



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUÁRIA E
CONTABILIDADE – FEAAC
PROGRAMA DE ECONOMIA PROFISSIONAL – PEP

HAILTON JOSÉ FORTES

MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL, TRANSIÇÃO E PERSPECTIVAS ATÉ 2050:
DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO DO NORDESTE
BRASILEIRO A PARTIR DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

FORTALEZA

2024

HAILTON JOSÉ FORTES

MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL, TRANSIÇÃO E PERSPECTIVAS ATÉ 2050:
DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO DO NORDESTE
BRASILEIRO A PARTIR DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Economia Profissional – PEP, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Economia. Área de Concentração: Economia do Setor Público.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F844m Fortes, Hailton José.

Matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050: desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis / Hailton José Fortes. – 2024.

80 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Mestrado Profissional em Economia do Setor Público, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva.

1. Matriz energética atual. 2. Transição energética. 3. Energias renováveis. 4. Industrialização do Nordeste brasileiro. I. Título.

HAILTON JOSÉ FORTES

MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL, TRANSIÇÃO E PERSPECTIVAS ATÉ 2050:
DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A INDUSTRIALIZAÇÃO DO NORDESTE
BRASILEIRO A PARTIR DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Economia Profissional – PEP, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Economia. Área de Concentração: Economia do Setor Público.

Aprovada em: **17 de maio de 2024.**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Brito Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sérgio Aquino de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha família pelo incentivo e compreensão e ao Banco do Nordeste pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e a capacidade para desenvolver este trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, Francisco Fortes de Carvalho e Maria dos Anjos Fortes, exemplos de resiliência e grandes incentivadores dos filhos pelos estudos, meus mais sinceros agradecimentos pelo suporte nos momentos difíceis ao longo do tempo do curso.

Aos meus filhos, Enzo e Heitor, pela compreensão e, sobretudo, pelo amor incondicional.

Ao meu orientador, professor Dr. Francisco Gildemir Ferreira da Silva, sem o qual não teria conseguido concluir esta difícil tarefa.

A todo o corpo docente e discente e demais servidores do curso de Mestrado em Economia do Setor Público da Universidade Federal do Ceará, a quem fico lisonjeado por dele ter feito parte.

Agradeço a Marcilene Ibiapina por sua disponibilidade em contribuir. Sem sua ajuda, esta trajetória seria mais árdua e demorada.

Ao Banco do Nordeste pelo apoio ao meu desenvolvimento profissional e acadêmico, bem como pela efetiva colaboração com o desenvolvimento científico.

Aos meus colegas de curso, pelo aprendizado conjunto e pela amizade construída ao longo desta difícil jornada.

Aos meus colegas de trabalho, pelo incentivo nos momentos críticos.

RESUMO

A promoção para a transição de uma matriz energética mais sustentável, deve, de maneira precípua, estar associada à gestão do poder público para o investimento em energias renováveis, expandindo a capacidade de geração de energia e promovendo a diversificação da matriz energética. O Nordeste brasileiro é uma região privilegiada com um grande potencial para geração de energia solar e eólica, o que possibilita a criação de oportunidades para a industrialização e exportação da produção excedente baseadas nessas fontes limpas de energia. Diante desse contexto, define-se a seguinte pergunta norteadora: Quais os desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro, a partir da transição energética, com ênfase nas energias renováveis? O estudo tem como objetivo geral analisar a situação da matriz energética atual e identificar os desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste, com base na transição energética e perspectivas até 2050, a partir das energias renováveis. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, em que pese a exibição de dados quantitativos; inicialmente, efetuou-se uma revisão da literatura sobre marcos teóricos relacionados à matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050, e às oportunidades e desafios da exportação e industrialização do Nordeste a partir das energias renováveis, com exibição de dados secundários; posteriormente, realizou-se pesquisa de campo no Banco do Nordeste cujos dados primários obtidos versam sobre as demandas de financiamento de projetos de hidrogênio verde e descarbonização. Conclui-se que, até 2050, as perspectivas da transição energética para o Brasil são promissoras, com a expectativa de aumento da participação das energias renováveis na matriz energética e a consolidação do país como um produtor e exportador de energias limpas, em resposta às mudanças climáticas e os acordos internacionais de cooperação ambiental, bem como fatores geopolíticos. Com isso, surgem oportunidades para a industrialização do Nordeste, pois o questionamento das vantagens do modelo de *offshoring*, condições climáticas, posição geográfica, infraestrutura existente e estruturação de linhas de financiamento se tornam atrativos para instalação de plantas industriais na região, com destaque, para produção de hidrogênio verde que é insumo para as demais; contudo, há relevantes desafios concernentes ao fortalecimento dessa infraestrutura, aprimoramento dos marcos regulatórios e incentivo à inovação tecnológica para

produção, armazenamento, transporte e distribuição de energias limpas. Desse modo, é possível afirmar que os objetivos da pesquisa foram atingidos.

Palavras-chave: Matriz energética atual. Transição energética. Energias renováveis. Industrialização do Nordeste brasileiro.

ABSTRACT

Promoting the transition to a more sustainable energy matrix must, primarily, be associated with public power management for investment in renewable energy, expanding energy generation capacity and promoting the diversification of the energy matrix. The Brazilian Northeast is a privileged region with great potential for solar and wind energy generation, which allows the creation of opportunities for industrialization and export of surplus production based on these clean energy sources. Given this context, the following guiding question is defined: What are the challenges and opportunities for the industrialization of the Brazilian Northeast, based on the energy transition, with an emphasis on renewable energy? The study's general objective is to analyze the situation of the current energy matrix and identify the challenges and opportunities for the industrialization of the Northeast, based on the energy transition and perspectives until 2050, based on renewable energy. This is a qualitative research, despite the display of quantitative data; Initially, a literature review was carried out on theoretical frameworks related to the current energy matrix, transition and perspectives until 2050, and the opportunities and challenges of exporting and industrializing the Northeast using renewable energy, with secondary data displayed; Subsequently, field research was carried out at Banco do Nordeste, the primary data obtained dealing with the financing demands of green hydrogen and decarbonization projects. It is concluded that, by 2050, the prospects for the energy transition for Brazil are promising, with the expectation of an increase in the share of renewable energy in the energy matrix and the consolidation of the country as a producer and exporter of clean energy, in response to changes climate change and international environmental cooperation agreements, as well as geopolitical factors. With this, opportunities arise for the industrialization of the Northeast, as the questioning of the advantages of the offshoring model, climatic conditions, geographic position, existing infrastructure and structuring of financing lines become attractive for installing industrial plants in the region, with emphasis on production of green hydrogen, which is an input for the others; however, there are relevant challenges regarding strengthening this infrastructure, improving regulatory frameworks and encouraging technological innovation for the production, storage, transport and distribution of clean energy. In this way, it is possible to affirm that the research objectives were achieved.

Keywords: Current energy matrix. Energy transition. Renewable energy. Industrialization of the brazilian Northeast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Custos projetados de produção de hidrogênio, ano 2030, em sistemas híbridos (solares, fotovoltaicos e eólicos), em US\$/Kg H²..... 36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Emissão global de gases do efeito estufa, por setor, 1990-2020, em milhões de toneladas de CO ₂	25
Gráfico 2 - Matriz energética mundial.....	26
Gráfico 3 - Matriz energética brasileira.....	27
Gráfico 4 - Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo, no ano de 2021.....	27
Gráfico 5 - Matriz elétrica mundial, ano 2021.....	28
Gráfico 6 - Matriz elétrica brasileira, ano 2022.....	29
Gráfico 7 - Demanda por hidrogênio, por aplicação e região, período 2019-2030, em milhões de toneladas de H ² – Cenários STEPS e APS.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise SWOT da industrialização do Nordeste brasileiro.....	60
Quadro 2 - Financiamentos do Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023, por estado.....	64
Quadro 3 - <i>Hub</i> de hidrogênio verde – Pecém, no Ceará: empresas que assinaram MoU.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Financiamentos do Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023, por área de aplicação.....	65
Tabela 2 - Financiamentos do Banco do Nordeste para energias renováveis, no período de 2017 a 2023.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ALC	América Latina e Caribe
APS	<i>Announced Pledges Scenario</i>
ASG	Ambientais, Sociais e de Governança
BNB	Banco do Nordeste do Brasil S.A.
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilisation and Storage</i>
CGV	Cadeia Global de Valor
CH4	Gás metano
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO2	Gás carbônico (dióxido de carbono)
COP	<i>Conference of Parties</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	Escola Superior de Guerra
ETENE	Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste
FIEC	Federação das Indústrias do Ceará
FNE	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste
FNE - Proinfra	Crédito para Investimento - Produtos e Serviços · Implantação, ampliação, modernização e reforma de empreendimentos
GEE	Gases do Efeito Estufa
GW	<i>Giga Watt</i>
H2	Gás hidrogênio
H2V	Hidrogênio verde
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IED	Investimento Estrangeiro Direto
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IRENA	International Renewable Energy Agency
Kg	Quilograma
Km	Quilometro
kW	Quilowatt

kWh	Quilowatt hora
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
MME	Ministério das Minas e Energia
MoU	Memorandos de Entendimento
Mt	Milhões de toneladas
N2O	Gás óxido nitroso
NIB	Nova Indústria Brasil
PIB	Produto Interno Bruto
OCDE	<i>Organization for Economic Co-Operation and Development</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PD	Políticas Declaradas
PNDR	Política Nacional de Desenvolvimento Regional
PNH2	Programa Nacional do Hidrogênio
PRDNE	Plano Regional de Desenvolvimento do Nordeste
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
STEPS	<i>Stated Policies Scenario</i>
TMP	Teoria Moderna do Portfólio
UF	Unidade Federativa
ZPE	Zona de Processamento de Exportação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	METODOLOGIA.....	20
3	REVISÃO DO SETOR E POTENCIALIDADES.....	23
3.1	Panorama do Setor Energético global e brasileiro.....	23
3.2	Demanda potencial de hidrogênio verde.....	30
3.3	Oferta potencial de hidrogênio verde.....	34
4	INDUSTRIALIZAÇÃO DO NORDESTE BRASILEIRO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES.....	38
4.1	Conceituação de Cadeias Globais de Valor.....	38
4.2	A industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis.....	41
4.3	Análise <i>SWOT</i> da industrialização do Nordeste brasileiro.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1	Projetos de hidrogênio verde anunciados no Nordeste.....	67
5.2	Demandas de financiamento para projetos de hidrogênio verde pelo Banco do Nordeste.....	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa sobre a matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050, com foco na industrialização do Nordeste brasileiro e exportação do excedente de produção a partir das energias renováveis, objeto do presente estudo, está intrinsicamente relacionada às novas demandas da sociedade pela necessidade de um meio ambiente sustentável cujo interesse é a redução dos gases que são emitidos, a gestão da produção de resíduos sólidos, a adição financeira do custo de combustíveis fósseis e a ampliação de técnicas para produção de energias eólicas e solar de baixo custo o que faz com que os mais variados tipos de energia renováveis estejam cada vez mais no cenário das políticas públicas.

O Brasil, devido a seu elevado índice de radiação solar, ventos fortes e constantes em boa parte do ano, vastas áreas de terra e de água, recursos estes que já vêm sendo utilizados para modificar a sua matriz energética, a boa infraestrutura portuária e a posição geográfica próxima aos grandes centros consumidores, como Estados Unidos e Europa, possui alto índice de se tornar um protagonista na transição energética das fontes fósseis para as renováveis. Neste cenário, percebe-se que atualmente o uso da energia renovável no Brasil ganhou impulso, em especial na região Nordeste.

A transição energética refere-se à substituição da matriz energética baseada em combustíveis fósseis por fontes renováveis, visando a descarbonização das atividades produtivas humanas para mitigar as mudanças climáticas. Ela envolve a diversificação das formas de obtenção de energia, o aumento da eficiência energética e a redução da dependência de fontes não renováveis.

Além disso, a transição energética não se restringe apenas à geração e consumo de energia, mas também abrange mudanças na estrutura social, econômica, política e cultural, bem como a otimização da utilização de bens e serviços. Pressões sociais e ambientais estão associadas à implantação de energias limpas e às preocupações com o bem-estar humano e o meio ambiente.

A urgência dessa transição se deve ao fato de que 79% da produção mundial de energia ser baseada em combustíveis fósseis, o que representa 87% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂). A transição energética é, portanto, fundamental para combater as mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade do planeta (Almeida *et al.*, 2022).

A diversificação das formas de obtenção de energia, o aumento da eficiência energética e a redução da dependência de fontes não renováveis são algumas das medidas que podem ser adotadas. A transição energética também pode trazer benefícios para a economia e a sociedade, como a criação de novas oportunidades de emprego e o combate à pobreza energética. Assim, o tema é motivo de discussão constante nos principais fóruns mundiais, nos quais líderes políticos, empresários, ativistas e instituições discutem as alternativas viáveis e sustentáveis para redução dos gases de efeito estufa (GEE) e alcance dos objetivos estipulados no acordo de Paris, que prevê metas para a redução da emissão de GEE e foi assinado por 195 países em dezembro de 2015.

Nesse contexto, a transição para uma matriz energética mais sustentável exige a participação ativa da sociedade e a conscientização sobre a importância das energias limpas para o futuro mais limpo e sustentável. Diante deste cenário, a indagação da pesquisa consiste no seguinte: Quais os desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro, a partir da transição energética, com ênfase nas energias renováveis? Adicionalmente, pretende-se compreender os efeitos dessa transição na exportação do excedente de produção a partir das energias renováveis.

A região Nordeste brasileira possui atividades industriais dispersas, em áreas de ocupação dispersa e baixo nível de desenvolvimento, como o interior (Diniz; Mendes, 2023), vasta área do seu território localizado no bioma semiárido, historicamente com grande dificuldade de convivência com a seca e desenvolvimento econômico abaixo das regiões mais desenvolvidas do país, exportando mão-de-obra barata em função da baixa qualificação profissional.

