desenvolvimento, mas também para a efetiva implementação de novas tecnologias que possam sustentar uma infraestrutura energética mais eficiente e sustentável.

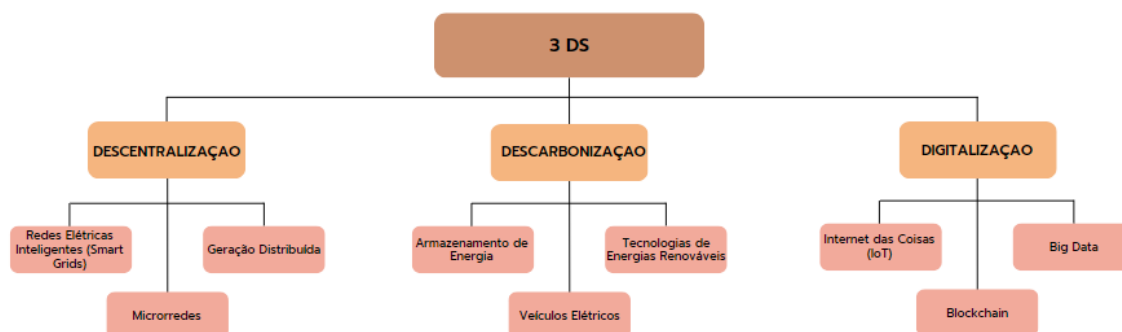
A descarbonização é o processo pelo qual países, empresas ou indivíduos buscam reduzir suas emissões de carbono de origem fóssil, a níveis muito baixos ou até zerá-las (Instituto E+, 2020). Esse processo envolve a adoção de práticas mais sustentáveis, como a utilização de fontes de energia renováveis, a melhoria da eficiência energética, o desenvolvimento de tecnologias limpas e a implementação de políticas públicas que incentivem a redução de emissões. A descarbonização é fundamental para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover um futuro mais sustentável e resiliente.

Segundo Baldissera (2023), a descentralização é a estratégia de distribuir a geração de energia em diversas fontes e locais, em vez de concentrá-la em grandes usinas. Tal estratégia faz com que as perdas na transmissão sejam mitigadas, uma vez que a energia passa a ser gerada próximo ao consumidor. Isso não apenas reduz as perdas de energia durante o transporte, mas também aumenta a segurança e a confiabilidade do fornecimento, adaptando-se melhor às necessidades específicas de cada região e contribuindo para a resiliência do sistema elétrico como um todo.

Borges (2023) aponta a digitalização como uma melhoria na qualidade, segurança, confiabilidade e transparência do setor energético, bem como a possibilidade de surgimento de modelos de negócio e de consumo. Isso é possível porque a implementação de tecnologias digitais e de informação e comunicação aperfeiçoa processos, serviços e produtos atinentes à energia. A digitalização torna mais fácil monitorar a rede elétrica em tempo real. Ela também permite integrar fontes de energia renovável de maneira mais eficiente e viabiliza redes inteligentes que se ajustam às variações na demanda e oferta de energia. Além disso, dá aos consumidores mais controle sobre seu consumo e custos de energia, promovendo maior eficiência energética e sustentabilidade no uso dos recursos.

A figura 2.1 representa os eixos temáticos dos 3Ds, além de exemplos de tecnologias associadas a cada um deles

Figura 2.1 – Eixos temáticos do 3Ds.



Fonte: Elaboração própria com informação de Santos (2023).

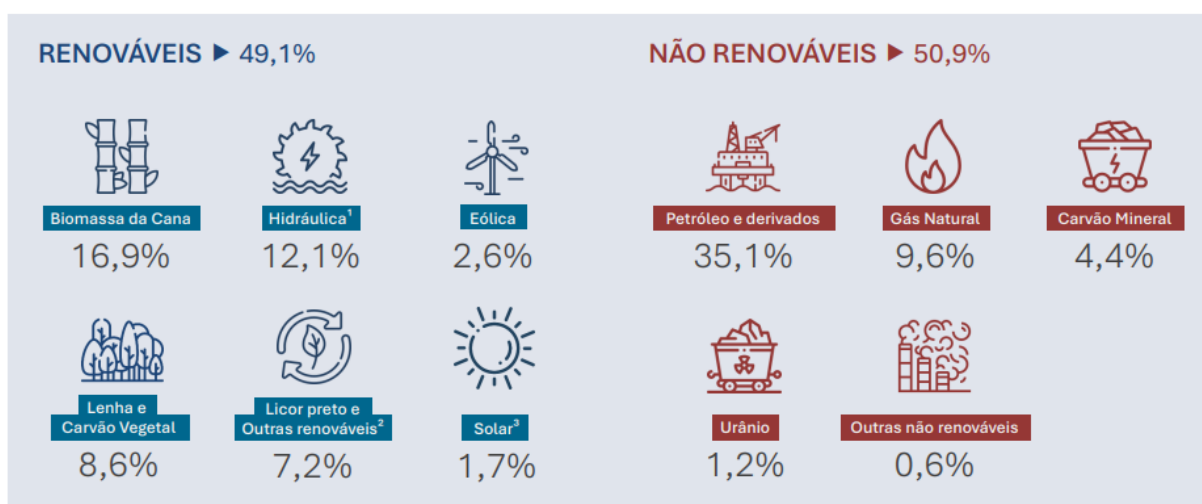
No futuro, à medida que avançamos para o uso de fontes renováveis de energia, surgem desafios significativos, especialmente no armazenamento dessa energia. A geração de energia é o primeiro passo crucial, pois a demanda continua a crescer. Existem várias opções para o armazenamento, como hidrelétricas de água bombeada, armazenamento de ar comprimido e baterias. Neste cenário, é pertinente considerar o papel do hidrogênio na produção e armazenamento de energia. O hidrogênio pode potencialmente substituir os métodos de armazenamento baseados em fontes não renováveis amplamente utilizados hoje (Schneiders, 2023).

O entendimento de Borges (2022) enfatiza a importância da transição energética global e a descarbonização da economia como fatores cruciais para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover um consumo sustentável. O hidrogênio verde é apresentado como uma alternativa viável por ser um combustível completamente sustentável, sem emissões poluentes na produção ou combustão. Ele é destacado pela sua versatilidade, podendo ser armazenado e utilizado para gerar eletricidade ou produzir combustíveis sintéticos.

Países com abundantes recursos de energias renováveis, como o Brasil, destacam-se como protagonistas no novo cenário energético global. A capacidade de liderar a produção de hidrogênio verde coloca o Brasil em uma posição estratégica para assumir a liderança na transição para uma economia de baixo carbono. Com sua vasta disponibilidade de energia solar, eólica e hídrica, o Brasil tem o potencial de se tornar um dos principais fornecedores de hidrogênio verde, contribuindo significativamente para a descarbonização global e para a segurança energética (Benvindo, 2024).

A Figura 2.2 apresenta a distribuição das diferentes fontes de energia utilizadas no Brasil, onde a soma das fontes renováveis representa 49,1% da oferta interna de energia, destacando a importância da biomassa, das hidrelétricas e da geração eólica e solar.

Figura 2.2 – Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023.



Fonte: BEN (2024).

2.2 Hidrogênio verde como vetor energético

Diversos estudos (Lara e Richter, 2023; Falcone; Hiete; Sapiro 2021) apontam o hidrogênio verde, também conhecido como hidrogênio renovável, como o caminho certo para o futuro. Isso se deve à sua natureza inesgotável, sendo o elemento mais abundante no universo, e à sua capacidade de fornecer energia renovável sem emitir CO₂. A disponibilidade do hidrogênio se dá, predominantemente, na forma de moléculas covalentes, combinado com diversos outros elementos, como no caso da água (H₂O) e dos hidrocarbonetos, o que, ainda segundo autores, faz com que a produção de gás hidrogênio se torne cara, pois exige grandes quantidades de energia.

Com base nas considerações de Lara e Richter (2023), a origem do hidrogênio influencia em sua classificação de cores, segundo apresentado na Tabela 2.1, mesmo este sendo sempre incolor. Quando utilizado como transportador de energia, é classificado em diferentes tipos: hidrogênio cinza, produzido a partir de fontes fósseis sem captura de carbono; azul, produzido a partir de gás natural com captura de carbono; marrom/preto, turquesa e verde, produzido com eletrólise utilizando energia

renovável. No entanto, apenas o hidrogênio verde, produzido sem emissões de CO₂ através de energias renováveis, é considerado verdadeiramente sustentável, promovendo uma transição energética mais limpa e eficiente.

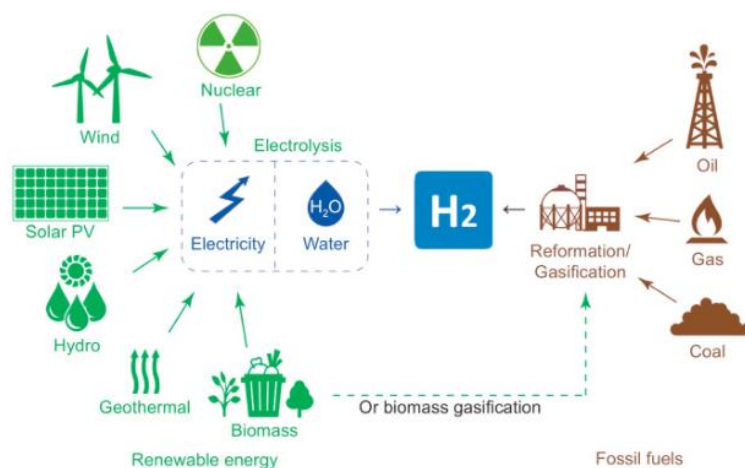
Tabela 2.1 – Classificação das cores do hidrogênio de acordo com a tecnologia de produção.

	Cor	Processo
Combustíveis fósseis	H ₂ (marrom)	Carvão → H ₂ ; processo de gaseificação, syngas, T=700 °C. Emissão direta de CO ₂
	H ₂ (cinza)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; reforma à vapor do metano
	H ₂ (azul)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; reforma à vapor do metano com captura e armazenamento de CO ₂
	H ₂ (turquesa)	Gás natural (CH ₄) → H ₂ ; pirólise de metano com produção de carbono sólido
Eletrólise	H ₂ (rosa)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água realizada através de energia nuclear
	H ₂ (amarelo)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água por fontes mistas (combustíveis fósseis e energia renovável)
	H ₂ (verde)	Hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água realizada através de fontes renováveis de energia
Alternativo	H ₂ (branco)	Ocorrência natural, rara na Terra.
		Divisão termoquímica da água produzida a partir de energia solar H ₂ produzido a partir do lixo, plástico ou biomassa

Fonte: Puga (2023), adaptado Germscheidt et al. (2021).

A pesquisa de Zhang et al. (2021) descreve as tecnologias utilizadas para a produção de hidrogênio na cadeia industrial da energia presentes na Figura 2.3, como a reforma de metano a vapor, gaseificação de biomassa ou carvão, eletrólise da água, fermentação microbiana, fotocatalise, e outros métodos de conversão, que podem ser adaptações ou combinações dos métodos citados anteriormente. Essas tecnologias variam em termos de eficiência, custo e impacto ambiental, com a eletrólise verde sendo a mais sustentável, mas atualmente mais cara, e a reforma de metano a vapor sendo a mais utilizada, mas com desafios ambientais devido às emissões de CO₂.

Figura 2.3 – Rota de produção do hidrogênio.



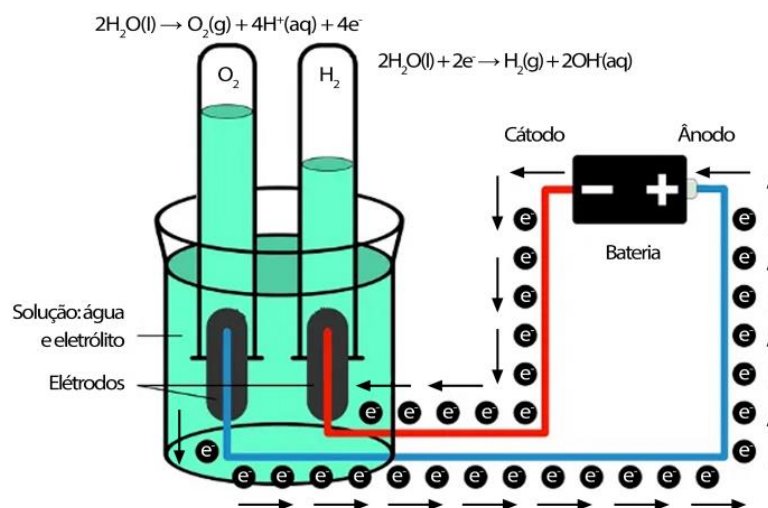
Fonte: Zhang et al. (2021).

Vianna (2024) relata que a produção de hidrogênio verde, um combustível limpo e renovável com potencial para revolucionar o setor energético, se baseia em uma tecnologia surpreendentemente antiga: a eletrólise da água. Essa técnica, que remonta aos experimentos pioneiros de Rudolph Deiman e Adriaan Paets van Troostswijk em 1789, vem se aperfeiçoando ao longo dos séculos, abrindo caminho para uma produção de hidrogênio com eficiência e pureza cada vez mais elevadas.

A eletrólise da água é essencialmente um processo de decomposição eletroquímica, onde a água (H_2O) é "quebrada" em seus elementos constituintes: hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) através da passagem de corrente elétrica contínua conforme a Equação 2.1. Essa corrente, ao fluir por um sistema eletroquímico específico, impulsiona as reações de oxidação e redução que separam os átomos de hidrogênio e oxigênio da molécula de água (Vianna, 2024), como se pode observar na Figura 2.4.



Figura 2.4 – Representação esquemática do processo de eletrólise.



Fonte: Gomes (2022).

Os íons H^+ e OH^- são gerados pela quebra das ligações covalentes entre hidrogênio e oxigênio na molécula de água, como mostrado na Equação 2.2. O cátion H^+ é descarregado no polo negativo (cátodo), onde ocorre uma reação de redução que produz H_2 , conforme a Equação 2.3. Por outro lado, o ânion OH^- é descarregado

no polo positivo (ânodo), resultando em uma reação de oxidação que produz O_2 , conforme a Equação 2.4. Dessa forma, o H_2 se acumula no cátodo e o O_2 no ânodo, e a Equação 2.5 caracteriza a reação global da eletrólise da água (Silva, 2016).



Conforme Sousa (2022), a produção de hidrogênio verde, um combustível renovável e promissor para o futuro energético, se destaca por sua natureza limpa e sustentável. Essa jornada começa com a decomposição da água, impulsionada por eletricidade proveniente de fontes renováveis como a energia solar, eólica, maremotriz e geotérmica. O processo da decomposição da água acontece em dispositivos chamados eletrolisadores. Esses equipamentos são classificados de acordo com o tipo de eletrólito utilizado, cada um com suas características e aplicações:

- Eletrolisadores Alcalinos: Uma tecnologia madura e robusta, com custos relativamente baixos. Utilizam soluções de hidróxido de sódio (NaOH) como eletrólito, operando em temperaturas entre 60°C e 90°C.
- Eletrolisadores de Membrana de Troca de Prótons (PEM): Altamente eficientes e compactos, ideais para aplicações de baixa a média potência. Empregam membranas de polímero que permitem a passagem de prótons, enquanto bloqueiam os elétrons, operando em temperaturas entre 50°C e 80°C.
- Eletrolisadores de Óxidos Sólidos (SOE): Uma tecnologia emergente com grande potencial, operando em altas temperaturas (acima de 800°C). Permitem a utilização direta do vapor d'água como fonte de alimentação, integrando-se com processos industriais que geram calor residual.

O hidrogênio apresenta desafios únicos em seu armazenamento e transporte devido à sua baixa densidade energética. Em condições ambientes, 1 kg de hidrogênio ocupa um volume 11 vezes maior que o mesmo volume de água, o que impacta significativamente a logística. Para otimizar o armazenamento e o transporte,

diversas técnicas são empregadas, como a compressão a altas pressões, a liquefação a temperaturas criogênicas e o armazenamento em materiais porosos ou em forma de compostos químicos. Essas técnicas visam aumentar a densidade energética do hidrogênio, reduzindo o volume necessário para armazenar uma determinada quantidade de energia (Costa et al, 2023).

O armazenamento de hidrogênio em cilindros de alta pressão é a metodologia mais comumente empregada na indústria, com pressões típicas variando entre 200 e 700 bar. Essa pressurização resulta em uma densidade volumétrica considerável, alcançando valores entre 36 e 39 kg/m³, otimizando a utilização do espaço de armazenamento. A fim de maximizar a capacidade dos cilindros, estes são projetados com espessuras mínimas, porém compatíveis com os requisitos de segurança. No entanto, a alta pressão interna impõe desafios significativos à fabricação, inspeção e manuseio dos cilindros, exigindo materiais de alta resistência e rigorosos protocolos de segurança, especialmente em áreas densamente povoadas (Ferreira, 2022; Züttel, 2004; Yartys; Lototsky, 2004).

O armazenamento de hidrogênio em estado líquido é uma solução viável para grandes volumes, porém exige condições extremas. A liquefação do hidrogênio requer temperaturas criogênicas, próximas a -253°C (20 Kelvin), o que resulta em uma densidade energética elevada. No entanto, o alto consumo energético associado ao processo de liquefação, que consome cerca de 40% da energia contida no hidrogênio, representa um desafio significativo. Além disso, a infraestrutura necessária para manter essas baixas temperaturas e garantir a segurança do armazenamento é complexa e onerosa (Cerutti, 2023; Ferreira, 2022; Leite, 2021).

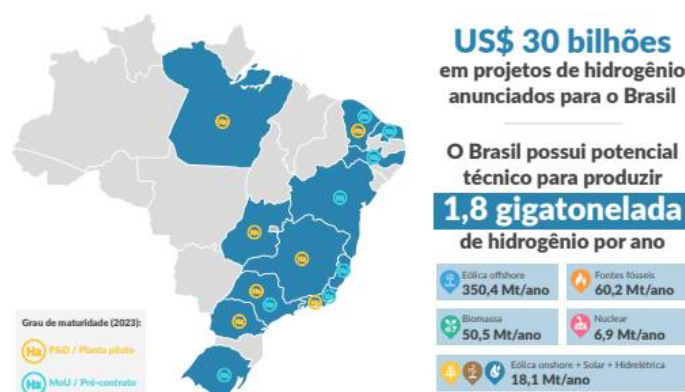
Os desafios associados ao armazenamento de hidrogênio em estado líquido, como as baixas temperaturas e o alto consumo energético, demandam investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento. Paralelamente, a exploração do potencial das fontes renováveis, como a solar e a eólica, é fundamental para garantir um futuro energético sustentável. A abundância dessas fontes oferece um horizonte promissor para a produção de hidrogênio verde e para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de armazenamento.

A irradiação solar que atinge a Terra equivale a cerca de 173.000 terawatts, uma quantidade de energia solar incidente que supera em 10.000 vezes o consumo energético global. Essa abundância sugere que o potencial de produção de energia renovável é praticamente ilimitado. Estimativas indicam que a instalação de painéis solares em 8% do deserto do Saara ou de turbinas eólicas em 1,5% do Oceano Pacífico seria suficiente para atender a demanda energética mundial (Veiga, 2022; Newborough, Cooley, 2020).

O potencial total de produção de hidrogênio no Brasil é bastante expressivo, podendo chegar a 1,8 gigatoneladas anuais, segundo o PDE 2031. Contudo, considerando apenas as tecnologias já comprovadas e economicamente viáveis em escala comercial, esse potencial se reduz para pouco mais de 480 milhões de toneladas por ano. A diferença se deve às tecnologias ainda em desenvolvimento, que demandam avanços tecnológicos para serem exploradas em larga escala (PNH2, 2023).

O hidrogênio verde tem um enorme potencial para ser uma fonte importante de energia elétrica nos próximos anos no Brasil, conforme é possível visualizar na Figura 2.5, contribuindo para suprir a crescente demanda por energia. Este potencial se destaca especialmente pela capacidade do hidrogênio verde de ajudar a mitigar as mudanças climáticas e, conseqüentemente, a equilibrar a temperatura global. A matriz elétrica brasileira, com seu alto percentual de fontes renováveis, beneficia-se da abundância de recursos naturais como sol, vento e água, facilitando a integração do hidrogênio verde no sistema energético do país (Souza, 2022).

Figura 2.5 – Potenciais projetos no Brasil.



Fonte: PNH2 (2023).

Em 2021, o Brasil testemunhou um significativo avanço nos projetos de hidrogênio verde, com diversos anúncios de iniciativas em escala industrial nos portos de Pecém (CE), Suape (PE) e Açú (RJ) (EPE/DEA/SEE, 2024). Esses projetos, presentes na Tabela 2.2, ainda em fase de estudos de viabilidade, concentram investimentos superiores a US\$ 27 bilhões. A escolha desses locais estratégicos, com logística para exportação, proximidade de polos industriais e acesso a fontes renováveis, demonstra a vocação do país para liderar a produção e exportação de hidrogênio verde (Oliveira, 2022).

Tabela 2.2 – Projetos e investimentos confirmados no Brasil em H2V.