Com o advento das energias renováveis, o que antes era um problema, passa a ser um aliado e promotor do desenvolvimento da região, pois a produção de energia eólica e solar independe da quantidade de chuvas, convivendo pacificamente com a estiagem e tem o potencial de transformar a realidade das comunidades próximas aos parques geradores de energia, bem como nos municípios sedes, com a geração de impostos e empregos e pode se intensificar com a promissora indústria do hidrogênio verde, atraindo indústrias e gerando empregos qualificados na Região Nordeste, promovendo desenvolvimento e diminuindo as desigualdades em relação às demais regiões mais desenvolvidas do Brasil.

Justifica-se o estudo, principalmente, em termos econômicos compreendendo que no Brasil, notadamente na região Nordeste, onde a

predominância de sol e de ventos fortes ocorre praticamente o ano inteiro, faz com que nosso país seja considerado o líder mundial em energias renováveis. Contudo, não se pode olvidar da relevância acadêmica, ambiental e social.

O objetivo geral da pesquisa é analisar a situação da matriz energética atual e identificar os desafios e oportunidade em decorrência da transição e perspectivas até 2050, com foco na industrialização do Nordeste a partir das energias renováveis e, secundariamente, a exportação da produção excedente, notadamente, de hidrogênio verde (H2V).

Para tanto, foram estabelecidos os objetivos específicos a seguir: verificar o panorama geral do setor energético brasileiro no contexto mundial; destacar os desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro e o papel do Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE), como principal linha de financiamento do Banco do Nordeste do Brasil (BNB), nesse processo de transição para energias renováveis; averiguar as projeções de demanda nacional e internacional por energias renováveis, tendo como premissas a instalação de indústrias no Nordeste brasileiro e a demanda por exportação de energias com emissão de baixo carbono, explorando a viabilidade e as implicações da transição para uma economia sustentável baseada em hidrogênio verde.

Para a realização da pesquisa, efetuou-se uma revisão da literatura sobre marcos teóricos relacionados à matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050, ao hidrogênio verde, bem como à industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis. Aliado a tais constructos, utilizam-se dados secundários relativos a emissões de gases do efeito estufa, matriz energética global e nacional, matriz elétrica mundial e brasileira, consumo de energia de fontes renováveis e não renováveis e demandas por hidrogênio, bem como dados primários coletados em pesquisa realizada no Banco do Nordeste que teve como propósito verificar a existência de demandas de financiamento de projetos relacionados ao hidrogênio verde e descarbonização.

O texto está estruturado em seis seções, incluindo esta introdução, que expõe o roteiro da pesquisa com tema, problema norteador, objetivo geral e específicos, justificativa, síntese da metodologia, recorte teórico-conceitual e a caracterização das partes do texto. A segunda, detalha o percurso metodológico que conduziu a realização da pesquisa.

A terceira parte discute o panorama do setor energético global e brasileiro, bem como a demanda e oferta potenciais de hidrogênio verde. A quarta seção discorre sobre o papel do Brasil na Cadeia Global de Valor (CGV) do hidrogênio verde e os desafios e oportunidades para a industrialização da região Nordeste a partir das energias renováveis. Na quinta, constam dados e discussões relativos aos projetos de hidrogênio verde anunciados no Nordeste e as demandas de financiamento pelo Banco do Nordeste.

Finalmente, nas Considerações Finais, são sintetizados os argumentos expostos ao longo do texto e tecidas algumas reflexões críticas sobre a abordagem que conecta energias renováveis à industrialização do Nordeste brasileiro e responde à pergunta de pesquisa e indica o alcance dos objetivos.

2 METODOLOGIA

A revisão de literatura é uma etapa fundamental em qualquer pesquisa científica, pois se baseia na análise e interpretação de publicações já existentes sobre o tema em questão. Nesse processo, são selecionadas e analisadas as informações mais relevantes e atuais para embasar a pesquisa e contribuir para a construção do conhecimento sobre determinado assunto (Gil, 2012).

Para a elaboração desta dissertação, a revisão de literatura foi realizada por meio da consulta em sítio de busca na internet a artigos científicos, artigos de opinião e dissertações, além de livros. Em consonância com o assunto, foram delimitados alguns critérios para a pesquisa, como: matriz energética, transição energética, energias renováveis, hidrogênio verde, industrialização. A seleção do material levou em conta critérios como publicação por instituições oficiais brasileiras, ano de publicação (últimos três anos) e aderência ao tema delimitado, a fim de apresentar uma fundamentação teórica que retrate as atuais discussões.

Adicionalmente à revisão de literatura, os dados secundários também desempenham um papel importante nesta pesquisa científica. Dados secundários são informações coletadas por terceiros e disponíveis em fontes externas, como bancos de dados, relatórios, estatísticas, entre outros. Esses dados podem ser utilizados para complementar as informações obtidas por meio da revisão de literatura e contribuir para o embasamento teórico da pesquisa (Marconi; Lakatos, 2003).

Com vistas a compreender a matriz energética atual e qual o cenário do setor energético brasileiro no contexto mundial, foram coletados e analisados dados publicados, principalmente, pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), posto que se trata de empresa pública federal que presta serviço ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético e pela *International Energy Agency* (IEA), por constituir uma organização internacional ligada a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) que detém um programa de investigação energética com divulgação de política energética e recomendações de boas práticas e atua como orientadora política de assuntos energéticos para os países membros.

Diante da relevância da EPE e da IEA para a orientação de política energética e planejamento do setor, foram utilizados dados secundários obtidos em seus relatórios para a realização de análises de cenários de emissões de GEE, matriz

energética e elétrica mundial e brasileira, consumo de energia de fontes renováveis e não renováveis e demandas por hidrogênio que auxiliam na compreensão das políticas públicas nacionais e dos incentivos financeiros por intermédio do Banco do Nordeste do Brasil.

Nesta pesquisa, o estabelecimento do marco temporal até 2050, para delimitar a transição da matriz energética atual, tem como fundamento o objetivo de zerar a emissão humana líquida de CO₂ até 2050, definido pela *Conference of the Parties* (COP), órgão supremo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, por meio de medidas que visem à redução do uso de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão e o aumento da participação de fontes de energia limpas e renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica (IEA, 2021).

Posteriormente, foi realizada pesquisa de campo, com o intuito de averiguar as projeções de demanda por energias renováveis, na região Nordeste e explorar a viabilidade e as implicações da transição para uma economia sustentável baseada em hidrogênio verde. Considerando os vultosos recursos envolvidos para o exercício dessas atividades empresariais, os dados foram coletados em instituição financeira bancária, por exibir projetos em estágio estruturado, em fase de prospecção de recursos.

A pesquisa de campo foi realizada no Banco do Nordeste, por ser a maior instituição da América Latina voltada para o desenvolvimento regional e atuar como órgão executor de políticas públicas do governo federal, especialmente, da operacionalização do FNE, além de demonstrar-se acessível à coleta de dados pelo pesquisador.

Uma vez que o orçamento do BNB é baseado no ano civil e no intento de apresentar valores atualizados, os dados primários foram coletados no período de janeiro e fevereiro de 2024, primeiro bimestre após o fechamento do orçamento de 2023 e antecessor à análise e redação dos resultados desta pesquisa, por meio de questionário que versou sobre as demandas, em andamento, para financiamento de projetos de hidrogênio verde e descarbonização da indústria e redução da emissão de GEE na atmosfera.

Com vistas a levantar as demandas e programar os recursos anuais, foi realizada sondagem das informações mediante a aplicação do questionário nas gerências Corporate, responsáveis pela estruturação e contratação das operações de infraestrutura, nos 11 estados da área de atuação do BNB. O citado questionário foi

estruturado em duas partes, a primeira, que serviu de base para esta pesquisa, trata da identificação geral – nome da empresa, sede (localização), presença global da empresa, segmento, estágio do projeto, valor a ser financiado, porcentagem que pretende financiar, potencial de geração de emprego, estudos técnicos desenvolvidos; e a segunda, com quesitos específicos sobre a elaboração do projeto de financiamento que subsidiaram a instituição financeira acerca da programação de recursos.

Ademais, foram coletados dados acerca de financiamentos para o setor de infraestrutura em 2023, e financiamentos para energias renováveis de 2017 a 2023, intervalo temporal em que houve o fortalecimento do aporte de recursos financeiros pela instituição, uma vez que o setor de infraestrutura e energias renováveis estão imbricados com o objeto desta pesquisa.

Tendo em vista o problema de pesquisa e os objetivos traçados, os dados coletados foram analisados qualitativamente, em que pese a exibição de valores e quantidades inerentes aos fins deste estudo, mediante a leitura e síntese dos resultados. Portanto, trata-se de pesquisa qualitativa.

Para tanto, foram consideradas a participação de diferentes atores, como governo, empresas, academia e sociedade civil, para a compreensão das definições de estratégias para a transição para uma matriz energética mais sustentável e a industrialização do Nordeste brasileiro e promoção da exportação do excedente, a partir das energias renováveis.

Identifica-se, assim, o percurso metodológico desta pesquisa que compreende a discussões de estratégias, desafios e políticas públicas que visaram acelerar a transição energética no país, possibilitando a segurança energética, a sustentabilidade ambiental, a industrialização do Nordeste, a competitividade e inovação e que propiciam ao Brasil se tornar um *player* relevante no futuro e promissor mercado global de hidrogênio verde.

3 REVISÃO DO SETOR E POTENCIALIDADES

Esta seção aborda o setor energético ao traçar o cenário da emissão de GEE e contextualizar o panorama da matriz energética e elétrica brasileira em paralelo à mundial e destaca suas potencialidades, notadamente, a oferta e demanda potencial por hidrogênio verde.

3.1 Panorama do Setor Energético global e brasileiro

Reverendo a história relacionada ao desenvolvimento das atividades econômicas em todo o mundo, verifica-se que este foi regulado na utilização de combustíveis fósseis, não sendo possível sua auto renovação, fato este que traz responsabilidade por grande parte dos problemas ambientais encontrados na atualidade, especialmente, os relativos ao aquecimento global (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE, 2018).

Além do aquecimento global, o sistema de energia convencional, mundialmente, passa por esgotamento progressivo dos recursos energéticos fósseis e por baixa eficiência energética (Rosa; Gasparin, 2016). Some-se a contribuição dos combustíveis fósseis pela maior parcela das emissões dos gases de efeito estufa, a necessidade de uma melhor qualidade de vida e sustentabilidade do planeta, levando o tema da proteção ambiental e a transição energética para o centro do debate e ganhando relevância mundial.

A partir da segunda metade do século XX, houve um aumento na conscientização sobre os impactos das atividades humanas no meio ambiente. Livros como "Primavera Silenciosa", de Rachel Carson, publicado em 1962, de proteção chamaram a atenção para os efeitos negativos dos pesticidas na vida selvagem e no meio ambiente, contribuindo para o despertar da consciência pública sobre a necessidade ambiental (Leite; Alves; Picchi, 2020, p. 383).

Para Araújo (2023, p. 22), a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, em 1972, foi a primeira grande conferência internacional sobre questões ambientais, reunindo líderes mundiais e representantes de organizações não governamentais para discutir os desafios ambientais globais e promover ações para a proteção do meio ambiente, ainda que a questão energética tenha sido tratada de forma secundária.

A discussão sobre a diversificação de fontes energéticas, de acordo com o que expôs Araújo (2023) foi trazida para o centro do debate pelos chamados "choques do petróleo", nos anos 1970, e com o acidente ocorrido em Chernobyl, em 1986, na União Soviética. Em 1981, a Organização das Nações Unidas (ONU) organiza uma conferência específica sobre fontes renováveis de energia em Nairóbi e, em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas publicou o relatório intitulado "Nosso Futuro Comum", que destacou a interligação entre o desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental, incluindo a questão das fontes não renováveis de combustíveis.

A consolidação do tema das mudanças climáticas na agenda internacional ocorreu nos anos 1990. Durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Eco-92, líderes mundiais se reuniram no Rio de Janeiro para discutir questões ambientais e buscar soluções para os desafios globais. Essa conferência resultou em importantes acordos, como a Agenda 21, o Protocolo de Kyoto e a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Araújo, 2023).

Esses acordos estabeleceram um marco internacional para a cooperação ambiental, com o objetivo de monitorar e prever mecanismos de controle dos Gases do Efeito Estufa (GEE). O Acordo foi assinado por 195 países, incluindo o Brasil, que devem ater o aumento da temperatura a 1,5°C superior ao nível pré-industrial, dando projeção a questão energética, a maior fonte de emissão de GEE (Trindade; Alvim, 2022, p. 38).