Pais	Empresa	Valores Previstos (US\$)	Local de investimento
França	Qair	6,95 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Fortescue Future Industries	6 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Austrália	Enegix Energy	5,4 bilhões	Porto do Pecém, Ceará
Brasil	Casa dos Ventos e Nexway	4 bilhões	Piauí
França	Qair	3,8 bilhões	Porto de Suape, Pernambuco
Austrália	Fortescue	3,2 bilhões	Porto do Açú, Rio de Janeiro
Holanda	Transhydrogen Alliance	2 bilhões	Porto do Pecém, Ceará

Fonte: Oliveira (2022).

A EPE disponibiliza um mapa interativo apresentado na Figura 2.6, que oferece uma visão abrangente do potencial brasileiro para a produção de hidrogênio verde. A ferramenta permite explorar detalhadamente a distribuição geográfica das fontes renováveis, a localização de projetos em andamento e a infraestrutura portuária e de óleo e gás existente, elementos cruciais para o desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio verde no país.

Figura 2.6 - Potencial de Produção de Hidrogênio renovável no Brasil.



Fonte: EPE/DEA/SEE (2024).

Contudo, existem barreiras que dificultam o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil. Marques (2023), elenca três desafios essenciais que complicam a criação de uma estratégia pública eficaz no Brasil para promover o papel do hidrogênio verde nesse cenário transformador. O primeiro consiste na falta de consenso entre os governos federal, estaduais e municipais, que gera uma lacuna na estratégia coletiva para integrar o hidrogênio verde à matriz energética do país; a escassez de recursos financeiros se mostra como um segundo obstáculo significativo para a expansão da infraestrutura de produção, distribuição e pesquisa relacionada ao hidrogênio verde; e o terceiro é caracterizado pela falta de informação e conscientização sobre as oportunidades oferecidas pelo hidrogênio verde, fazendo com que muitos setores produtivos e membros da sociedade desconheçam os benefícios econômicos e ambientais dessa tecnologia.

O alto custo associado à produção, transporte e armazenamento do hidrogênio verde também representa um desafio significativo. Atualmente, os custos envolvidos na produção de hidrogênio verde são consideravelmente elevados, o que limita sua viabilidade econômica em comparação com outras fontes de energia mais tradicionais. Essa questão econômica pode dificultar a adoção em larga escala do hidrogênio verde como uma solução energética viável e competitiva (Souza, 2022).

2.3 Políticas Energéticas Nacionais

O crescimento das energias renováveis enfrenta desafios econômicos significativos. Uma das principais barreiras econômicas ocorre quando o custo de tecnologias alternativas (solar, eólica e biomassa) é superior ao das tecnologias concorrentes tradicionais (usinas termoeletricas, hidrelétricas e nucleares).

O Brasil possui um conjunto de políticas energéticas cuidadosamente estruturadas, com o objetivo principal de garantir a segurança energética do país. Através de uma série de planos e programas, o governo busca assegurar que a oferta de energia acompanhe o ritmo do crescimento econômico e do desenvolvimento social, sem ocasionar interrupções ou deficiências significativas no abastecimento (MME, 2021).

2.3.1 Plano Nacional de Energia (PNE) e Plano Decenal de Energia (PDE)

Nos anos 1990, o Brasil enfrentou um período de desestruturação na capacidade de planejamento do setor elétrico devido às reformas liberais da época. Entretanto, essa capacidade foi restabelecida em 2004 com a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). A partir de então, a EPE assumiu um papel crucial na realização de estudos e na formulação de estratégias de planejamento para o setor energético, contribuindo significativamente para a retomada do desenvolvimento estruturado e sustentável da matriz energética nacional (Castro *et al.*, 2012).

Entre os diversos estudos desenvolvidos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), uma estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), destacam-se dois planos fundamentais: o Plano Nacional de Energia (PNE) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE).

Um dos principais instrumentos de planejamento da política energética no Brasil são os Planos Decenais de Expansão de Energia (PDEs). Esses planos abrangem um horizonte de 10 anos e são fundamentais para orientar o desenvolvimento e a expansão da infraestrutura energética do país, garantindo a segurança, a eficiência e a sustentabilidade da matriz energética nacional (Barreto *et al.*, 2023). No contexto do setor de energia elétrica, o PDE especifica os projetos de geração e transmissão que devem ser implementados ao longo dos próximos dez anos para atender às projeções de crescimento da demanda. Este plano inclui cronogramas detalhados de implementação e estimativas de investimento (Castro *et al.*, 2012).

Castro *et al.* (2012) ainda ressalta que dado que o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é publicado anualmente, na ausência de mudanças significativas nas premissas do planejamento energético, a contratação de energia tende a convergir para a "matriz estratégica". Esta matriz é definida pela EPE como a projeção desejada para o final do período de dez anos em análise. Portanto, a questão mais relevante reside nos mecanismos que garantem que a energia contratada por meio de leilões seja compatível e convergente com a matriz elétrica estratégica proposta pelo PDE.

O capítulo dedicado ao hidrogênio PDE 2031 representa um avanço significativo na discussão sobre o papel desse elemento na matriz energética brasileira. Ao abordar a cadeia produtiva, os usos e as emissões associadas às diferentes rotas tecnológicas, o documento oferece uma visão abrangente e detalhada sobre o potencial do hidrogênio no país.

O Brasil possui uma trajetória de quase duas décadas em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para produção de hidrogênio, com foco em diversas fontes como renováveis (etanol, hidrelétrica, eólica, solar e biometano) e gás natural. O país já implementou projetos-piloto em diversas áreas, como transporte, geração de energia e armazenamento, e atraiu o interesse de grandes empresas e startups.

O Brasil iniciou seus investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para hidrogênio em 2002, com o lançamento do Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Células a Combustível (PROCaC). Em 2005, o programa foi renomeado para Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (PROH2) e, no mesmo ano, foi elaborado o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil”.

Como resultado desses esforços, o país foi pioneiro na América Latina em desenvolver uma frota de ônibus movidos a hidrogênio, com um projeto piloto bem-sucedido em São Paulo. Entre 2005 e 2015, foram projetados, construídos e operados um protótipo e três ônibus em um corredor metropolitano (Figura 4.6). Essa iniciativa, que contou com a participação de diversas instituições como MME, EMTU/SP, PNUD e ABC/MRE, e o apoio financeiro do GEF e da FINEP, permitiu ao país adquirir conhecimento técnico e prático na área de mobilidade sustentável, além de demonstrar a viabilidade da tecnologia de células a combustível em condições reais de operação.

Figura 2.7 – Ônibus movido a célula de hidrogênio desenvolvido pela Coppe.



Fonte: Finep (2024).

Em 2010, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a pedido do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), realizou um estudo aprofundado sobre a viabilidade da economia do hidrogênio no Brasil, identificando os principais desafios e oportunidades. Esse estudo serviu como base para o desenvolvimento de políticas públicas e investimentos no setor. Em 2018, o MCTI lançou um plano estratégico que incluiu ações para incentivar a pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias de armazenamento de energia, com destaque para as células a combustível, e a produção de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis.

Apesar dos recentes avanços e do crescente interesse em desenvolver a indústria de hidrogênio no Brasil, a busca por um equilíbrio entre incentivos e competitividade permanece como um desafio. Enquanto o governo demonstra um compromisso com o setor, aumentando os investimentos em P&D e priorizando projetos demonstrativos, é fundamental garantir que esses incentivos não distorçam a competição e a alocação eficiente de recursos. A remoção de barreiras regulatórias e a criação de um ambiente favorável aos investimentos privados são cruciais para atrair capital e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono.

Em 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) estabeleceu um marco importante para o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil, com a Resolução nº 2/2021. Essa resolução orientou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a direcionar recursos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para o hidrogênio, demonstrando o compromisso do governo em fomentar a inovação nesse setor.

Além disso, a proposta de elaboração do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), em abril do mesmo ano, consolidou a visão estratégica do país em relação ao tema. Para garantir o sucesso dessa iniciativa, é fundamental que o Brasil continue avançando na consolidação do seu arcabouço legal e regulatório, criando um ambiente de negócios atrativo para investimentos privados, tanto nacionais quanto internacionais.

Em paralelo aos avanços internos, o Brasil intensificou a cooperação internacional, especialmente com a Alemanha. Em 2021, o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) engajaram-se em diversas iniciativas conjuntas, com destaque para o programa "H2 Brasil" e as Forças-Tarefa de produção, logística e aplicação do hidrogênio verde. O programa "H2 Brasil" destinou 34 milhões de euros para fortalecer o ecossistema do hidrogênio verde no país, investindo em melhorias regulatórias, capacitação de profissionais, pesquisa e desenvolvimento, e expansão do mercado. As Forças-Tarefa, por sua vez, reúnem empresas e instituições para compartilhar conhecimento e promover projetos que impulsionem o desenvolvimento do setor.

A demanda mundial por hidrogênio puro, que em 2018 já era de 73 milhões de toneladas, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), está projetada para crescer significativamente nas próximas décadas, com estimativas que variam entre 200 e 500 milhões de toneladas em 2050, impulsionada pela crescente eletrificação do transporte, pela produção de aço verde e pela utilização em processos industriais.

O hidrogênio, por muito tempo visto como um mero intermediário em processos industriais, tem ganhado crescente destaque no cenário energético global. No Brasil, sua utilização está concentrada principalmente nos setores de refino de petróleo e produção de fertilizantes, representando cerca de 87% da demanda total.

Em 2010, a demanda por hidrogênio no país atingiu aproximadamente 1 milhão de toneladas, sendo distribuída da seguinte forma: 50% para fertilizantes, 37% para refino, 8% para a indústria química e 4% para metalurgia e alimentos. Quase a totalidade desse hidrogênio (95%) era produzida a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural.

A produção nacional de hidrogênio puro, em 2020, foi estimada em 325 mil toneladas, sendo as refinarias as principais responsáveis. Embora o refino de petróleo seja um importante consumidor de hidrogênio, utilizado principalmente em processos de hidrotreatamento para a produção de combustíveis com menor teor de enxofre, o volume produzido é destinado ao consumo interno das refinarias.

A Petrobras, como principal agente do refino brasileiro, possui planos ambiciosos para aumentar a produção de diesel com baixíssimo teor de enxofre (10 ppm) até 2026. Essa meta exigirá um aumento significativo no consumo de hidrogênio nas refinarias, com projeções indicando uma demanda de cerca de 375 mil toneladas em 2031.

A produção de hidrogênio verde no Brasil apresenta um grande potencial para descarbonizar a economia e gerar novos negócios. No entanto, os custos de produção ainda são elevados, como demonstra um estudo recente da GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* - Agência Alemã de Cooperação Internacional) e Tractebel *Engineering GmbH* para a EPE e o MME. Os resultados da pesquisa indicam que o custo do hidrogênio verde no país pode variar entre US\$ 2,19 e US\$ 5,19 \$/kg. Para tornar o hidrogênio verde mais competitivo, é fundamental implementar medidas para reduzir os custos de produção, como a otimização dos processos, a utilização de fontes de energia renovável mais baratas e a criação de incentivos fiscais.