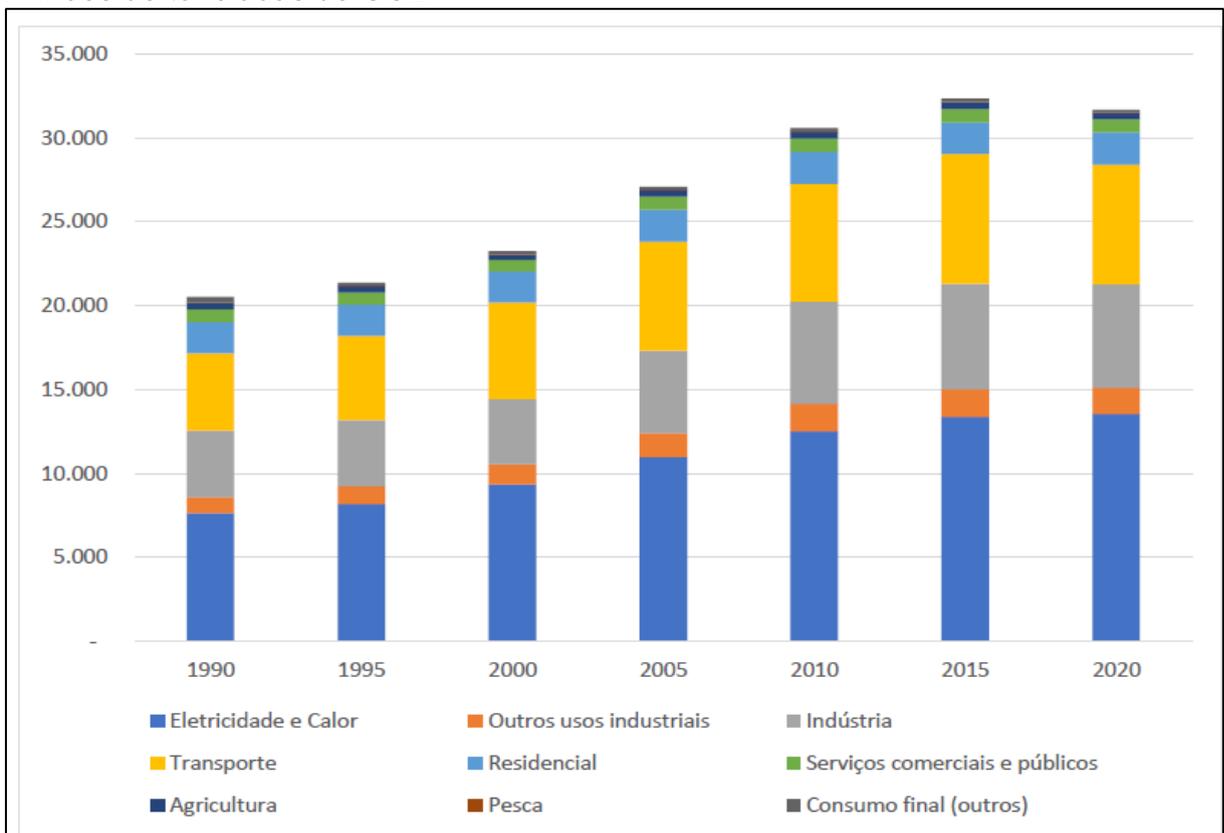
Para que essas metas sejam atingidas, o investimento anual em infraestrutura para unidades de captura, utilização e armazenamento de carbono (*Carbon Capture, Utilisation and Storage - CCUS*) e hidrogênio deverá aumentar dos atuais US\$ 1 bilhão para US\$ 40 bilhões em 2030. Até a próxima década, serão necessários 850 GW de capacidade em eletrolisadores, o que será responsável pela produção de 150 Mt de H² de baixo carbono anualmente. Em 2045, a capacidade instalada de eletrolisadores aumentará para 3.000 GW e o volume anual produzido para 435 Mt (IEA, 2021).

Lima e Hamzagic (2022, p. 3) explicam que a maioria das emissões de GEE é proveniente de atividades humanas, como a geração de energia, transportes, indústria e a agricultura, embora queimadas naturais e vulcões também contribuam. Os principais GEE incluem CO₂, metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), sendo o CO₂ o mais significativo devido à sua quantidade. Devido à participação do CO₂ no efeito

estufa, as emissões são quantificadas em termos de CO₂ equivalente, também conhecido como "CO₂eq" ou "Carbono equivalente".

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*), a emissão antrópica de GEE foi de 31.665 milhões de toneladas de CO₂eq em 2020, sendo que o setor de "Eletricidade e Aquecimento" gerou 13.568 milhões de toneladas de CO₂eq, ou 42,8% do total, conforme pode ser visto no Gráfico 1. Entre 1990 e 2020, o crescimento das emissões totais foi de 54,3%, com elevação constante das emissões em todo o período analisado, exceto a única redução observada no período de 2015 e 2020, o último da série estudada (Araújo, 2023).

Gráfico 1 – Emissão global de gases do efeito estufa, por setor, 1990-2020, em milhões de toneladas de CO₂

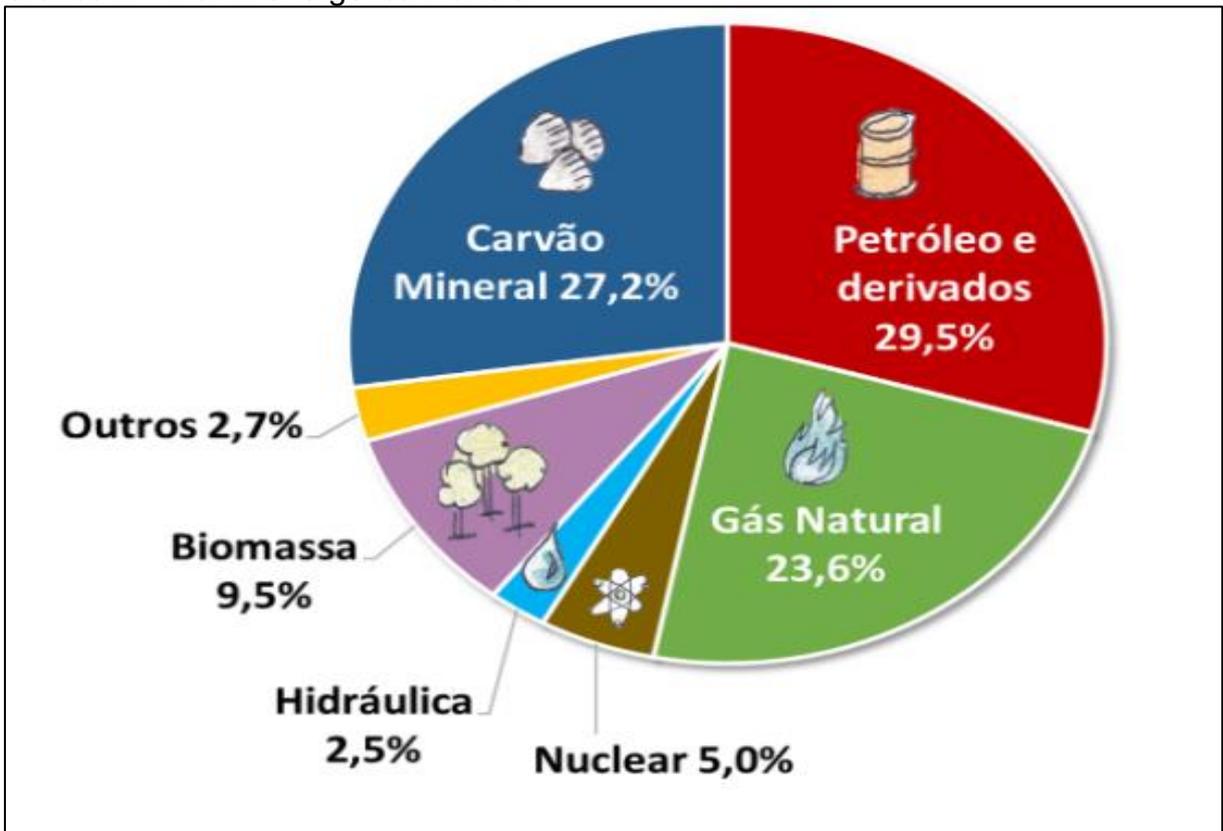


Fonte: IEA, 2023.

A matriz energética é um conjunto de fontes de energia disponíveis em um determinado local, como um país, para atender às demandas de energia nos setores comerciais, industriais e residenciais.

No Gráfico 2, ilustra-se a matriz energética mundial que é composta, principalmente, por fontes não renováveis, como petróleo, carvão mineral e gás natural, e por fontes renováveis, como biomassa, hidrelétrica e outras (Xavier, 2023).

Gráfico 2 – Matriz energética mundial

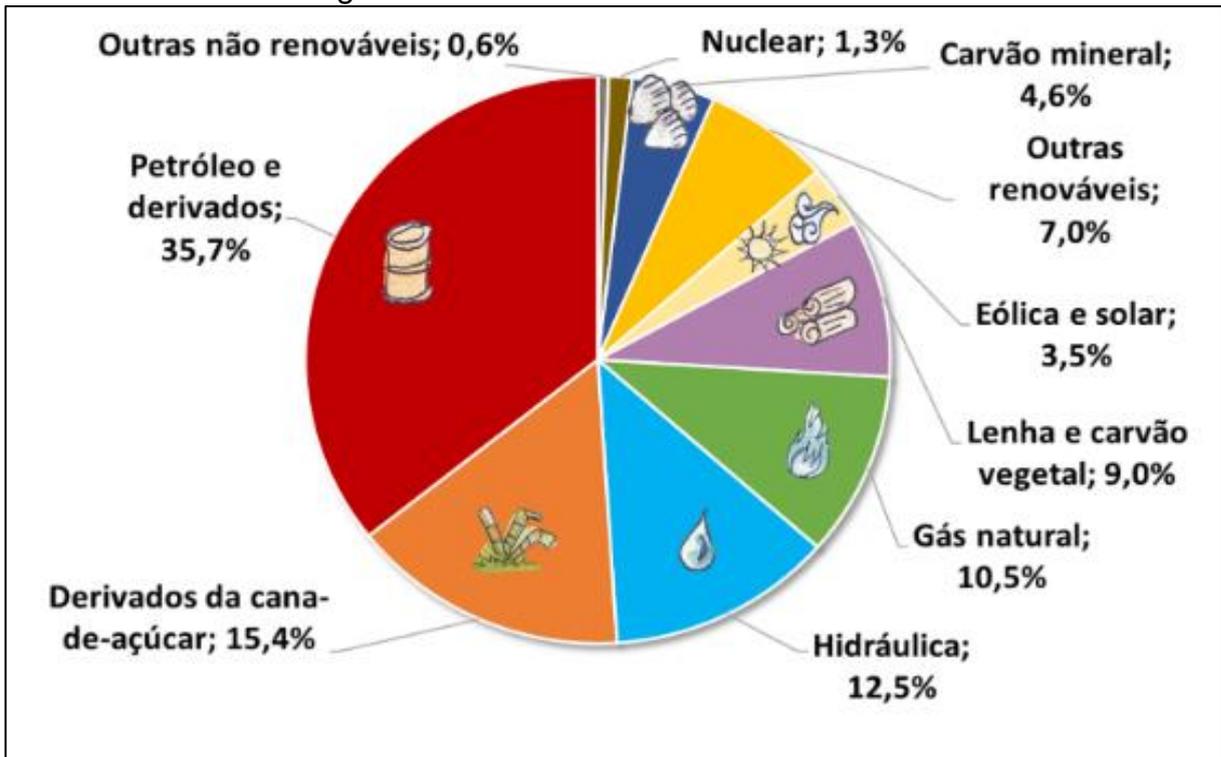


Fonte: Brasil, 2023.

Fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 2,7% da matriz energética mundial, assinaladas como “Outros”, no Gráfico 2. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam aproximadamente 15%.

Por outro lado, a matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial. Por aqui, usa-se mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar e outras, as renováveis totalizam 47,4%, quase metade da matriz energética brasileira, vide Gráfico 3.

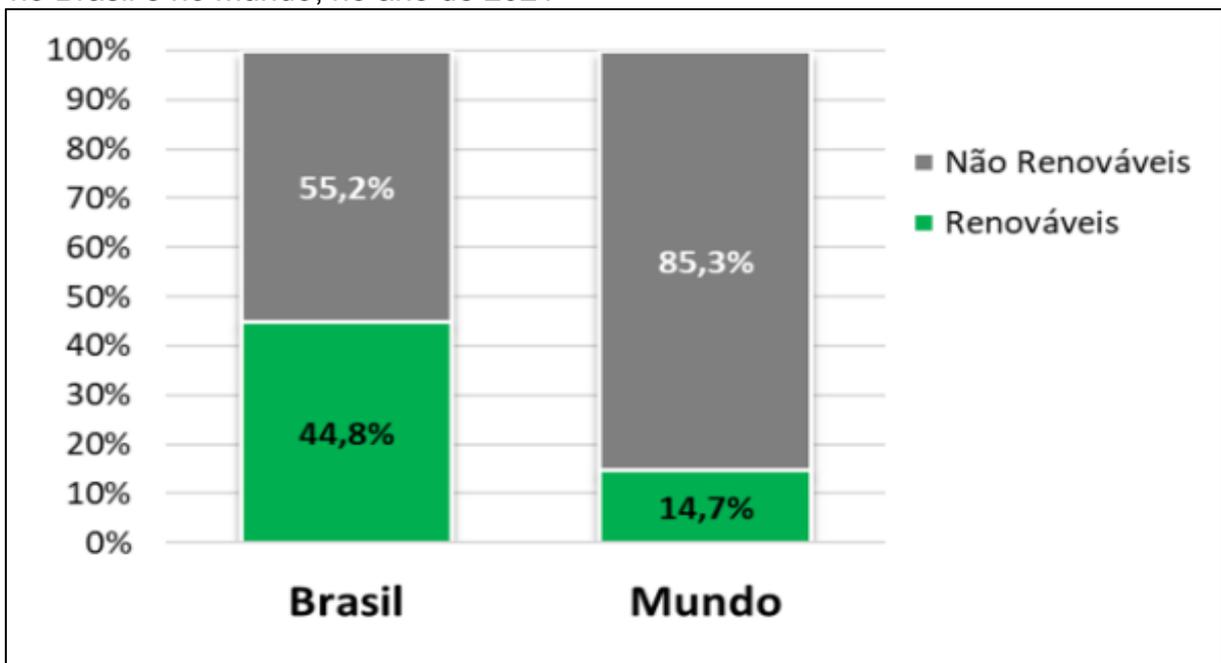
Gráfico 3 – Matriz energética brasileira



Fonte: Brasil, 2023.