O hidrogênio verde, por ser renovável e livre de carbono, será fundamental para a transição energética. Ele poderá: 1) Descarbonizar setores como o transporte pesado (caminhões, trens, navios), a aviação e a indústria (fertilizantes, siderurgia, cimento), que enfrentam grandes desafios na redução de emissões; 2) Facilitar o armazenamento de energia proveniente de fontes renováveis intermitentes, como a eólica e a solar; e 3) Promover a integração entre os mercados elétrico, de transporte e industrial, otimizando a utilização de energia e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

2.3.2 Plano Nacional de Energia (PNE)

Em resposta à crise energética que atingiu o Brasil nos finais dos anos 1990 e início dos anos 2000, foi lançado em 2007 o primeiro Plano Nacional de Energia (PNE), com um horizonte estratégico estendido até 2030. Este plano inovador adotou uma abordagem integrada, envolvendo a participação da sociedade para abordar questões energéticas críticas. Embora tenha priorizado o aumento da eficiência energética e considerado preocupações socioambientais, o PNE inicialmente adotou uma postura conservadora frente ao cenário de crescimento da demanda, focando predominantemente em fontes tradicionais como hidráulica, petróleo, gás natural e cana-de-açúcar (Claudino, 2020).

O Plano Nacional de Energia (PNE) consiste em uma série de estudos que visam fornecer subsídios para a formulação de políticas energéticas, integrando diversas fontes de recursos disponíveis (Nunes, 2016). Seus principais objetivos incluem estabelecer estratégias de longo prazo para a expansão do sistema energético nacional, alinhadas com as diretrizes da Matriz Energética Nacional (MEN). Isso envolve a definição e análise de cenários de demanda energética, recursos disponíveis no país, possibilidades de importação, opções de gerenciamento da demanda, avanços tecnológicos na oferta e consumo de energia, além de considerações ambientais como condicionantes essenciais (Santos, 2009).

3 METODOLOGIA

Nesta seção, será delineada a abordagem metodológica utilizada para a realização da pesquisa exploratória, que tem como objetivo comparar os documentos do Plano Nacional de Energia (PNE) e do Plano Decenal de Energia (PDE). A escolha por uma pesquisa exploratória se justifica pela necessidade de investigar e compreender inicialmente as características, conteúdos e diretrizes presentes nos referidos documentos, visando identificar semelhanças e diferenças entre eles.

Para a coleta de dados, serão utilizados os documentos oficiais do PNE 2050, os relatórios finais dos PDEs 2030 e 2031, e os cadernos de estudos dos PDEs 2032 e 2034, disponíveis nos portais eletrônicos do Ministério de Minas e Energia do Brasil. Frisa-se o fato de que o PDE 2033 não será considerado para estudo, uma vez que sua divulgação não foi realizada.

Ademais, serão consideradas publicações acadêmicas e técnicas pertinentes ao tema para embasar a análise comparativa. É crucial destacar que esta pesquisa exploratória apresenta algumas limitações, incluindo a dependência da disponibilidade e qualidade dos dados nos documentos analisados, além da extensão temporal e geográfica das políticas energéticas consideradas.

A análise comparativa será fundamentada em seis aspectos principais abordados nos planos:

- Abordagem do hidrogênio nos planos;
- Objetivos e metas;
- Integração aos planos de expansão;
- Políticas e estratégias;
- Desafios e oportunidades;
- Pontos de falhas/lacunas.

Os resultados da análise comparativa serão interpretados à luz dos objetivos da pesquisa, permitindo a identificação de semelhanças, diferenças e lacunas nos planos de energia analisados. Essa interpretação fornecerá *insights* sobre as

estratégias adotadas pelo governo brasileiro para o setor energético e poderá indicar possíveis áreas de melhoria ou ajustes nas políticas energéticas vigentes.

É fundamental reforçar que os documentos analisados são de acesso público e estão disponíveis online, não sendo necessário obter autorização prévia para utilizá-los na pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados e discussões segue uma estrutura em funil, conforme mostrado na Figura 4.1, iniciando com uma visão geral dos Planos Nacional de Energia (PNE) e Decenais de Expansão de Energia (PDE), descrevendo a metodologia utilizada e as projeções de demanda energética para os próximos anos. Em seguida, são analisadas as abordagens específicas de cada plano em relação ao hidrogênio verde, com foco nas políticas de incentivo, nas metas estabelecidas e nas tecnologias priorizadas. A análise detalhada é realizada com base nos tópicos definidos na metodologia, permitindo uma avaliação crítica das propostas apresentadas e a identificação de oportunidades e desafios para o desenvolvimento do setor de hidrogênio no Brasil.

Figura 4.1 – Estrutura do capítulo.



Fonte: Elaboração própria.

4.1 Visão Geral do PNE

O Plano Nacional de Energia (PNE) utiliza a ferramenta de cenários para simular diferentes futuros possíveis para o setor energético. Essa abordagem permite uma análise mais aprofundada das incertezas e desafios que o setor pode enfrentar, auxiliando na tomada de decisões estratégicas. Os cenários são construídos a partir de diferentes hipóteses sobre o futuro, considerando fatores como:

- Demanda energética: Projeções de crescimento da população e mudanças nos padrões de consumo de energia.
- Tecnologia: Avanços tecnológicos na geração, transmissão, distribuição e armazenamento de energia.
- Política energética: Mudanças nas regulamentações e incentivos governamentais.
- Contexto econômico: Cenários macroeconômicos que influenciam os investimentos e a competitividade do setor.

Com base nesses cenários, o PNE define quatro grandes objetivos estratégicos:

1. Segurança energética: Garantir o abastecimento contínuo e confiável de energia para a população e a economia;
2. Sustentabilidade: Promover o uso de fontes renováveis de energia e reduzir os impactos ambientais do setor;
3. Acesso universal à energia: Expandir o acesso à energia elétrica para todas as regiões do país, reduzindo as desigualdades sociais;
4. Retorno adequado aos investimentos: Assegurar a viabilidade econômica dos investimentos no setor energético.

Os cenários projetados pelo PNE permitem visualizar diferentes futuros para o setor energético. Um cenário de alta demanda implica em grandes investimentos em novas fontes de geração para atender ao crescimento da demanda. Por outro lado, um cenário de demanda estável propicia uma transição energética mais gradual, com foco em eficiência energética e fontes renováveis. Ao analisar esses cenários, o PNE pode identificar as oportunidades e desafios que o setor energético pode enfrentar no futuro, e definir as políticas e medidas necessárias para alcançar os seus objetivos estratégicos.

O número de cenários a serem analisados em um plano de longo prazo varia de acordo com a complexidade das questões estratégicas. O conjunto de cenários deve ser diversificado o suficiente para representar diferentes trajetórias futuras e permitir a elaboração de uma estratégia robusta, capaz de lidar com incertezas e aproveitar oportunidades. Neste contexto, dois cenários-chave podem ser

considerados: o de expansão, que pressupõe um crescimento significativo da demanda por energia, e o de estagnação, que considera um cenário de demanda mais estável. A escolha entre esses cenários e a definição de cenários intermediários dependerá das especificidades do setor e das incertezas associadas ao futuro.

4.2 Visão geral do PDE

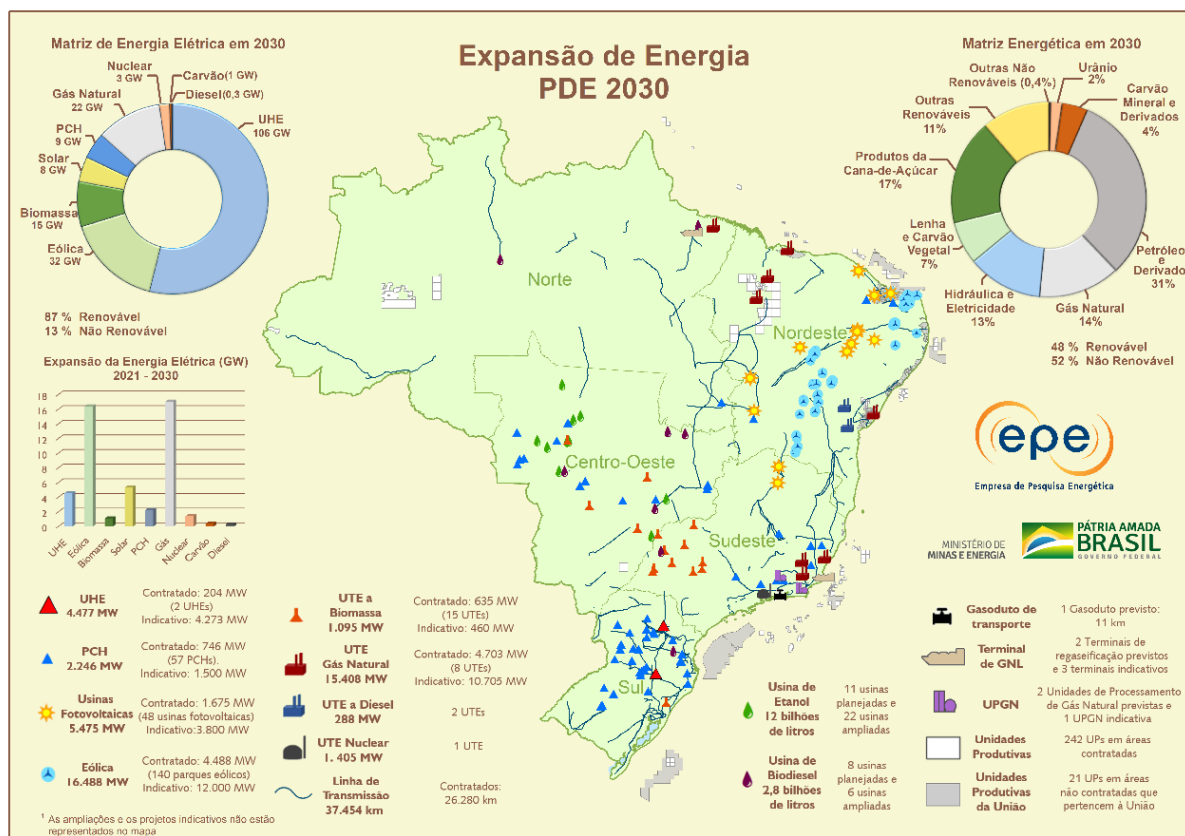
Através do Modelo de Decisão de Investimentos (MDI), o PDE realiza uma análise aprofundada das opções de expansão do setor elétrico, considerando tecnologias convencionais e renováveis, bem como diferentes cenários de demanda e oferta de energia.

Sua elaboração considera as inter-relações entre as dimensões econômica, estratégica e socioambiental do planejamento energético. Na dimensão econômica, o PDE busca garantir o suprimento energético necessário para o desenvolvimento econômico do país, visando aumentar a competitividade da economia nacional. Na dimensão estratégica, o PDE enfatiza a otimização dos recursos energéticos nacionais, com foco na integração regional e na visão de longo prazo. Por fim, na dimensão socioambiental, o PDE busca garantir o acesso universal à energia e a mitigação dos impactos ambientais associados à expansão do setor elétrico.

4.2.1 PDE 2030

O PDE 2030, cujo mapa síntese é apresentado na Figura 4.2, emprega uma metodologia sofisticada, composta por três modelos computacionais interligados: o MDI, fundamentado em Gandelman (2015), o NEWAVE e o Balanço de Potência. Esse conjunto permite uma análise aprofundada e abrangente do sistema elétrico, desde a tomada de decisões de investimento até a simulação da operação do sistema em diversos cenários, garantindo um planejamento energético mais preciso e robusto.

Figura 4.2 - Mapa síntese do PDE 2030.

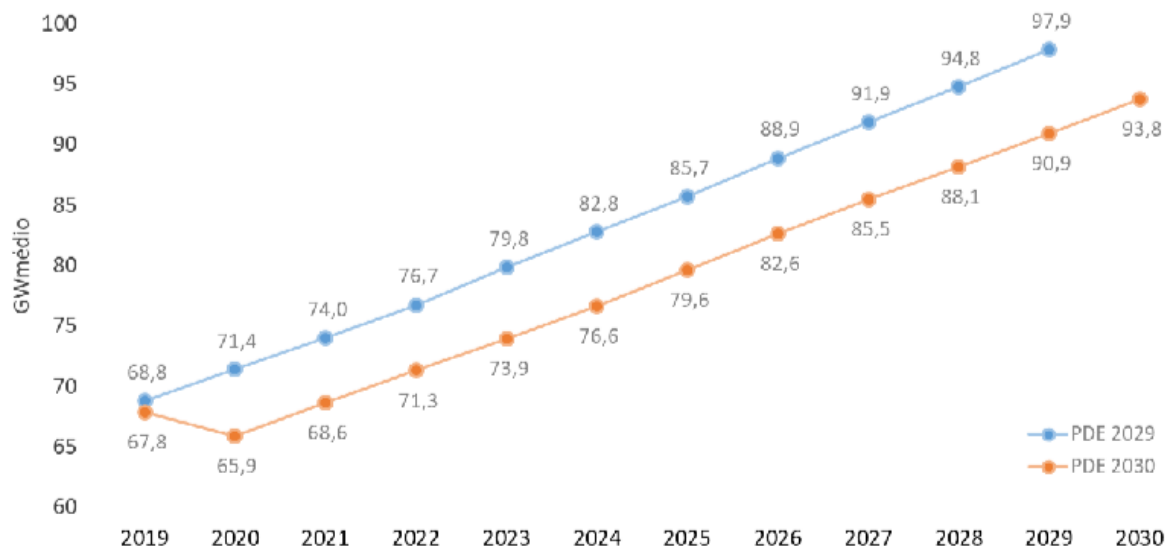


Fonte: EPE (2021).

A trajetória das perdas no sistema elétrico está intrinsecamente ligada às flutuações do cenário econômico. A desaceleração econômica pós-pandemia dificultou a alocação de recursos para a redução de perdas, resultando em um progresso mais lento nesse indicador.

Paralelamente, a demanda de energia elétrica apresentou um comportamento divergente da projeção inicial. Em 2019, a demanda ficou 1 GW médio abaixo do previsto pelo PDE 2029, conforme a Figura 4.3, e essa diferença se ampliou consideravelmente até 2029, atingindo um déficit de 7 GW médio em relação à projeção inicial. Essa discrepância pode ser atribuída a diversos fatores, como a desaceleração econômica, a maior eficiência energética, mudanças climáticas e a adoção de novas tecnologias.

Figura 4.3 - PDE 2030 x PDE 2029: Comparação entre previsões de carga de energia no SIN.



Fonte: EPE (2021).

O PDE 2030 destaca a importância das tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Essas tecnologias, associadas ao desenvolvimento de fontes renováveis e à produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água utilizando energia renovável, podem contribuir significativamente para a descarbonização da matriz energética brasileira e aumentar a flexibilidade do sistema elétrico.

O documento reforça que a construção de Planos de Ação Tecnológica (TAPs) para setores prioritários, como energia, indústria, transporte e agricultura, representa um passo fundamental para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras de baixo carbono no Brasil. Os TAPs permitem definir prioridades, mobilizar recursos, criar parcerias e fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias CCS e CCUS, acelerando a sua implementação e contribuindo para o cumprimento das metas do Acordo de Paris.

Uma das principais dificuldades para controlar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor energético é a falta de um mecanismo que reflita os custos ambientais associados à produção de energia. A precificação de carbono, ao internalizar esses custos, incentiva a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes.

Diversos instrumentos de precificação de carbono estão sendo analisados globalmente, como sistemas de *cap-and-trade* ('Teto e Comércio', que é um sistema de regulamentação de emissões de gases de efeito estufa), impostos sobre o carbono

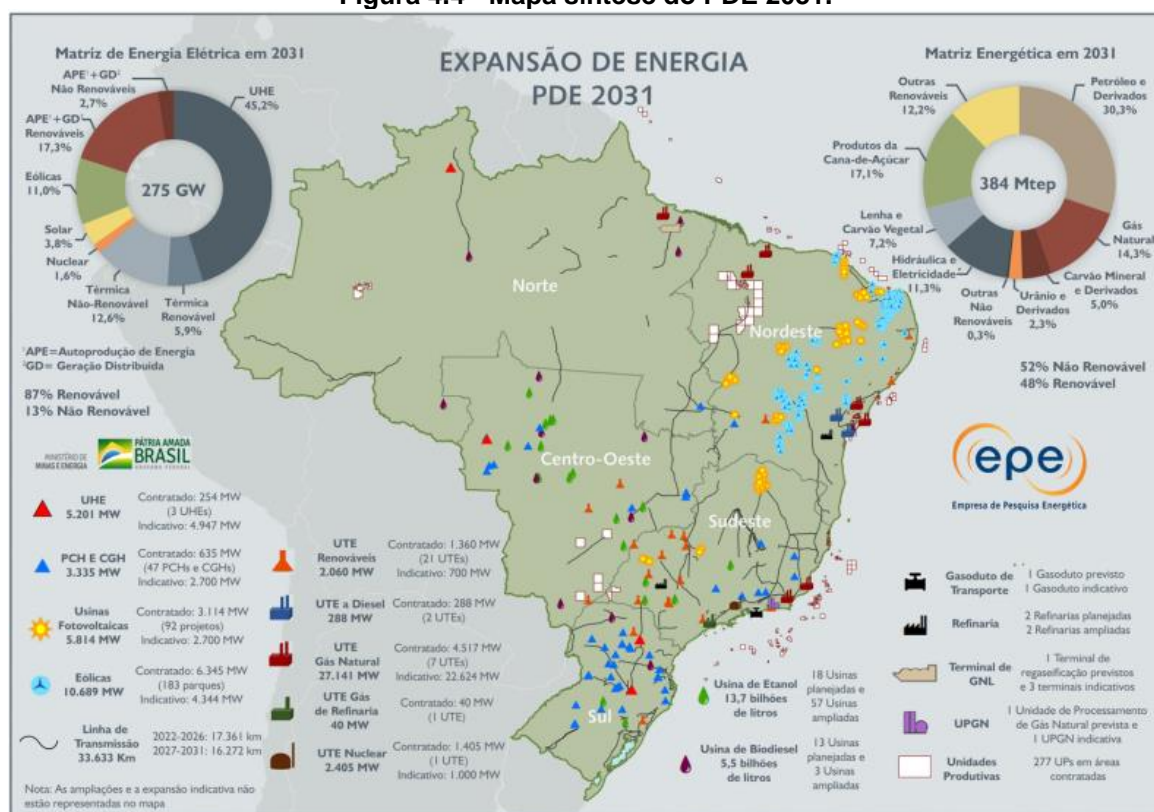
e mecanismos de compensação. No Brasil, o projeto de parceria para a preparação de mercados (PMR Brasil) desempenhou um papel fundamental ao avaliar as diferentes alternativas de precificação de carbono e contribuir para a implementação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

Para o setor elétrico, a MP 998/2020 abriu caminho para a consideração dos benefícios ambientais associados à baixa emissão de GEE, como a redução da poluição do ar e a mitigação das mudanças climáticas. A precificação de carbono nesse setor pode estimular a geração de energia a partir de fontes renováveis e a adoção de tecnologias de eficiência energética.

4.2.2 PDE 2031

O PDE 2031, apresentado na Figura 4.4, traça um cenário ambicioso para o setor elétrico brasileiro, prevendo um aumento de mais de 100 GW na capacidade instalada até 2031. A expansão das fontes renováveis, como eólica e solar, será o grande destaque, com projeção de participação de 87% na matriz elétrica. Essa transição energética trará diversos benefícios, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação da matriz energética e a criação de novos empregos. Para alcançar esses objetivos, o plano prevê uma série de medidas, incluindo leilões de energia renovável e investimentos em infraestrutura de transmissão, que estimularão a participação de novos agentes no mercado e a modernização do setor (Cerutti, 2023).

Figura 4.4 - Mapa síntese do PDE 2031.



Fonte: EPE (2022).

Considerando o horizonte de dez anos entre 2021 e 2031, o Produto Interno Bruto (PIB) apresenta um crescimento médio anual de 3,2% nos primeiros cinco anos. Paralelamente, o consumo de energia elétrica demonstra um ritmo de expansão mais acelerado, com crescimento médio anual de 3,5% no mesmo período. Essa dinâmica é explicada pela elasticidade-renda, que indica como a demanda por energia varia em resposta a mudanças na renda dos consumidores, de 1,26, que reflete a forte correlação entre o crescimento econômico e o aumento do consumo de eletricidade, impulsionado pela retomada gradual da atividade industrial¹.