No Gráfico 4, exibe-se o consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo, no ano de 2021, no qual se verifica que a matriz energética brasileira é mais renovável do que a mundial.

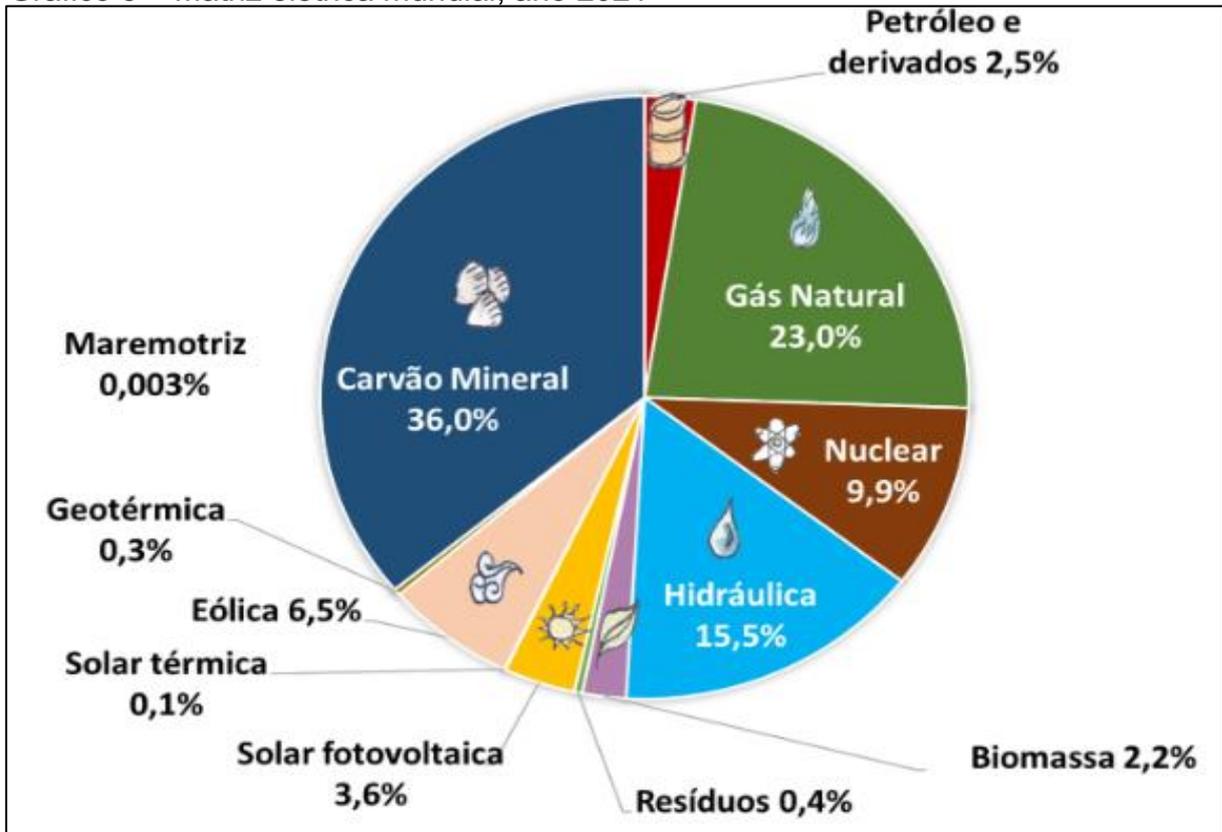
Gráfico 4 – Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis, no Brasil e no mundo, no ano de 2021



Fonte: Brasil, 2023.

Já a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo. A geração de energia elétrica no mundo é baseada, principalmente, em combustíveis fósseis como carvão e gás natural, em termelétricas. No Gráfico 5, demonstra-se a matriz elétrica mundial.

Gráfico 5 – Matriz elétrica mundial, ano 2021

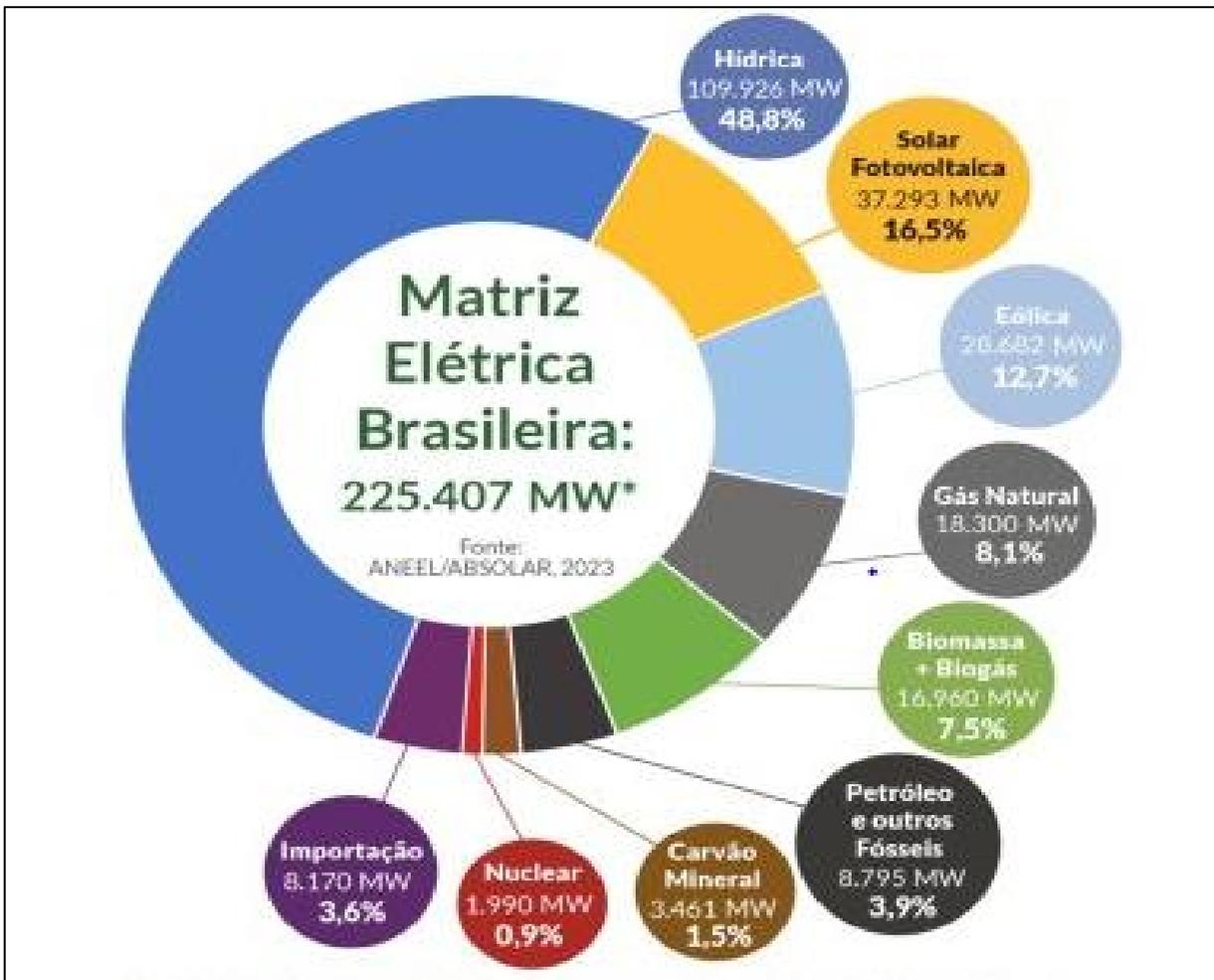


Fonte: Brasil, 2023.

A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas. A energia eólica e solar também vem apresentando crescimento constante e acelerado, contribuindo para que a matriz elétrica do país continue sendo, em sua maior parte, renovável.

O Gráfico 6, traz a representação da matriz elétrica brasileira, em 2022, incluindo lenha, biodiesel e outras renováveis, bem como incluindo óleo combustível, gás de coqueria, outras secundárias e outras não renováveis.

Gráfico 6 – Matriz elétrica brasileira, ano 2022



Fonte: Brasil, 2023.

Segundo a última atualização disponibilizada pela Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR), posição de 2023, houve avanço das energias renováveis, em especial, a energia solar, que elevou a sua participação para 16,5% da matriz energética brasileira.

Mesmo que a participação de fontes de energia fósseis continue sendo alta na matriz energética mundial, nota-se a existência de um processo de transição com significativas alterações estruturais nas matrizes energéticas do Brasil e de outros blocos do mundo (Brasil, 2021).

Dentre os segmentos para a transição e perspectivas até 2050, com foco na pauta de exportação e industrialização do nordeste brasileiro a partir das energias renováveis, encontra-se o hidrogênio verde, um combustível com alto potencial energético, produzido a partir de energias renováveis, como eólica, solar e hidráulica, em um processo no qual não há emissão de carbono e pode ser largamente utilizado em vários setores da atividade econômica, incluindo mineração e transportes. O H2V

é considerado o combustível e o insumo químico do futuro por não ser um agente poluente.

No que tange a característica do gás hidrogênio como um vetor energético, o seu papel e potencial possui semelhanças com o da eletricidade. A diferença crucial entre hidrogênio e a eletricidade é que o hidrogênio pode ser utilizado como um portador de energia química, composto de moléculas e não apenas elétrons, o que facilita o armazenamento e o transporte de forma estável e similar a outras fontes tais como o petróleo, carvão, biomassa e gás natural.

Desse modo, o hidrogênio pode apresentar uma grande vantagem para o sistema elétrico nacional e contribuir para o balanceamento da demanda (consumo) e a oferta (geração) energética (Castro *et al.*, 2021). Dentre tantos benefícios do H2V, Visedo e Pecchio (2019, p. 34) apontam:

A partir da utilização do hidrogênio, o excedente da geração de um volume de energia superior à demanda atual pode ser redirecionado para eletrolisadores capazes de produzir hidrogênio. Em momentos inversos, quando a demanda energética supera a capacidade da geração, o hidrogênio pode ser empregado para geração de energia elétrica por meio de pilha a combustível, suprimindo a diferença, com pouca perda de energia.

No que tange aos desafios, o Ministério de Minas e Energia informa que devido à sua baixa densidade e aos baixos pontos de ebulição e fusão, o manejo do hidrogênio é bastante desafiador; sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP) o hidrogênio é gasoso e inodoro, além de ter grande potencial de difusão e efusão (Brasil, 2022).

3.2 Demanda potencial de hidrogênio verde

Para prospectar o mercado potencial de hidrogênio verde, foram consultadas a literatura acerca do tema e os cenários delineados pela Agência Internacional de Energia. Adicionalmente, realizou-se a coleta de dados em sítios e Agências de Fomento de Governos dos Estados do Nordeste, pesquisa com o Banco do Nordeste de projetos em andamento que indicam um crescimento significativo desse setor, expostas no capítulo 5.

O hidrogênio, como um dos elementos mais abundantes do planeta, versátil e de baixo impacto ambiental, está emergindo como uma peça central na busca por soluções sustentáveis nos setores industriais e energéticos, com potencial de uso em

uma ampla gama de aplicações, oferecendo alternativas mais limpas e eficientes. A Agência Internacional de Energia destaca suas aplicações no setor de refino de petróleo, na indústria, no aquecimento doméstico, nos transportes e na geração de eletricidade (Araújo, 2023, p. 49).

O hidrogênio verde, por ser produzido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, como a solar e a eólica. É considerado uma forma limpa de produzir hidrogênio, pois não emite carbono durante o processo de produção. Importante ressaltar que a produção de hidrogênio verde ainda enfrenta desafios relacionados à escalabilidade, custos e infraestrutura necessária para sua distribuição e armazenamento.

Destaca-se que além do hidrogênio verde, há outros tipos, a exemplo, do cinza e do branco. De acordo com Miranda (2017) no que se refere ao hidrogênio cinza, por ser proveniente da reforma a vapor do gás natural metano este é considerado uma fonte não sustentável de hidrogênio, pois contribui para a intensificação das mudanças climáticas e para a degradação do meio ambiente. Por isso, é importante buscar alternativas mais limpas e sustentáveis para a produção de hidrogênio.

Miranda (2017) esclarece ainda que diferente do hidrogênio cinza, a principal forma de obtenção do hidrogênio branco é através da decomposição térmica de hidrocarbonetos, utilizando alta temperatura e pressão. Este processo produz hidrogênio puro, sem emissão de CO₂, o que o torna uma opção atraente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa na indústria e nos transportes.

Rodrigues (2018) em consonância com que expôs Miranda (2017) destaca que existem desafios a serem superados para a viabilidade do hidrogênio branco como fonte de energia. Um dos principais obstáculos é o custo elevado da produção em larga escala, especialmente em comparação com o custo dos combustíveis fósseis. Além disso, a infraestrutura necessária para armazenamento e distribuição do hidrogênio ainda é limitada e precisa ser expandida.

Existem ainda o hidrogênio preto (produzido por gaseificação do carvão mineral - antracito, sem CCUS), hidrogênio marrom (produzido por gaseificação do carvão mineral - hulha, sem CCUS), hidrogênio azul (produzido por reforma a vapor do gás natural, eventualmente, também de outros combustíveis fósseis, com CCUS), hidrogênio turquesa (produzido por pirólise do metano, sem gerar CO₂), hidrogênio musgo (produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou

biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS) e hidrogênio rosa (produzido com fonte de energia nuclear) (Bezerra, 2023).

Para Oliveira (2022, p. 49) as principais barreiras contra uma transformação rápida para uma economia global de hidrogênio de baixo carbono são de natureza técnica e econômica. É necessário desenvolver tecnologias com bom custo-benefício para transporte e armazenamento, por exemplo, a utilização de gasodutos no transporte de grandes quantidades de hidrogênio.