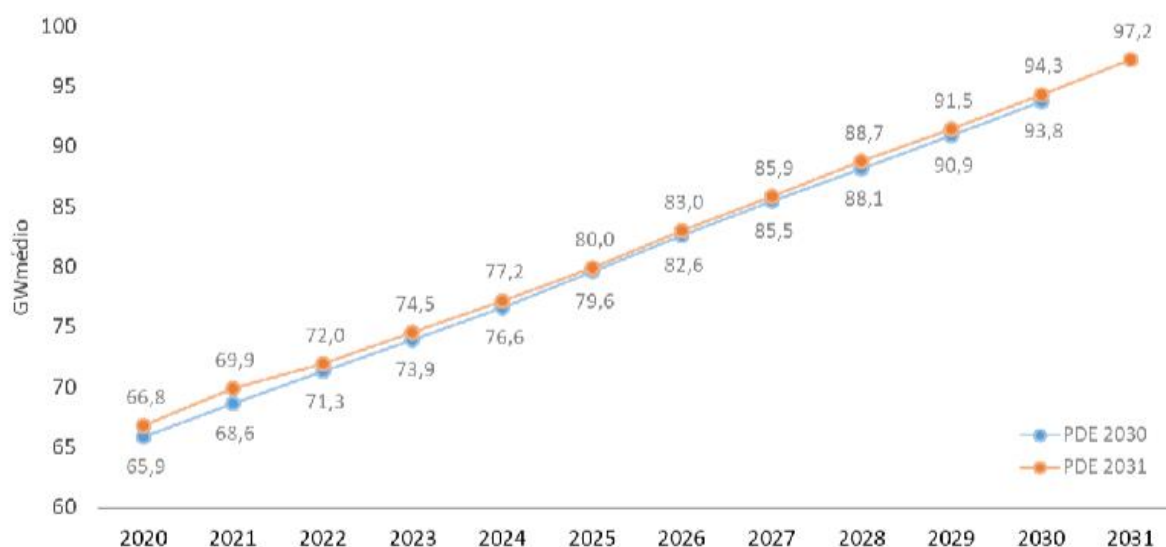
Importante salientar que, à medida que a renda aumenta, a demanda por eletricidade aumenta em uma proporção maior em decorrência do crescimento da economia. Para o primeiro quinquênio, nota-se um crescimento de 1,26% na demanda em razão do aumento de 1% na renda. No segundo quinquênio, a elasticidade-renda diminui para 1,14, indicando uma menor sensibilidade do consumo de eletricidade em relação ao crescimento do PIB.

¹ Após o forte impacto da COVID-19, foi esperado que o consumo se recuperasse em 2023, atingindo os níveis pré-pandemia, impulsionado pela redução da vacância comercial e industrial.

Essa redução é atribuída à diversificação da matriz de consumo, com maior peso de setores menos eletrointensivos na expansão da economia. Apesar dessa mudança, o crescimento médio anual do consumo de eletricidade se mantém em 3,5% ao longo de todo o horizonte projetado.

No horizonte em análise, o PDE 2031 aponta uma reconfiguração da participação dos subsistemas na carga total do Sistema Interligado Nacional (SIN), com redução da parcela do Sudeste/Centro-Oeste em detrimento do crescimento mais expressivo dos subsistemas Norte e Nordeste. A demanda de energia elétrica em 2021 superou em 1,3 GWmédios a previsão estabelecida no PDE 2030 conforme apresentado na Figura 4.5. Projeta-se que, mesmo em 2030, a carga total ainda será 0,5 GWmédios superior à previsão original do plano.

Figura 4.5 - PDE 2031 x PDE 2030: Comparação entre previsões de carga de energia no SIN.



Fonte: EPE (2022).

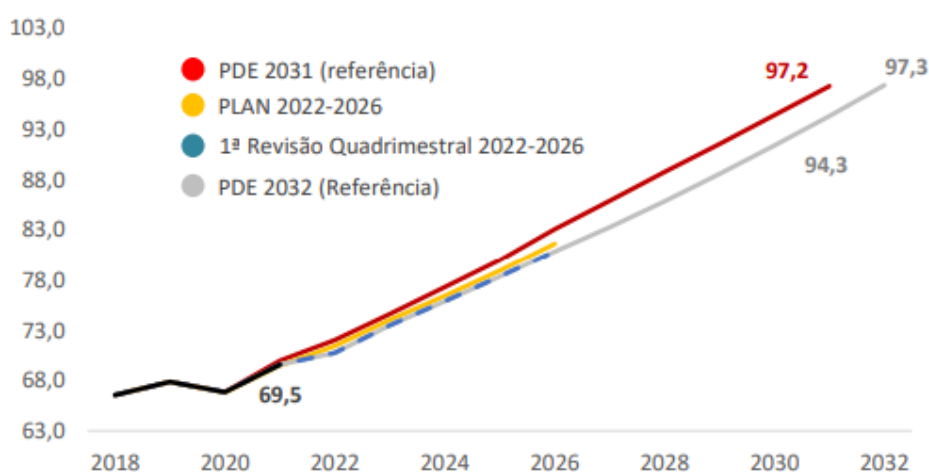
4.2.3 PDE 2032

O Caderno de Estudos da Demanda de Eletricidade da atualização do PDE 2032 apresenta uma curva de carga mais conservadora em relação ao plano anterior (PDE 2031), com uma demanda média projetada de 94,3 GW para 2032 (Figura 4.7). Essa revisão implica em um menor crescimento da demanda por energia elétrica e pode afetar os estudos de viabilidade de novos empreendimentos no setor.

Já o Caderno de Estudos do Abastecimento de Derivados de Petróleo projeta um aumento expressivo na geração de hidrogênio em refinarias de óleo diesel, passando de 360 mil toneladas em 2022 para 560 mil toneladas em 2032, representando um crescimento de 56,6%. Essa expansão abre novas perspectivas para o uso do hidrogênio não apenas no hidrorrefino, mas também em outras áreas como a produção de combustíveis mais limpos e a descarbonização de diversos processos industriais.

Figura 4.7 – SIN: Carga de energia (GWmédio) PDE 2032.

SIN – Carga de energia (GWmédio)
Por plano



Fonte: EPE (2022).

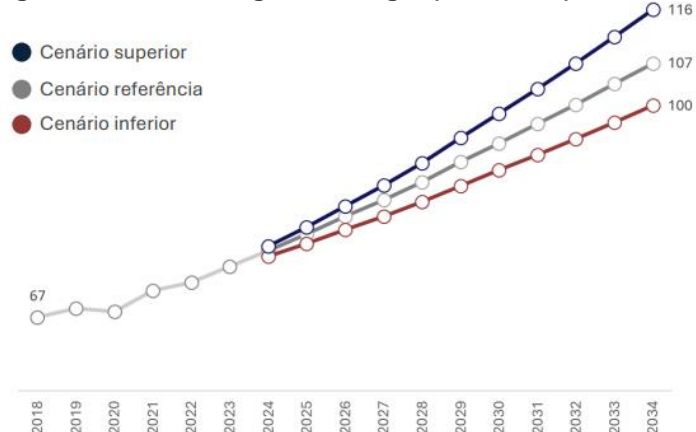
4.2.4 PDE 2034

O Caderno de Estudos da Demanda de Eletricidade do PDE 2034 emprega uma metodologia de análise de cenários para avaliar as futuras demandas do setor elétrico, considerando variáveis como crescimento econômico, mudanças climáticas e avanços tecnológicos. Ao projetar cenários superiores, inferiores e de referência, o plano permite identificar os principais desafios e oportunidades, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e na definição de políticas energéticas mais resilientes e sustentáveis.

No cenário de referência, a carga de energia deverá atingir 107 GWmédios em 2034, com um crescimento médio anual de 3,3%, de acordo com a Figura 4.8. Espera-se que essa expansão se intensifique na segunda metade da década, impulsionada

pela crescente demanda por eletricidade, especialmente nos setores industrial e residencial.

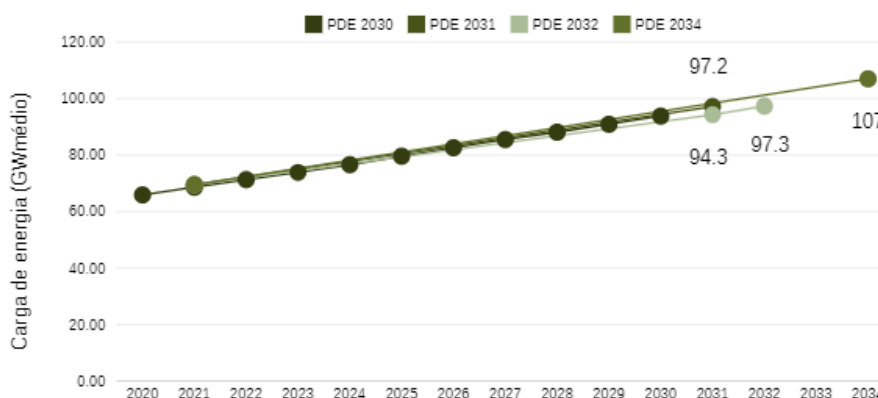
Figura 4.8 – SIN: Carga de energia (GWmédio), PDE 2034.



Fonte: EPE, 2024.

Os PDEs projetam um crescimento gradual da demanda de energia, vinculado ao crescimento do PIB. No entanto, as projeções para os próximos anos apresentam incertezas, especialmente em relação ao período entre 2031 e 2032, como é possível analisar na Figura 4.9. A queda na previsão de demanda para 2032, sem uma justificativa clara nos planos, indica a complexidade de modelar a demanda energética, que é influenciada por diversos fatores econômicos, sociais e tecnológicos. A partir de 2032, ainda de acordo com a Figura 4.9, observa-se uma retomada do crescimento, com uma taxa superior à média histórica, o que pode estar relacionado à entrada em operação de novas fontes de energia, como o hidrogênio verde.

Figura 4.9 - Evolução Projetada da Demanda de Energia no Brasil (2030-2034).



Fonte: Elaboração própria.

4.3 Análise Comparativa

4.3.1 Abordagem do Hidrogênio Verde nos planos

O PNE, ao reconhecer o potencial do hidrogênio verde, dá um importante passo para a transição energética do Brasil. Contudo, o plano ainda apresenta lacunas significativas, como a ausência de um marco regulatório específico para o setor de hidrogênio e a falta de detalhamento sobre os mecanismos de incentivo à sua produção e utilização. Além disso, embora a integração com as energias renováveis seja enfatizada, o PNE não aprofunda as sinergias e os desafios técnicos e econômicos dessa integração.

Entre os planos decenais analisados, o PDE 2031 é o que dedica maior atenção ao hidrogênio verde. O documento destaca o papel estratégico do hidrogênio verde na transição energética brasileira, alinhando-se às metas de descarbonização e diversificação da matriz energética. O plano também reconhece o potencial do hidrogênio verde para impulsionar a economia brasileira e posicioná-la como um player relevante no mercado global de energias renováveis. No entanto, a abordagem do plano é ainda superficial, com pouca profundidade em relação aos desafios técnicos, econômicos e regulatórios para a implementação dessa tecnologia no país. Além disso, o PDE 2031 não apresenta um plano de ação detalhado com metas e indicadores claros para o desenvolvimento do setor de hidrogênio verde no Brasil.

4.3.2 Objetivos e metas

Os objetivos e metas estabelecidos para o hidrogênio verde no PNE e nos PDEs demonstram a ambição do Brasil em construir um futuro energético mais sustentável e seguro. A integração do hidrogênio verde na matriz energética brasileira, aproveitando a abundância de fontes renováveis, como solar e eólica, permite uma maior flexibilidade e estabilidade do sistema elétrico. Além disso, a utilização do hidrogênio verde como uma alternativa limpa aos combustíveis fósseis contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos internacionais assumidos pelo país.