Oliveira (2022) ainda lembra que, embora os custos iniciais do hidrogênio verde possam ser um obstáculo, a perspectiva de aumento dos preços dos combustíveis fósseis e o progresso tecnológico oferecem um caminho promissor para tornar o hidrogênio verde uma alternativa competitiva.

Para que o hidrogênio desempenhe um papel significativo na transição energética, é fundamental que governos, indústrias e sociedade civil trabalhem juntos para desenvolver políticas e investimentos que incentivem a adoção dessa tecnologia limpa e promovam sua expansão em larga escala.

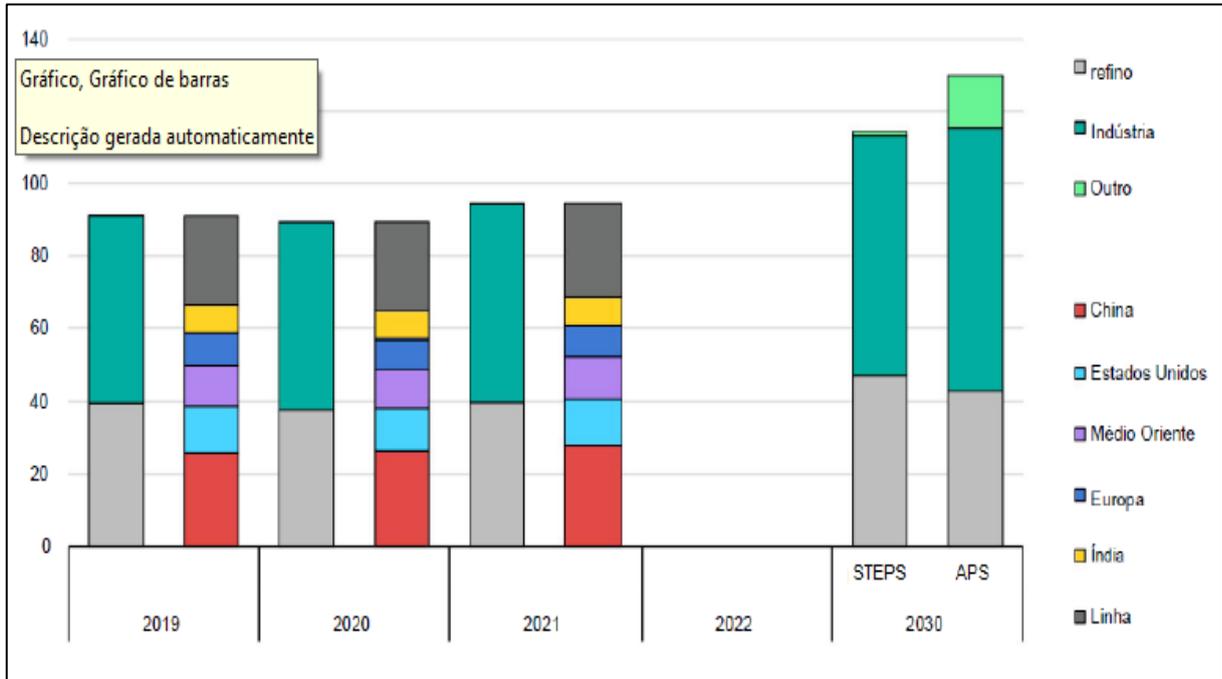
De acordo com a Agência Internacional de Energia, em 2021, a demanda global de hidrogênio atingiu 94 milhões de toneladas (Mt), ultrapassando os níveis pré-pandêmicos de 91 Mt, em 2019. Isso equivale a cerca de 2,5% do consumo mundial total de energia e a maior parte desse aumento foi impulsionada por usos tradicionais em refino e indústria (Araújo, 2023, p. 49).

Com o aumento da conscientização sobre a importância da transição para uma economia de baixo carbono, espera-se que a demanda por hidrogênio continue a crescer nos próximos anos, impulsionando investimentos em infraestrutura e tecnologias relacionadas ao uso do hidrogênio como combustível limpo e renovável.

Destaca-se o aumento da demanda para novas aplicações do hidrogênio, incluindo projetos siderúrgicos, uma nova frota de navios alemães alimentados com células de combustível de hidrogênio, uma centena de projetos na indústria naval e o uso de hidrogênio e amônia na geração de eletricidade (IEA, 2022).

De acordo com o que está apresentado no Gráfico 7, a demanda projetada varia entre 115 Mt e 130 Mt, até 2030, conforme o cenário utilizado. O Cenário de Políticas Declaradas da Agência Internacional de Energia (STEPS) reflete o aumento da demanda com base em uma análise setorial das políticas específicas em vigor e aquelas anunciadas por governos em todo o mundo (IEA, 2022, p. 19).

Gráfico 7 – Demanda por hidrogênio, por aplicação e região, período 2019-2030, em milhões de toneladas de H² – Cenários STEPS e APS



Fonte: IEA, 2022, p. 18.

A maior parte desse crescimento decorreria de aplicações tradicionais com pequena demanda (menos de 2 Mt) para novos usos ou substituição gradual de hidrogênio de origem fóssil em usos convencionais.

Para Greener (2021), as Políticas Declaradas (PD) representam as medidas e políticas já implementadas ou anunciadas pelos governos em relação à transição energética e às metas climáticas. Já o Cenário de Promessas Anunciadas (APS) retrata as promessas e compromissos feitos pelos países, mas que ainda não foram implementados ou não possuem uma legislação específica para sua efetivação.

Por outro lado, o APS assume que todos os compromissos climáticos feitos pelos governos em todo o mundo e metas de emissão zero a longo prazo, serão integralmente cumpridos e no prazo estabelecido. Segundo a perspectiva do APS, a demanda de hidrogênio poderia atingir 130 Mt até 2030, com aproximadamente 25% desse total destinado a novas aplicações e ao uso de hidrogênio de baixa emissão em aplicações tradicionais (Araújo, 2023).

Em resumo, tanto o cenário de demanda reprimida quanto o de promessas anunciadas apresentam perspectivas diferentes para o futuro do mercado de hidrogênio. Porém, ambos ressaltam a importância do hidrogênio como uma alternativa viável e importante na transição energética para uma economia de baixo

carbono, com perspectivas crescentes dessa matriz sustentável de energia para o planeta.

3.3 Oferta potencial de hidrogênio verde

Examinou-se o potencial de exportação de hidrogênio, levando em consideração características específicas de regiões com excedentes na produção desse gás, como a disponibilidade de recursos renováveis e infraestrutura adequada. Essa análise tem como objetivo fornecer uma visão das oportunidades no mercado em rápida evolução do hidrogênio verde.

O estudo da IEA (2022) afirma que a produção atual de hidrogênio se dá predominantemente com o uso de gás natural, sem a captura, utilização e armazenamento de carbono, representando 62% da produção, em 2021.

O hidrogênio também é gerado como subproduto do processo de reforma da nafta, em refinarias, correspondendo a 18%, e é posteriormente utilizado em outros processos, como hidrocraqueamento e dessulfuração. A produção de hidrogênio a partir do carvão foi responsável por 19% da produção global, em 2021, principalmente, na China. Pequenas quantidades de óleo (menos de 1%) também foram usadas para produzir hidrogênio.

A produção de hidrogênio de baixas emissões representou menos de 1 Mt, 0,7% da produção total, em 2021, sendo que a maior parte desse hidrogênio foi obtido a partir de combustíveis fósseis com CCUS, enquanto apenas 35 mil toneladas de hidrogênio foram produzidas via eletrólise da água. Apesar de sua pequena quantidade, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água aumentou quase 20% em relação a 2020, refletindo a crescente implantação de eletrolisadores de água como fonte de produção de hidrogênio (IEA, 2022).

É previsto que o rápido crescimento da capacidade de eletrolisadores continue e se intensifique nos próximos anos. De acordo com a Agência Internacional de Energia, “atualmente, cerca de 460 projetos de eletrolisadores estão em fase de desenvolvimento ou construção em todo o mundo” sendo que cerca de 40% dessa capacidade está concentrada na China e aproximadamente um terço está localizada na Europa, a maioria projetos-piloto ou demonstração da tecnologia. Embora o tamanho médio das plantas de eletrolisadores que entraram em operação em 2021 fosse de 5 MW, a média de novas instalações pode chegar a cerca de 260 MW em 2025 e na escala de gigawatts até 2030 (IEA, 2022, p. 75).

À medida que a capacidade de eletrolisadores aumenta, com mais projetos em desenvolvimento e testes de novas tecnologias, é crucial considerar as alternativas operacionais ao comparar diferentes formas de produção de hidrogênio de baixa emissão.

A produção de eletricidade a partir de fontes renováveis como a energia solar e eólica é intermitente e depende das condições climáticas, da incidência da luz solar e do vento. Isso significa que a geração de eletricidade para alimentar os eletrolisadores pode ser instável, levando a flutuações na produção de hidrogênio e, portanto, elevando os custos operacionais (IEA, 2020, p. 205; IEA, 2022, p. 95).

A Agência Internacional de Energia menciona diferentes estratégias para enfrentar a variabilidade do fornecimento de energia renovável, dentre os quais citam-se:

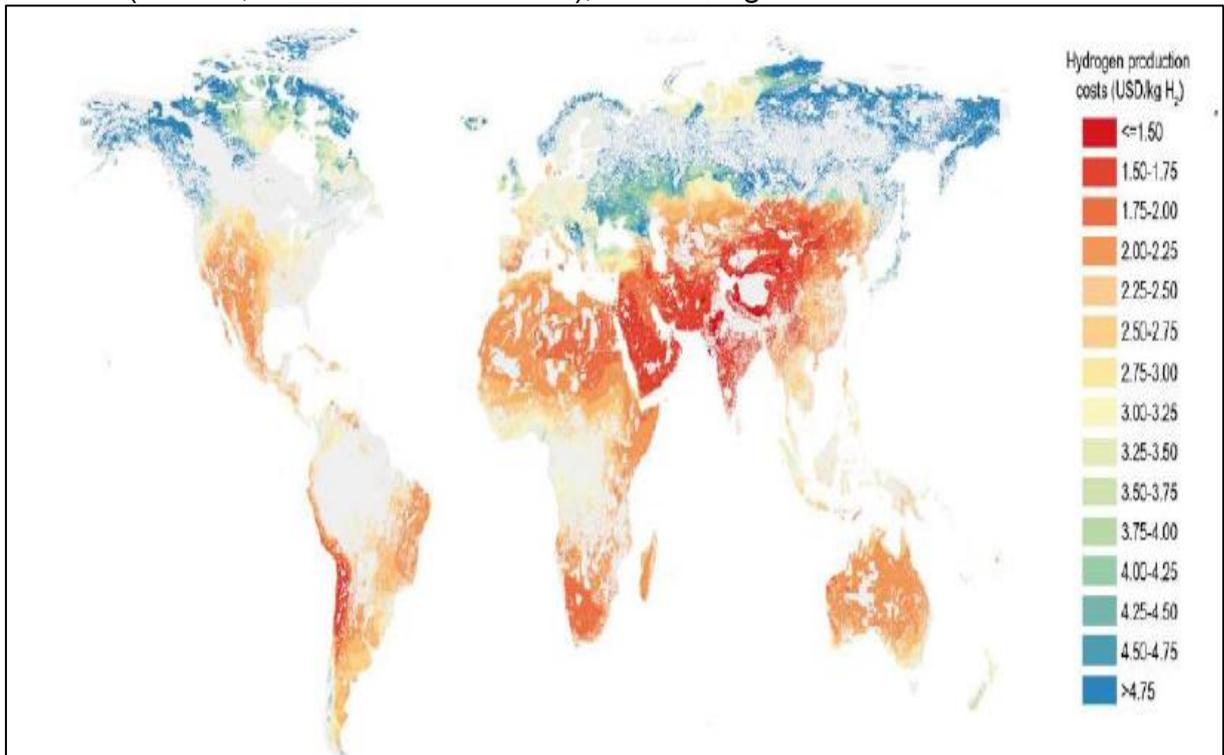
- a) A combinação de diferentes fontes renováveis, integrando várias fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, pode ajudar a compensar a variabilidade na geração de energia e garantir um fornecimento mais estável de hidrogênio renovável.
- b) O armazenamento de energia é essencial para garantir um suprimento contínuo de hidrogênio verde, mesmo quando a geração de energia renovável é intermitente. Tecnologias de armazenamento, como baterias, hidrogênio comprimido e sistemas de armazenamento térmico, podem ajudar a suavizar a variabilidade do fornecimento de energia renovável.
- c) A utilização de fontes de energia de baixa emissão da rede em momentos de baixa geração de energia renovável, fontes de energia de baixa emissão da rede, como gás natural com captura e armazenamento de carbono, pode ser utilizadas para garantir um fornecimento contínuo de hidrogênio renovável.

Portanto, a garantir a estabilidade do fornecimento de energia e do hidrogênio verde será fundamental para impulsionar a transição para um sistema de energia mais sustentável e de baixa emissão de carbono.

A Agência Internacional de Energia produziu análises de custos considerando restrições operacionais para a produção de hidrogênio a partir de energia solar e eólica para a síntese de amônia em diferentes locais, onde fatores de carga mínimos foram impostos para garantir operações econômicas.

A análise considerou o custo de capital (*Capital Expenditure - Capex*), os custos operacionais (*Operational Expenditure - Opex*) e o custo da energia necessária para o processo de eletrólise o que resultou numa ampla faixa de custos variando entre US\$ 1,50/kg e US\$ 4,75/kg de hidrogênio produzido (IEA, 2022, p. 97), conforme pode ser visto na figura 1.

Figura 1 – Custos projetados de produção de hidrogênio verde, ano 2030, em sistemas híbridos (solares, fotovoltaicos e eólicos), em US\$/kg H²



Fonte: IEA, 2022, p. 97.

Visto isso, é notório que o Brasil possui uma enorme extensão territorial e recursos naturais abundantes que podem ser aproveitados para a produção de hidrogênio verde. A disponibilidade de terras para a instalação de parques solares e eólicos, bem como a existência de vastas reservas de água e biomassa são vantagens competitivas que colocam o Brasil em uma posição estratégica no cenário global da transição energética.

Outro aspecto importante é o potencial de geração de empregos e desenvolvimento econômico associado à produção de hidrogênio verde no Brasil. A criação de novas cadeias produtivas e a expansão da indústria de energias renováveis podem impulsionar a economia do país e gerar oportunidades para a formação de mão de obra especializada.

Assim, diante do que fora explanado, o capítulo a seguir trata de forma específica do objeto da pesquisa que versa sobre a exportação e industrialização do nordeste brasileiro a partir das energias renováveis, tendo como aporte os incentivos fiscais e projetos que são financiados pelo Banco do Nordeste do Brasil.

4 INDUSTRIALIZAÇÃO DO NORDESTE BRASILEIRO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Antes de se adentrar no tema específico da industrialização da região Nordeste do Brasil a partir das oportunidades geradas com a disponibilidade das energias renováveis, explora-se um pouco sobre a Cadeia Global de Valor, para melhor entendimento do tema, e o papel esperado do Brasil nesta conjuntura.

4.1 Conceituação de Cadeias Globais de Valor

Na compreensão de Araújo (2023, p. 17), as Cadeias Globais de Valor têm sua origem com a ideia de cadeia de valor proposta pelo professor Michael Porter, da *Harvard Business School*, nos anos 1980, em seus estudos iniciais acerca do processo de internacionalização das empresas que alimentaria a globalização.

Porter (1989, p. 33) destaca que, toda empresa é uma reunião de atividades que são executadas para projetar, produzir, comercializar, entregar e sustentar seu produto. Todas estas atividades podem ser representadas, fazendo-se uso de uma cadeia de valor.

A análise da cadeia de valor identifica as atividades estrategicamente relevantes de uma empresa para compreender os custos e as fontes potenciais de diferenciação. A vantagem competitiva é alcançada quando uma empresa executa essas atividades de forma mais eficiente ou superior em relação aos concorrentes e “vem da maneira pela qual as empresas se organizam e realizam as atividades em separado” (Porter, 1993, p. 51).

Dentro deste contexto pode-se compreender que a cadeia de valor está, portanto, intrinsecamente relacionada dentro de um sistema que envolve os relacionamentos entre fornecedores, empresas, canais de distribuição e clientes, de forma interdependente:

A cadeia de valores de uma companhia, para competir numa determinada indústria, está inserida num contexto mais amplo de atividades que chamo de sistema de valores. O sistema de valores inclui fornecedores que proporcionam insumos (como matéria-prima, componentes, maquinaria e serviços comprados) para a cadeia de valores. No caminho até o comprador final, o produto da empresa passa, com frequência, pelas cadeias de valores dos canais de distribuição (PORTER, 1993, p. 53).

Araújo (2023) destaca que a internacionalização das empresas e a formação de Cadeias Globais de Valor envolve a busca por vantagem comparativa ou vantagem competitiva em nível global, aproveitando recursos e oportunidades de mercado além das fronteiras nacionais, pois, de acordo com Porter (1993, p. 73), “à medida que a globalização da competição se tornou amplamente reconhecida, a atenção concentrou-se nas vantagens do sistema e nos benefícios da localização em outras nações”.

As Cadeias Globais de Valor são mais abrangentes, englobando não só as atividades internas das empresas, mas também as atividades de fornecedores, distribuidores e prestadores de serviços ao redor do mundo. Isso cria uma complexa rede de interações entre diferentes partes, resultando em uma maior integração e interdependência das economias globais.

Essa nova abordagem das Cadeias Globais de Valor tem levado as empresas a reavaliarem suas estratégias de negócios, buscando eficiências e competitividade em escala global. Além disso, as empresas estão cada vez mais focadas em aspectos como sustentabilidade, responsabilidade social e transparência em suas operações, devido ao maior escrutínio do público e das autoridades regulatórias.

Portanto, as Cadeias Globais de Valor representam um novo paradigma na forma como as empresas operam e competem em um mundo globalizado, exigindo uma abordagem mais integrada e colaborativa entre os diversos participantes da cadeia de valor. Essa mudança tem o potencial de criar oportunidades significativas para as empresas que conseguirem se adaptar e inovar nesse novo cenário econômico.

A definição de Cadeia Global de Valor está, portanto, associado à fragmentação geográfica do processo produtivo, aproveitando-se de vantagens locais – domínio tecnológico, custo e especialização da mão-de-obra, disponibilidade de insumos, regulação ambiental e trabalhista, dentre outros – de cada país. O Leste e o Sudeste asiático foram as regiões que mais se beneficiaram desse processo de produção em rede, permitindo o crescimento da atividade e modernização da economia (Pinto; Fiani; Corrêa, 2015, p. 9).

Essa fragmentação geográfica do processo produtivo envolve a divisão das etapas de produção em diversos locais ao redor do mundo, de forma a aproveitar as vantagens competitivas de cada país. Essas etapas incluem desde o *design* e

desenvolvimento de produtos até a distribuição e comercialização, passando pela fabricação e montagem em diferentes partes do globo.

Dessa forma, as empresas que adotam a estratégia da Cadeia Global de Valor conseguem reduzir custos, ganhar eficiência e flexibilidade, além de acessar novos mercados e aumentar a competitividade. Isso gera benefícios tanto para as empresas envolvidas na cadeia, quanto para os países que participam do processo, promovendo o desenvolvimento econômico e a integração global.

A industrialização atualmente é diferente da observada nas décadas de 1950, 1960 e 1970, estruturada a partir das cadeias locais de valor e que tinha por estratégia internalizar completamente o progresso tecnológico. Hoje, com o fatiamento do processo produtivo e sua fragmentação geográfica, ficou mais difícil um único país deter todos os elos da cadeia de produção industrial. No geral, um país somente consegue se inserir em algumas etapas de produção de uma cadeia global de produção porque tende a perder economias de escala (Pinto; Fiani; Corrêa, 2015, p. 11).

Além disso, a globalização e as tecnologias de informação e comunicação permitiram uma integração maior entre os países, facilitando o comércio internacional e a cooperação entre diferentes agentes econômicos. Isso levou a uma maior especialização produtiva e a uma maior interdependência entre os países, tornando a industrialização mais complexa e interconectada.

Atualmente, a competitividade industrial está mais relacionada à capacidade de integrar-se em Cadeias Globais de Valor, aproveitando as vantagens comparativas de cada país e buscando parcerias estratégicas com outros agentes econômicos. Nesse sentido, a inovação, a capacitação tecnológica e a flexibilidade para se adaptar às mudanças no mercado são essenciais para o sucesso da industrialização no cenário global atual (Oliveira, 2020).

A atual abordagem das Cadeias Globais de Valor que fortalece a observância a aspectos como sustentabilidade, responsabilidade social e transparência é condizente com critérios não financeiros que são cada vez mais considerados essenciais para avaliar o desempenho de uma empresa e integram práticas ambientais, sociais e de governança (ASG), fundamentais para o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade corporativa.

As práticas ambientais incluem a gestão responsável dos recursos naturais, a redução da pegada de carbono, a conservação da biodiversidade e a adoção de

tecnologias limpas. Empresas que se comprometem com a sustentabilidade ambiental buscam minimizar seu impacto no meio ambiente e promover a eficiência energética.

No âmbito social, as empresas devem se preocupar com questões como direitos humanos, diversidade e inclusão, saúde e segurança dos funcionários, relações com a comunidade e práticas trabalhistas justas. Investir em programas sociais, promover a igualdade de gênero e garantir condições de trabalho adequadas são aspectos-chave da responsabilidade social corporativa.

A governança corporativa refere-se às estruturas e processos que garantem a transparência, a prestação de contas e a equidade nas decisões empresariais. Isso envolve a composição do conselho de administração, a remuneração dos executivos, a divulgação de informações financeiras e a conformidade com as leis e regulamentos. Uma governança sólida é essencial para a confiança dos investidores e a sustentabilidade a longo prazo da empresa.

Em resumo, a integração eficaz de práticas ambientais, sociais e de governança não apenas beneficia a empresa em termos de reputação e desempenho financeiro, mas também contribui para um mundo mais sustentável e justo.

Dessa forma, investir na liderança da cadeia de uma fonte de energia relevante e adotar práticas de ASG podem trazer benefícios econômicos, políticos e estratégicos significativos para o país. Além disso, ao garantir a segurança na disponibilidade desse insumo crítico, o país também contribuirá para sua própria estabilidade econômica e energética.

Portanto, é importante que o Brasil avalie suas vantagens competitivas e busque posicionar-se estrategicamente nas Cadeias Globais de Valor, especialmente na área de energia, objeto deste estudo, a fim de maximizar seus benefícios e influência no cenário internacional, contribuindo para a industrialização do país.

4.2 A industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis

O Brasil é visto como tendo um papel marginal nas Cadeias Globais de Valor, fornecendo, principalmente, recursos naturais agrícolas e minerais e sendo um relevante provedor de *commodities* para o mercado global, mas, nos últimos anos, em função da aceleração do processo de transição energética rumo à descarbonização, as energias renováveis ganham destaque na atração de investimento estrangeiro direto (IED), sendo responsável por 805 negócios, em 2021, ou dois terços do total de

projetos, com um crescimento de 52%, em relação a 2020 (*United Nations Conference on Trade and Development*, 2022, p. 31). Assim, trata-se de uma Cadeia Global de Valor emergente, seja pelos imperativos da descarbonização da economia, seja pelo choque conjuntural dos preços das *commodities* energéticas causado pelo conflito da Rússia com a Ucrânia.

Essa mudança no cenário global de investimentos tem potencial de impulsionar o Brasil para um papel mais relevante nas Cadeias Globais de Valor, especialmente no setor de energias renováveis. Com sua vasta disponibilidade de recursos naturais e potencial para geração de energia limpa, o país pode se destacar como um importante fornecedor de tecnologias e soluções para a transição energética mundial.

Acrescente-se que o investimento em energias renováveis pode contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável do Brasil, gerando empregos, promovendo a inovação e ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Com o apoio de políticas públicas eficazes e parcerias estratégicas com empresas internacionais, o país pode se tornar um protagonista no mercado global de energia limpa.

Logo, é fundamental que o Brasil aproveite essa oportunidade para fortalecer sua presença nas Cadeias Globais de Valor, investindo em tecnologias limpas, capacitação de mão de obra e infraestrutura adequada. Dessa maneira, o país pode se posicionar como um *player* chave na transição para uma economia mais sustentável e competitiva a nível mundial.

Nas circunstâncias apresentadas, desponta a indústria de produção de hidrogênio verde. Lameiras (2019, p. 17-18) discute a importância do hidrogênio como fonte de energia e como ele pode ser um agente disruptivo no sistema energético global, assim como foi a aplicação do petróleo como fonte de energia no final do século XIX.

Portanto, a nascente indústria de produção de hidrogênio verde tem um grande potencial de transformar o sistema energético global, oferecendo uma alternativa limpa e sustentável para a demanda crescente por energia. Com investimentos e políticas adequadas, o hidrogênio verde pode se tornar uma peça fundamental na transição para uma economia de baixo carbono.

Ainda de acordo com Lameiras (2019, p. 18), a necessidade da transição energética para fontes descarbonizadas transforma o hidrogênio e outras fontes

renováveis de energia em fatores de competitividade econômica e o Brasil tem investido em pesquisas relacionadas ao hidrogênio desde os anos 1980, visando participar dessa nova economia.

A Agência Internacional de Energia possui opinião semelhante ao afirmar que a mudança para uma economia baseada em hidrogênio é vista como uma necessidade para reduzir as emissões de gases do efeito estufa e alcançar a descarbonização do sistema energético mundial (IEA, 2023, p. 21).

De acordo com Gurlit *et al* (2021), estudo da empresa de consultoria *McKinsey & Company* sobre as potencialidades do hidrogênio de baixo carbono para o Brasil, concorda com o potencial do país para se destacar como um dos líderes mundiais nesse setor. Com 85% de sua matriz energética de fontes renováveis, a capacidade de expansão das matrizes eólica e solar com baixo custo e a proximidade estratégica com grandes mercados consumidores de hidrogênio verde, como a Europa e os Estados Unidos, o Brasil pode gerar entre US\$ 15 bilhões e US\$ 20 bilhões em hidrogênio verde até 2040, podendo exportar entre US\$ 4 bilhões e US\$ 6 bilhões anuais. No entendimento de Araújo (2023, p. 73):

O hidrogênio verde emerge como uma oportunidade para o Brasil, conferindo-lhe a possibilidade de se estabelecer como um destacado protagonista mundial na produção e exportação desse recurso sustentável. Para efetivar essa visão ambiciosa, uma estratégia integral respaldada por investimentos adequados se faz essencial. Nesse sentido, é fundamental o entendimento da Cadeia Global de Valor dessa atividade para nortear as políticas públicas e investimentos, principalmente no que diz respeito à infraestrutura e ciência, tecnologia e inovação (Araújo, 2023, p. 73).

A Cadeia Global de Valor do hidrogênio verde compreende diversas etapas, desde a produção até a distribuição e utilização final. Na produção, a partir da eletrólise da água, o hidrogênio é obtido com uso de eletricidade limpa, como solar ou eólica. Posteriormente, o gás hidrogênio é comprimido e ou liquefeito para facilitar o armazenamento e transporte. Na última etapa, ocorre a distribuição e utilização do hidrogênio em setores como transporte, indústria e energia.