Ao facilitar a transição para uma economia de baixo carbono, o hidrogênio verde desempenha um papel central em diversos setores industriais, como a produção de aço e fertilizantes, promovendo a inovação e a criação de empregos verdes. A diversificação da matriz energética com o hidrogênio verde aumenta a segurança energética do país, reduzindo a dependência de importações de combustíveis fósseis e tornando o sistema elétrico mais resiliente a eventos climáticos extremos.

4.3.3 Integração aos planos de expansão

A integração do hidrogênio verde nos planos de expansão da capacidade de geração elétrica no PDE e PNE é vista como uma estratégia fundamental para a transição energética do Brasil. Ambos os planos reconhecem o potencial do hidrogênio verde para contribuir com a segurança energética, a flexibilidade do sistema e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

O PNE 2050 traça um caminho ambicioso para a inserção do hidrogênio verde na matriz energética brasileira. O documento apresenta cenários futuros que consideram a expansão da capacidade de geração elétrica a partir do hidrogênio, destacando sua importância na descarbonização do setor. Além disso, o plano propõe a integração do hidrogênio verde com outras fontes renováveis, como solar e eólica, promovendo um sistema energético mais diversificado e resiliente. O plano também sugere a utilização do hidrogênio em usinas termelétricas a gás natural, contribuindo para a transição energética. Para viabilizar a implementação dessas iniciativas, o PNE propõe a criação de um marco regulatório favorável e a oferta de incentivos para estimular a produção e o uso do hidrogênio verde no Brasil.

O PDE 2031 destaca o hidrogênio verde como uma solução estratégica para aproveitar o potencial das fontes renováveis abundantes no Brasil. A produção de hidrogênio a partir de energia solar e eólica permite o armazenamento de energia excedente e aumenta a flexibilidade do sistema elétrico, contribuindo para a estabilidade do fornecimento de energia. O plano enfatiza a necessidade de investir em pesquisa e desenvolvimento para tornar essa tecnologia mais viável economicamente.

4.3.4 Políticas e estratégias

O PNE 2050 prevê a utilização da energia vertida turbinável de usinas hidrelétricas e da energia secundária proveniente do mecanismo de realocação de energia (MRE) para a produção de hidrogênio verde. O plano busca reduzir custos através da produção nacional de eletrolisadores, com a nacionalização de insumos, e da substituição de motores a combustão por motores elétricos alimentados por células a combustível que utilizam o hidrogênio produzido.

Já o PDE 2030 destaca o potencial do hidrogênio verde como vetor energético, propondo sua aplicação em células de combustível para movimentar veículos leves, como automóveis e caminhões. Além disso, o hidrogênio verde pode ser utilizado no processo de hidrotreamento de óleos vegetais e animais, contribuindo para a produção de biodiesel de alta qualidade e menor impacto ambiental.

Enquanto isso, o PDE 2031 reconhece a necessidade de converter o hidrogênio e seus derivados, como amônia e metanol, para facilitar o manuseio e o transporte. A conversão do hidrogênio em amônia ou metanol aumenta sua densidade energética, facilitando o armazenamento e o transporte em infraestruturas existentes. No entanto, esses processos envolvem custos adicionais e perdas energéticas.

Alternativamente, a adsorção, a liquefação e a compressão do hidrogênio são métodos promissores para o armazenamento e transporte. A escolha da melhor opção depende de fatores como a escala de produção, a distância de transporte e as características do consumidor final.

4.3.5 Desafios e oportunidades

A implementação do hidrogênio verde no setor elétrico, embora promissora, enfrenta diversos desafios que precisam ser superados para sua viabilização em larga escala. Entre os principais obstáculos, destacam-se:

- Custos elevados de produção: Atualmente, a produção de hidrogênio verde ainda é mais cara em comparação com fontes de energia convencionais. A redução dos custos depende do desenvolvimento de tecnologias de eletrólise mais eficientes e baratas.

- Falta de infraestrutura: A ausência de uma infraestrutura adequada para produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde é um gargalo significativo. É necessário investir na construção de redes de distribuição, estações de abastecimento e instalações de armazenamento seguras e eficientes.
- Marco regulatório: A falta de um marco regulatório claro e específico para o hidrogênio verde cria incertezas para os investidores e dificulta a implementação de projetos. A definição de normas e padrões é crucial para garantir a segurança e a viabilidade econômica do setor.
- Capacitação profissional: A necessidade de profissionais qualificados para atuar na cadeia produtiva do hidrogênio verde é um desafio, dada a novidade da tecnologia. A criação de programas de formação e capacitação é fundamental para suprir essa demanda.
- Concorrência: O hidrogênio verde enfrenta concorrência de outras fontes de energia renovável e convencionais, o que exige a busca por nichos de mercado e a demonstração de suas vantagens competitivas.
- Incertezas de mercado: A volatilidade dos preços de energia e a incerteza sobre a demanda futura por hidrogênio verde podem desestimular investimentos no setor. A estabilidade do mercado e a criação de mecanismos de apoio financeiro são essenciais para atrair investimentos.

Por outro lado, ao ser integrado a fontes renováveis, o hidrogênio verde aumenta a flexibilidade e a resiliência do sistema elétrico, mitigando os impactos das flutuações na geração de energia. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias nessa área impulsiona a inovação, cria oportunidades de negócios e gera empregos qualificados. O Brasil, com sua vasta capacidade de geração de energia renovável, possui um enorme potencial para se tornar um exportador de hidrogênio verde, fortalecendo sua posição no mercado global de energia limpa. O apoio governamental, por meio de políticas públicas e incentivos, é fundamental para acelerar a implementação de projetos nessa área e garantir a competitividade do Brasil nesse novo mercado

4.3.6 Identificação de lacunas

O PNE 2050 apresenta soluções para a redução dos custos de produção do hidrogênio verde, porém carece de detalhes sobre como essa redução será alcançada. Além disso, o plano não aborda a necessidade de investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as tecnologias de produção e armazenamento de hidrogênio.

A ausência de um marco regulatório claro e de políticas públicas específicas para o hidrogênio verde é outra lacuna importante. Um marco regulatório bem definido proporcionaria segurança jurídica aos investidores e estimularia o desenvolvimento da indústria. A falta de incentivos à pesquisa e desenvolvimento, a qualificação de mão de obra e a criação de uma infraestrutura adequada são desafios que precisam ser superados para garantir a viabilidade do hidrogênio verde no Brasil.

O PDE 2031, embora seja o plano decenal que mais reconheça a importância do hidrogênio verde, apresenta lacunas importantes em sua análise de custos e na abordagem da produção por eletrólise.

A ausência de uma análise detalhada dos custos de infraestrutura, operação e manutenção, além da falta de comparações com outras fontes de energia, impede uma avaliação precisa da viabilidade econômica do hidrogênio verde no país. É fundamental que o plano contemple estudos aprofundados sobre o custo total de vida útil dos projetos de hidrogênio verde, considerando desde a instalação dos eletrolisadores até a distribuição do produto final.

Além disso, o plano não explora de forma aprofundada a importância da utilização de fontes renováveis para a produção de hidrogênio verde através da eletrólise, nem discute em profundidade os impactos da demanda e da geração de energia na rede elétrica, além da necessidade de adequação da transmissão. É crucial garantir que a energia consumida nesse processo seja proveniente de fontes limpas, como a solar e a eólica, para evitar o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, é necessário avaliar como a crescente demanda por hidrogênio verde pode impactar a rede elétrica e quais as medidas necessárias para garantir a sua estabilidade e confiabilidade.

Embora o Brasil tenha iniciado suas pesquisas em hidrogênio ainda em 2002 e possua um potencial significativo para a produção desse vetor energético, observa-se uma lacuna na produção científica nacional até 2020. Essa lacuna pode ser atribuída à falta de investimento e conhecimento sobre o tema, além dos custos elevados de produção em comparação com outras tecnologias. A dependência de parcerias com empresas estrangeiras para a implementação de projetos de hidrogênio no país também evidencia essa carência.

O Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, lançado antes do auge das pesquisas globais sobre hidrogênio verde, aborda o tema de forma superficial. No entanto, apresenta algumas alternativas para reduzir os custos de produção e amplia as possibilidades de aplicação desse vetor energético. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030, por sua vez, não aprofunda as discussões iniciadas no PNE.

O PDE 2031, por outro lado, apresenta um avanço significativo, detalhando a cadeia produtiva do hidrogênio verde e explorando suas aplicações além do setor de transportes. O plano estima o potencial de produção de hidrogênio a partir de diferentes fontes energéticas e anuncia o lançamento do Plano Nacional de Hidrogênio (PNH2), com o objetivo de criar um ambiente regulatório favorável para investimentos. No entanto, o PNH2 ainda não é capaz de responder a todas as incertezas relacionadas à implementação do hidrogênio verde no Brasil.

Os PDEs 2032 e 2034, com foco no setor de transportes, abordam de forma limitada o uso do hidrogênio nesse segmento. Além disso, tanto o PNE quanto os PDEs não analisam em profundidade os impactos da inserção do hidrogênio verde no sistema elétrico, mantendo as previsões de carga praticamente inalteradas.

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo comparativo dos planos, evidenciando as principais diferenças e deficiências identificadas.

Tabela 4.1 – Síntese das comparações entre os planos.

	Abordagem	Objetivos e metas	Integração aos planos de expansão	Políticas e estratégias	Desafios e oportunidades
PNE	Falta de marco regulatório; Falta de aprofundamento.	Diversificação da Matriz Energética; Redução de Custos; Expansão de Aplicações.	Integração do hidrogênio verde com outras fontes renováveis; Utilização do hidrogênio em usinas termelétricas a gás natural	Produção alternativa de hidrogênio verde (energia vertida e MRE); Redução de custos (produção nacional de eletrolisadores, nacionalização de insumos e da substituição de motores a combustão).	Custos elevados de produção; Falta de infraestrutura; Marco regulatório;
PDE	Abordagem superficial; Falta de plano de ação detalhado.	Diversificação da Matriz Energética; Fortalecimento da Pesquisa e Inovação.	Aproveitar o potencial das fontes renováveis abundantes no Brasil; Necessidade de investir em pesquisa e desenvolvimento.	Aplicação em células de combustível em automóveis hidrotratamento de óleos vegetais e animais; Facilitar o manuseio e o transporte.	Capacitação profissional; Incertezas de mercado.

Fonte: Elaboração própria.

Em resumo, embora os planos energéticos brasileiros reconheçam a importância do hidrogênio verde, há lacunas significativas em termos de detalhamento técnico, análise de custos e impactos no sistema elétrico. É fundamental que os próximos planos energéticos aprofundem a discussão sobre o hidrogênio verde, considerando aspectos como a integração com o sistema elétrico, a segurança energética, a competitividade econômica e os impactos socioambientais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar a evolução das políticas energéticas brasileiras, com foco no papel do hidrogênio verde no setor elétrico. Para tanto, realizou-se uma comparação entre o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 e os Planos Decenais de Expansão de Energia (PDE) 2030, 2031, 2032 e 2034.