Para alcançar o status de protagonista mundial na produção e exportação de hidrogênio verde, o Brasil precisa investir em infraestrutura para produção, armazenamento e transporte, bem como em pesquisa e desenvolvimento para aumentar a eficiência e reduzir os custos dessas tecnologias. É importante, ainda, estabelecer parcerias internacionais para acesso a mercados globais e incentivar a formação de capital humano qualificado na área.

A mudança climática e fatores geopolíticos abriram uma janela de oportunidade para que países com vantagens comparativas na produção de energia limpa e renovável possam atrair plantas manufatureiras intensivas no consumo de energia em seus processos produtivos e com compromisso de descarbonização. Isso constitui a ideia central do movimento locacional intitulado *Powershoring* que foi originalmente tratado em dois artigos de opinião de autoria de Jorge Arbache (Arbache; Esteves, 2023).

Essa estratégia de *Powershoring* vem se tornando cada vez mais importante diante da crescente pressão da sociedade e dos governos por redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a volatilidade dos preços de energia fóssil e a busca por segurança energética também têm influenciado as empresas a buscarem locais com energia limpa e renovável para suas operações.

Os países que possuem vantagens comparativas na produção de energia limpa, como, vento, sol, água, biomassa, entre outros, estão se tornando destinos atrativos para as empresas que buscam reduzir suas emissões de carbono e operar de maneira mais sustentável. Isso traz benefícios tanto para as empresas, que podem reduzir custos e melhorar sua imagem junto aos consumidores conscientes, quanto para os países, que podem atrair investimentos e gerar empregos na área de energia renovável.

Dessa forma, o *Powershoring* se apresenta como uma oportunidade para promover a transição para uma economia mais verde e sustentável, ao mesmo tempo em que estimula o desenvolvimento econômico e social dos países que investem em energia limpa e renovável. Esta tendência de *Powershoring* pode se consolidar ainda mais no futuro, à medida que as questões ambientais e energéticas se tornam cada vez mais prementes e as empresas buscam operar de maneira mais responsável e eficiente. É nesse sentido o posicionamento de Arbache e Esteves (2023, p. 3):

A proposta está associada aos compromissos firmados pelo Acordo de Paris, que buscam combater os efeitos das mudanças climáticas e a redução das emissões de gases de efeito estufa. A implicação prática foi o estabelecimento de metas ambiciosas para a descarbonização das economias e grandes desafios de *compliance* por parte das empresas. Contudo, aqui não há somente um desafio de conformidade. A carbonização gera externalidades negativas que, atualmente, já dispõem de mercados organizados para precificá-las por meio de créditos compensatórios, que propiciam a seus detentores o direito de poluir. O problema é que, a depender do cenário prospectivo para tais mercados, o preço para a compensação de carbono poderá crescer consideravelmente nos próximos anos. Assim, o problema das metas de descarbonização é duplo: a conformidade ambiental

e o gerenciamento de riscos e passivos ambientais (Arbache; Esteves, 2023, p. 3).

Ainda no que diz respeito ao gerenciamento de riscos, a experiência mostra que os efeitos econômicos adversos da pandemia do COVID-19, o aumento de eventos climáticos extremos e de eventos geopolíticos de grandes dimensões têm revelado que os riscos associados à concentração geográfica da produção devido a estratégias como o *Offshoring* praticadas por empresas multinacionais por décadas foram subestimados, na melhor das hipóteses. A estratégia de *Offshoring* implicou, de um lado, em elevados ganhos de produtividade decorrentes das economias de escala e de escopo.

Diante desse cenário, a diversificação geográfica da produção e a adoção de estratégias mais resilientes, como o *Nearshoring* (transferência da produção para países mais próximos), têm se mostrado fundamental para reduzir os riscos associados à concentração geográfica da produção. Dessa forma, as empresas buscam minimizar os impactos de eventos adversos, mantendo a eficiência e competitividade de suas operações. Acerca dos impactos, Arbache e Esteves (2023, p. 5) ressaltam:

De outro lado, a concentração da produção em alguns poucos países de destino do *Offshoring* elevou os riscos logísticos e de intermitências produtivas, implicando em episódios não isolados de desabastecimentos generalizados de máquinas, equipamentos, partes, peças, produtos e insumos e até em perdas permanentes ou quase permanentes de participação de mercado de empresas (Arbache; Esteves, 2023, p. 5).

No que diz respeito ao direcionador de custos, dois aspectos merecem destaque. O primeiro é que a estratégia do *Offshoring*, que é focada na minimização de custos, especialmente o de mão de obra, valorizou vantagens comparativas de países como a China e outros da Ásia. Essa ordem se expandiria dando lugar a uma crescente interdependência econômica, comercial e de investimentos cujos benefícios seriam compartilhados por muitas pessoas mundo afora na forma de bens de consumo a preços baixos. Contudo, os salários reais em alguns daqueles países têm se elevado de forma persistente (Arbache; Esteves, 2023, p. 5).

Questões relacionadas à ética e responsabilidade social também podem surgir, uma vez que a transferência de produção para países com legislações trabalhistas mais flexíveis pode resultar em condições precárias de trabalho para os funcionários. Isso pode gerar críticas por parte de consumidores e da sociedade em geral, prejudicando a imagem da empresa e afetando suas vendas e reputação.

Portanto, é importante que as empresas que adotam o *Offshoring* estejam atentas a esses aspectos e busquem equilibrar a busca por redução de custos com a garantia da qualidade, produtividade e responsabilidade social em suas operações globais.

O segundo ponto é que a estratégia do *Powershoring* tem se beneficiado da emergência da mudança climática e da redução dos custos operacionais de produção de energias limpas e renováveis. Por exemplo, segundo a International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), o custo nivelado (*Levelized Cost of Energy* - LCOE) da energia solar fotovoltaica foi reduzido em 88% no período 2010-2021 (US\$ 0,417/kWh em 2010 e US\$ 0,048/kWh em 2021). Já o LCOE da energia eólica *Onshore* foi reduzido em 68% (US\$ 0,102/kWh em 2010 e US\$ 0,033/kWh em 2021). Finalmente, o LCOE da energia eólica *Offshore* foi reduzido em 60% (US\$ 0,188/kWh em 2010 e US\$ 0,075/kWh em 2021). O fato é que, neste momento, a competitividade das energias limpas e renováveis é crescente em relação as energias fósseis e é provável que essa competitividade siga crescendo (Arbache; Esteves, 2023, p. 7).

Isso significa que as empresas que adotam a estratégia do *Powershoring* podem se beneficiar não apenas reduzindo suas emissões de carbono, mas também reduzindo seus custos operacionais ao adotar fontes de energia mais baratas e sustentáveis. Além disso, a adoção de energias limpas e renováveis também pode ser uma vantagem competitiva para atrair consumidores preocupados com a sustentabilidade e conscientização ambiental.

Portanto, a combinação da estratégia do *Powershoring* com a adoção de energias limpas e renováveis pode ser uma solução eficaz para empresas que buscam reduzir suas emissões de carbono, cortar custos operacionais e se diferenciar no mercado. É importante que as empresas considerem essas mudanças no cenário energético ao desenvolver suas estratégias de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

Os estudos mostram que a combinação de resiliência com eficiência já está se tornando o principal direcionador da localização industrial em nível global. A resiliência é elemento novo nessa agenda e está ganhando centralidade na geografia internacional dos investimentos e, em especial, nas estratégias corporativas de empresas com presença global que buscam segurança produtiva e de mercado, para além da eficiência. As vantagens comparativas refletidas nos custos de produção da

energia verde deverão ganhar influência na tomada de decisão, com destaque para setores intensivos em energia e que mais necessitam descarbonizar. Ao que tudo indica, a desconcentração e a diversificação da geografia das plantas se tornarão temas críticos da agenda de investimento nessa primeira metade do século XXI (Arbache; Esteves, 2023, p. 7).

A resiliência não se restringe apenas a questões ambientais, mas também abrange aspectos relacionados à segurança cibernética, instabilidade política, pandemias e outras ameaças que podem impactar a produção e distribuição de bens e serviços. Nesse sentido, as empresas estão começando a considerar esses fatores de risco ao decidir onde investir em novas plantas industriais.

As informações e evidências são de que países da região da América Latina e Caribe (ALC), com destaque para a região Nordeste do Brasil, desfrutam de amplas vantagens comparativas para se beneficiarem da estratégia de *Powershoring* enquanto provedores de energias limpas e renováveis, em sistemas seguros, econômicos e não intermitentes. Já pelo lado da demanda, avalia-se as características de projetos de investimento e de regiões com maior potencial de participação na estratégia de *Powershoring*.

No entanto, é importante destacar que ainda existem desafios a serem superados para que a região realmente se torne um *hub* de *Powershoring*. Entre esses desafios estão a necessidade de fortalecer a infraestrutura de transmissão, aprimorar os marcos regulatórios e incentivar a inovação tecnológica.

Adicionalmente, é crucial que o Brasil desenvolva parcerias estratégicas e promova a integração energética na região. Isso inclui a criação de sistemas de mercado eficientes e a adoção de políticas públicas que incentivem o investimento em energias limpas e renováveis.

O *Powershoring* tem uma característica distintiva e fundamental: combina *compliance* ambiental com desenvolvimento econômico. Ao fazer das energias limpas a engrenagem da estratégia, o *Powershoring* fomenta investimentos na agenda do clima e acelera a transição energética e a descarbonização da produção em nível nacional, regional e global. De outro lado, a atração de plantas manufatureiras voltadas para exportação promove o crescimento do PIB, o aumento do investimento, da tecnologia e da inovação, o aumento do emprego e a inserção da região em Cadeias Globais de Valor, promove as pequenas e médias empresas, a arrecadação de impostos, o desenvolvimento local e regional e, finalmente, ganhos generalizados de produtividade (Arbache; Esteves, 2023, p. 14).

Importa expor que o *Powershoring* pode contribuir para a criação de empregos e o desenvolvimento sustentável nos países de origem das empresas beneficiadas, ao incentivar a produção de bens e serviços com menor impacto ambiental e maior eficiência energética. Isso pode fortalecer a economia local e a capacidade de inovação desses países, tornando-os mais competitivos no mercado global.

O *Powershoring* também pode ajudar a promover a cooperação internacional e a troca de conhecimentos e tecnologias entre os países envolvidos, criando oportunidades para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios energéticos globais. Em resumo, o *Powershoring* pode ser uma ferramenta poderosa para promover o desenvolvimento sustentável e a cooperação internacional no contexto da transição energética.

Neste sentido, grandes grupos econômicos têm começado a rever as suas estratégias de localização, trazendo o tema para a lista de prioridades estratégicas. Este movimento é amplamente justificado, mesmo porque, tem crescido a percepção de que a reversão da concentração geográfica da produção e de seus respectivos riscos não necessariamente implicam em perda de vantagens competitivas em custos (CBRE, 2020).

A possibilidade de se reduzir riscos, sem necessariamente incorrer em custos totais adicionais (operacionais e financeiros) pode parecer “bom demais para ser verdade”, uma vez que envolve uma decisão econômica sem *tradeoffs*, ou seja, um verdadeiro “almoço grátis” (*free lunch*). Contudo, esta possibilidade não deveria ser interpretada desta maneira, ao menos não nesta situação específica. Tal possibilidade reflete exatamente o pilar da Teoria Moderna do Portfólio (TMP), que mostra que a diversificação de riscos em portfólios talvez seja o único “almoço grátis” que a realidade econômica pode proporcionar.

Essa redução de riscos não implica necessariamente em custos adicionais, pois a diversificação pode ser feita sem a necessidade de investir mais dinheiro. Ao contrário, diversificar o portfólio pode até mesmo reduzir os custos operacionais e financeiros, uma vez que o investidor pode se beneficiar de economia de escala ao investir em um número maior de ativos.

Assim, a diversificação de riscos em portfólios não é um “almoço grátis” no sentido de que não existem *tradeoffs* ou custos associados. Na verdade, é uma estratégia inteligente e eficaz para reduzir os riscos e maximizar os retornos dos

investimentos, sem a necessidade de incorrer em custos adicionais. Por isso, a TMP destaca a importância da diversificação como um dos principais princípios para construção de carteiras de investimentos sólidas e bem sucedidas. Arbache e Esteves (2023, p. 12) propõem:

A automação das operações produtivas tem reduzido a necessidade de grandes contingentes de trabalhadores do tipo “*blue collar*”, da mesma forma que o uso crescente de ciência de dados e inteligência artificial tem reduzido a necessidade de grandes contingentes de trabalhadores do tipo “*white collar*”, incluídos ali profissionais das áreas de STEM, dentre outras. Por outro lado, um aspecto merece ser destacado nessa discussão: a automação industrial, o treinamento de modelos de inteligência artificial (*machine learning* e *deep learning*) e a mineração de dados consomem e continuarão consumindo quantidades crescentes e nada desprezíveis de energia (Arbache; Esteves, 2023, p. 12).

Portanto, o *Powershoring* busca integrar todas essas variáveis de forma a garantir a sustentabilidade econômica e ambiental das operações produtivas. A escolha da localização das plantas produtivas deve levar em consideração não apenas os custos operacionais e logísticos, mas também a resiliência a choques e eventos externos, a acessibilidade a energias renováveis e limpas, a mitigação de impactos ambientais e o alinhamento com práticas de sustentabilidade.

Dessa forma, a tomada de decisão para a localização de plantas produtivas no cenário atual se torna mais complexa e desafiadora, mas também oferece oportunidades para empresas que buscam se destacar no mercado por meio da incorporação de estratégias mais sustentáveis e resilientes em suas operações.