Os resultados indicam que, embora ambos os planos reconheçam o potencial do hidrogênio verde como uma alternativa sustentável para a descarbonização da matriz energética, há uma falta de alinhamento estratégico entre eles, o que pode gerar incertezas para investidores e atrasar a implementação de projetos inovadores. Além disso, observou-se a ausência de um aprofundamento individualizado em relação às tecnologias existentes e com potencial de aplicação imediata.

O hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, apresenta-se como uma solução promissora para o Brasil, que possui um vasto potencial em energia solar e eólica. A adoção dessa tecnologia não apenas contribui para a segurança energética, mas também posiciona o país como um líder na produção e exportação de hidrogênio verde no cenário global.

Diante das lacunas identificadas, recomenda-se uma revisão das políticas energéticas para promover maior sinergia entre o PNE e os PDEs. É fundamental estabelecer um diálogo contínuo entre os formuladores de políticas, a academia e o setor privado, visando a criação de um ambiente regulatório claro e estável que incentive investimentos em hidrogênio verde.

Sugere-se, ainda, que futuras pesquisas explorem o potencial de tecnologias emergentes para a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde, como a eletrólise de alta temperatura e os sistemas de armazenamento subterrâneo. A análise da confiabilidade do sistema elétrico com a inserção dessas novas tecnologias, por meio de simulações e modelos computacionais, é essencial para garantir a segurança e a eficiência do sistema energético.

As investigações propostas neste trabalho podem fornecer *insights* valiosos para a formulação de políticas públicas mais eficazes e para a tomada de decisões estratégicas no setor energético brasileiro, contribuindo para uma transição energética mais justa, sustentável e eficiente.

REFERENCIAS

AGENDA 2030. **A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<http://www.agenda2030.org.br/sobre/>>. Acesso em: 09/07/2024.

ALBUQUERQUE, Heloisa Maria de Carvalho et al. **Inserção das pequenas centrais hidrelétricas promovida pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica PROINFA**. 2006.

ARAÚJO, M. de; GOES, Tarcizio. **Energias alternativas fortalecem a matriz energética**. 2009.

AZEVEDO, João Vítor de Freitas. **Estudo dos impactos de instalação de unidades de produção de hidrogênio verde**. 2023. 53 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

Balanco Energético Nacional. **Relatório Síntese**. EPE, 2024. Disponível em: <www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 09/07/2024.

BALDISSERA, O. **Transição energética: o que é e quais os seus impactos?** PUC, 2023. Disponível em: <<https://posdigital.pucpr.br/blog/transicao-energetica>>. Acesso em: 09/07/2024.

BARRETO, Thayze Guedes et al. **ANÁLISE DA DIMENSÃO SOCIOAMBIENTAL DO PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA**. COMITÊ CIENTÍFICO, p. 103. 2023.

BARROSO NETO, Hildeberto. **Avaliação do processo de implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia - PROINFA, no Estado do Ceará: a utilização da fonte eólica**. 2010. 186f. – Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Avaliação de Políticas Públicas, Fortaleza (CE), 2010

BENVINDO, Janaina dos Santos. **Competitividade do Brasil na transição energética global com a implantação do HUB de hidrogênio verde do Ceará: um estudo à luz da teoria da hélice quádrupla**. 2024. Dissertação (mestrado Acadêmico em Administração e Controladoria) - Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará, 2024.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n.212, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE)

BORGES, Ana Caroline Fernandes. **Hidrogênio verde: alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir com a transição energética**. 2022.

BORGES, Maria Clara Silva. **Transição energética: estudo de caso em Itumbiara-GO**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Itumbiara, 74 p. 2023.

CARVALHO, Julia Finamor; GARCIA, José Victor da Silva. **Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil**. 2022.

CASTILLA, Luciana Russo Corrêa; OLIVEIRA, B. G. **Desafios da implantação do Programa Renovabio: insights brasileiros para a descarbonização do setor de transporte.** ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO AMBIENTAL E MEIO AMBIENTE (ENGEMA), v. 20, 2018.

CASTRO, Nivalde José De, et al. **Texto de Discussão Do Setor Elétrico -TDSE N.º 44 Plano Decenal de Expansão de Energia -PDE 2020: Análise Do Método, Metas E Riscos.** 2012.

CASTRO, Nivalde José de. **IMPLICAÇÕES DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA A MATRIZ ELÉTRICA NO BRASIL E NO MUNDO.** A geopolítica da energia do século XXI, 2021.

CERUTTI, Alef Júlio Schaefer et al. **Energia Eólica Offshore, um caminho para a transição energética: uma abordagem no contexto do panorama Offshore, Hidrogênio Verde e ESG.** 2023.

CERUTTI, Alef Júlio Schaefer et al. **Energia Eólica Offshore, um caminho para a transição energética: uma abordagem no contexto do panorama Offshore, Hidrogênio Verde e ESG.** 2023.

CLAUDINO, Felipe da Silva. **PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050 SOB A ÓTICA DA SUSTENTABILIDADE: OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL COMO FUNDAMENTO DO PLANO.** 2020. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ.

COSTA, Paulo Danton Félix da; NUNES, Luciana Angélica da Silva; OLIVEIRA, Vanessa Elionara Souza Ferreira. **CADEIA PRODUTIVA DO HIDROGÊNIO VERDE: UMA ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ARMAZENAMENTO.** 2023.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio:** revisão 1. 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)>. Acesso em: 09/07/2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Eletricidade.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Demanda%20de%20Eletricidade%20-%20PDE%202032.pdf>>. Acesso em: 09/07/2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Eletricidade.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/PDE%202034_Caderno_Demanda_Eletricidade_Publicacao.pdf>. Acesso em: 09/07/2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Final do PDE 2030.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf>. Acesso em: 09/07/2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Final do PDE 2031.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites->

pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf. Acesso em: 09/07/2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Final do PNE 2050**. Plano Nacional de Energia 2050, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acesso em: 09/07/2024.

EPE/DEA/SEE. **Potencial técnico de produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/arcgisportal/apps/storymaps/stories/68332aaa3fc64524a656583e1367daa3>>. Acesso em: 09/07/2024.

FERREIRA, Matheus Lobo Leite. **Simulação da produção de hidrogênio para armazenamento de energia a partir de fontes renováveis**. 2022. 79 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

Finep, Inovação e Pesquisa. **“Ônibus a Hidrogênio.”** www.finep.gov.br, www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio. Acesso em 03/09/2024.

FUNCHAL, Paulo Henrique Zukanovich. **A Contabilização das Externalidades como Instrumento para a Avaliação de Subsídios: o Caso das PCHs no Contexto do Proinfa**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GARCIA, Gessika da Silva. **Hidrogênio verde: seu papel estratégico na transição energética**. 2024.

Gomes, J., **Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio**, Rev. Ciência Elem., V10(2):025. 2022.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro**. Novos Cadernos NAEA, [S.l.], v. 26, n. 1, abr. 2023. ISSN 2179-7536. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/12746/10175>

MADRUGA, Marciúle Gorgonio Coutinho. **Oportunidades e desafios da utilização do hidrogênio verde na transição energética brasileira**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Marafon, R., Miyashiro Junior, R., & Alves Vasconcelos, P. E. (2024). **O HIDROGÊNIO VERDE COMO ALTERNATIVA PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E A IMPORTÂNCIA DO BRASIL NESTE CENÁRIO**. *REVISTA DIREITO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS*, 5(1).

MARQUES, Amanda Teles; DE OLIVEIRA, Aylla Monteiro; DA PAIXÃO TRINDADE, Gildemar. **Transição Energética Justa E Protagonismo Dos Povos Indígenas**. Expert Editora, 2023.

MARQUES, Cláudio. **As apostas de empresas em hidrogênio verde dobram no país**. Valor Econômico, São Paulo, 18 jan. 2023.

MINISTÉRIO MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf Acesso em: 09/07/2024.

MINISTÉRIO MINAS E ENERGIA. **RenovaBio**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>>. Acesso em: 09/07/2024.

NETO, Hildeberto Barroso. **Avaliação do processo de implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia-PROINFA, no Estado do Ceará: a utilização da fonte eólica**. 2010.

Newborough, M.; Cooley, G., “**Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours**,” Fuel Cells Bulletin, vol. 2020, nº 11, pp. 16-22, 2020.

NUNES, Diego Ricardo Delgado Régis Dantas. **ANÁLISE DO PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2024 COMO FERRAMENTA PARA ESTUDOS DE ENGENHARIA**. 2016.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Texto para Discussão, 2022.

PORTAL GOV.BR. **Conheça a logo escolhida para ser a marca oficial do ODS 18**. Disponível em: <<https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/cnods/noticias/conheca-a-logo-escolhida-para-ser-a-marca-oficial-do-ods-18/ManualdaMarcaBrendaGomesVirgens.jpg>>. Acesso em 25/10/2024.

PROCEL. Site Institucional. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B0C24456E-2980-4704-B2CB9B5518636BBE%7D>>. Acesso em 08/07/2024.

PUGA, Mariana dos Santos; ASENCIOS, Yvan Jesus Olortiga. **Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde**. Latin American Journal of Energy Research, v. 10, n. 2, p. 74-93, 2023.

SANTOS, Simone Mendonça. **A avaliação ambiental estratégica e o plano nacional de energia: um estudo das potenciais contribuições**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2009. doi:10.11606/D.18.2009.tde-11122009-110911

SCHNEIDERS, THORSTEN et al. **A Transição Energética para o Carbono Zero (H2 Pt-X)**. 2023.

SILVA, Inara Amoroso da. **Hidrogênio: combustível do futuro**. Ensaio e Ciência: ciências biológicas, agrárias e da saúde, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016.

SOUSA, Lara Maria Sales dos Santos. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica**. 2022.

TRANNIN, Marcio. **Desafios e oportunidades para a geração de energia elétrica por fontes renováveis no Brasil: estudo de caso sobre a Usina híbrida de Tacaratu (PE)**. Boletim de Conjuntura, n. 4, p. 4-7, 2016.

VEIGA, Leandro Emiliano Tiago. **Hidrogênio Verde e sua implementação no Sistema Elétrico Nacional**. 2022.

VIANNA, Paulo Cezar Piovesan et al. **Potencial para produção de hidrogênio verde via eletrólise fotovoltaica da água para comunidades isoladas na Amazônia legal.** 2024.

ZHANG, Bing et al. **“Progress and Prospects of Hydrogen Production: Opportunities and Challenges.”** Journal of Electronic Science and Technology, vol. 19, no. 2, jan. 2021, p. 100080. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2021.100080>>.