A ideia de uma planta produtiva estar localizada onde a energia está disponível não é nova. Na realidade, o fato é que a indústria manufatureira foi originalmente concebida para estar fisicamente ligada à sua fonte de energia. Até a metade do século XIX, a segmentação espacial da produção de energia e da produção de bens não era tecnologicamente viável. A partir do desenvolvimento das tecnologias de geração, transmissão e distribuição de eletricidade essa rigidez locacional foi rompida.

A eletricidade, graças à sua grande transmissibilidade (deslocamento no espaço sem perdas) e flexibilidade (conversão simples e eficiente em calor, trabalho e iluminação), libertava as máquinas e ferramentas da restrição da localização, tornando a energia onipresente e colocando-a ao alcance de todos (Pinto; Fiani; Corrêa, 2015 p. 152).

Outro passo importante neste sentido (a onipresença da energia) foi o desenvolvimento das tecnologias de extração, produção, refino e transporte de

combustíveis fósseis. Na realidade, o petróleo originou a mais competitiva indústria energética e fundou a base tecno-energética do desenvolvimento do século XX (Pinto; Fiani; Corrêa, 2015).

A natureza tecnológica também tem um papel fundamental nesse novo protagonismo da localização das fontes de recursos energéticos. Com o avanço da tecnologia, as empresas têm mais opções de fontes de energia para escolher, como energias renováveis e soluções inovadoras de armazenamento de energia. Isso permite uma maior flexibilidade na localização das plantas produtivas e na estratégia de *Powershoring*, possibilitando uma maior eficiência e redução de custos.

Dessa forma, a reflexão e análise prévia dessas duas situações são essenciais para que as empresas possam tomar decisões estratégicas mais assertivas e alinhadas com as tendências do mercado global. O novo protagonismo da localização das fontes de recursos energéticos pode trazer benefícios tanto em termos de redução de custos como de sustentabilidade ambiental, tornando-se um fator chave para o sucesso e competitividade das empresas no cenário atual.

Primeiramente, fatores geopolíticos e geoeconômicos recentes têm ameaçado e, em algumas situações, até mesmo comprometido a logística da distribuição de energias tradicionais (combustíveis fósseis) reduzindo, assim, a segurança energética de importantes economias do globo, implicando em inflação de custos e riscos crescentes associados à descontinuidade de abastecimento energético residencial e industrial. Em segundo lugar, embora as energias limpas e renováveis ainda enfrentem desafios logísticos e de intermitência – o que implica numa espécie de “volta ao passado”, onde a rigidez locacional das plantas produtivas por questões energéticas era a regra – seus custos são declinantes e, neste momento, já se apresentam como alternativas altamente competitivas às energias tradicionais “onipresentes”. (Arbache; Esteves, 2023, p. 20).

Apesar dos custos de produção das energias solar e eólica terem diminuído consideravelmente, ainda é necessário um investimento inicial significativo para a instalação de painéis solares e turbinas eólicas e o custo de armazenamento de energia também é alto, o que pode impactar na viabilidade econômica dessas tecnologias.

Tendo em vista os vultosos recursos envolvidos nessas operações, a organização de um ambiente seguro e transparente se torna imprescindível para a atrair os investimentos estrangeiros em energias renováveis para o Brasil.

Desafio fundamental dentro do processo da transição energética se refere também ao aspecto político e regulatório, posto que, essa transição requer políticas públicas que incentivem a utilização dessas tecnologias e regulações que promovam

a integração dessas fontes na matriz energética. Concomitantemente, é importante garantir a segurança e estabilidade do sistema energético durante essa transição.

Barbosa (2021) esclarece que os marcos regulatórios são um conjunto de leis, regras e regulamentos destinados a regular e controlar as atividades de um determinado setor ou indústria. Estas regulamentações podem abranger aspectos como proteção ambiental, segurança do consumidor, concorrência de mercado, entre outros. Seu objetivo é garantir o funcionamento eficiente e equitativo da indústria, protegendo os interesses de todos os atores envolvidos.

Destarte, esse conjunto de obstáculos, ou seja, políticas públicas e falta de regulamentação, implica numa ausência de complementaridade entre a capacidade de produzir e a capacidade de transportar energias limpas e renováveis. Os recursos para a produção são abundantes (em alguns lugares mais do que em outros) e os avanços tecnológicos e as economias de escala têm reduzido os seus requerimentos de capital e custos incrementais. Contudo, as mesmas facilidades encontradas na produção não são encontradas no transporte e transmissão de tais energias (Marques, 2023, p. 21).

Sobre essa discussão, Guimarães (2021, p. 28), complementa que:

A questão da intermitência dessas energias limpas e renováveis eleva a complexidade do problema e os desafios para a completude da transição energética. Nesses casos, a segurança energética do sistema exige capacidade de *back-up* (capacidade de energia despachável), preferencialmente por outras energias limpas e renováveis, e/o de armazenamento (Guimarães, 2021, p. 28).

A energia nuclear, por exemplo, tem sido considerada uma candidata nestes casos por se tratar de energia limpa (não emite gases de efeito estufa). Contudo, ela é esgotável e não renovável, além de sua produção enfrentar restrições crescentes, principalmente, após o acidente envolvendo a Usina Nuclear de Fukushima I, no Japão, em março de 2011. A energia elétrica também se apresenta como candidata em potencial (sendo limpa e renovável), mas requer grandes investimentos na expansão das linhas de transmissão e uma mudança na forma como os mercados de eletricidade são organizados (Guimarães, 2021, p. 67).

O gás natural, por sua vez, pode servir como combustível de transição nessa tarefa. Contudo, trata-se de uma energia não renovável. Embora seja considerada a mais limpa dentre as energias derivadas de combustíveis fósseis e que tem importante função a desempenhar para vários países, há também que se

reconhecer a controvérsia na Europa e em outras partes do mundo em torno do seu uso para a descarbonização (Dalmarco, 2017). Acerca disso, Arbache e Esteves (2023, p. 21) complementam:

Isso significa que garantir segurança energética em um sistema baseado exclusivamente em energias limpas e renováveis é um grande desafio de curto e médio prazo, provavelmente não prontamente alcançável para uma ampla maioria de países e regiões. Da mesma maneira, o desafio tecnológico de operar uma planta industrial completamente descarbonizada, com a devida segurança energética, não é dos mais triviais. Tal requerimento passa pela necessidade desta planta industrial estar localizada em um espaço geográfico onde diferentes energias limpas e renováveis possam estar prontamente disponíveis em regime de complementaridade, a preços competitivos (Arbache; Esteves, 2023, p. 21).

A localização estratégica do Nordeste brasileiro para a América do Norte e a Europa, aliada à sua extensa costa marítima, faz com que o país seja uma opção atrativa para o *Powershoring*. Com a possibilidade de escoamento de energia limpa de forma rápida e eficiente para diversos destinos, o Brasil pode se tornar um *hub* energético mundial, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição energética global.

Outro ponto importante é que o *Powershoring* pode trazer benefícios econômicos para o Brasil, gerando empregos, atraindo investimentos estrangeiros, aumentando a competitividade das empresas locais e impulsionando o desenvolvimento sustentável. A diversificação da matriz energética por meio do *Powershoring* pode contribuir para a segurança energética do país, reduzindo a dependência de fontes de energia fóssil e mitigando os impactos das mudanças climáticas.

O Brasil detém um potencial significativo para se tornar um *player* importante no mercado global de *Powershoring*, aproveitando sua infraestrutura portuária, recursos naturais abundantes e posicionamento estratégico. Com investimentos e políticas públicas adequadas, o país pode se destacar como um líder na transição para uma economia sustentável e de baixo carbono. Conforme Arbache e Esteves (2023, p. 45):

A infraestrutura (porte e tipo) e localização (coordenadas) das distâncias dos portos brasileiros para os portos de Roterdã (Europa), Nova Iorque (Costa Leste dos EUA) e Los Angeles (Costa Oeste dos EUA), que são alguns dos portos de referência para o comércio exterior. Pode-se concluir que o Brasil está geograficamente bem-posicionada para atender aos interesses de empresas que visam produzir para exportar para os maiores mercados mundiais. O país já conta, portanto, com serviços portuários nas zonas de mais alto potencial de geração de energia verde, o que corresponde a um

elemento habilitador fundamental para o *Powershoring* na região (Arbache; Esteves, 2023, p. 45).

Já a estratégia de *hubs* de exportação de hidrogênio verde ou amônia verde têm como objetivo facilitar a produção e exportação desses combustíveis sustentáveis para diferentes países. Eles oferecem infraestrutura especializada, como terminais de armazenamento e carregamento, além de serviços logísticos, para atender à demanda mundial por energias limpas.

Esses *hubs* podem inclusive atrair investimentos para as regiões onde estão localizados, gerando empregos e impulsionando a economia local. A implementação desses *hubs* é uma forma de promover a sustentabilidade e a descarbonização da economia, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável.

A criação de *hubs* de exportação do excedente da produção de hidrogênio verde ou amônia verde em portos como o do Pecém, SUAP e Itaqui é uma estratégia promissora para impulsionar a indústria de energias renováveis no Brasil e no mundo, tornando esses portos referências na exportação de combustíveis limpos e sustentáveis.

Outro fator importante para a consolidação dessa estratégia é a existência de distritos industriais com regimes tributários diferenciados por meio da constituição de Zonas de Processamento de Exportação (ZPE). O Portal Tributário, de acordo com Arbache e Esteves (2023, p. 45), define ZPE nos seguintes termos:

Caracterizam-se como áreas de livre comércio com o exterior, destinadas à instalação de empresas direcionadas para a produção de bens a serem comercializados no exterior, a prestação de serviços vinculados à industrialização das mercadorias a serem exportadas ou a prestação de serviços a serem comercializados ou destinados exclusivamente para o exterior, consideradas zonas primárias para efeito de controle [...] (Arbache; Esteves, 2023, p. 45).

O Brasil apresenta um elevado número de ZPEs distribuídas ao longo de seu extenso território, somando um total de 22 Zonas. A justificativa para um número tão elevado está associada a quantidade de unidades federativas (UF) que são 27, 26 Estados e o Distrito Federal, a que compete a administração de alguns impostos e gozam de autonomia constitucional para fixar alíquotas, definir isenções e suspensões tributárias.

As ZPEs são importantes ferramentas de desenvolvimento econômico e regional, sendo estratégicas para atrair investimentos, fomentar a industrialização e

gerar empregos. Elas oferecem incentivos fiscais e tarifários, desburocratização dos processos de importação e exportação e infraestrutura adequada para as empresas instaladas.

Com a diversidade econômica e regional do Brasil, as ZPEs são fundamentais para impulsionar setores específicos em cada região, como agronegócio, indústria de base, tecnologia, entre outros. Elas contribuem para a geração de renda, aumento da competitividade das empresas e redução das desigualdades regionais.

Portanto, o elevado número de ZPEs no Brasil reflete a importância estratégica dessas áreas para o desenvolvimento econômico e social do país, promovendo a diversificação da economia, a geração de empregos e a atração de investimentos.

No entanto, para aproveitar essa oportunidade, o Brasil precisará superar alguns desafios. Lista-se, a seguir, fatores que poderiam ser incluídos numa agenda de políticas públicas para fomentar e encorajar o *Powershoring* na Região:

- a) Estabelecimento de parcerias público-privadas para incentivar o *Powershoring*;
- b) Incentivo à inovação e tecnologia nas indústrias envolvidas no *Powershoring*;
- c) Desenvolvimento de programas de capacitação e qualificação da mão de obra para atender à demanda do *Powershoring*;
- d) Estímulo à criação de *clusters* industriais relacionados ao *Powershoring*;
- e) Promoção de intercâmbio de conhecimento e boas práticas com países que já possuem experiência no *Powershoring*;
- f) Investimento em infraestrutura digital para facilitar a comunicação e troca de dados entre empresas envolvidas no *Powershoring*;
- g) Implementação de políticas de sustentabilidade ambiental e social nas empresas do *Powershoring*;
- h) Criação de incentivos fiscais para empresas que adotem práticas sustentáveis e ambientalmente responsáveis;
- i) Monitoramento e avaliação constante dos impactos do *Powershoring* na economia, meio ambiente e sociedade;
- j) Promoção da transparência e governança nas parcerias público-privadas relacionadas ao *Powershoring*;

- k) Coordenação mais eficaz entre os governos federal, estaduais e municipais, para criar um ambiente favorável ao desenvolvimento do setor;
- l) Estabelecimento de mecanismos de resolução de conflitos e garantia de segurança jurídica para investidores no *Powershoring*.

Essas medidas poderiam contribuir significativamente para o desenvolvimento do *Powershoring* no Brasil, criando um ambiente propício para a atração de investimentos e a geração de empregos, além de promover a sustentabilidade e a inovação nas indústrias locais.

Cada uma das medidas listadas requer o devido detalhamento de forma a se adequar às distintas realidades. As políticas públicas devem ser articuladas e complementadas pelas privadas, com participação ativa de associações empresariais e outras entidades de representação do setor privado (Arbache; Esteves, 2023, p. 55).

Além disso, é fundamental que haja um ambiente regulatório favorável, que incentive a inovação, a competitividade e a sustentabilidade. Nesse sentido, é importante que o governo atue como facilitador, promovendo parcerias público-privadas e incentivando a participação do setor privado na implementação das medidas propostas.

Outro ponto crucial é a capacitação e qualificação da mão de obra, garantindo que os trabalhadores estejam preparados para atuar no novo contexto econômico que se busca promover. A educação e a formação profissional devem ser priorizadas, visando garantir que o país possa competir globalmente e se destacar no cenário internacional.

Em suma, o *Powershoring* representa uma abordagem inovadora e estratégica para impulsionar o desenvolvimento econômico e promover a sustentabilidade. A sua implementação requer uma visão ampla e integrada, que envolva todos os atores relevantes e promova a colaboração em prol de um futuro mais próspero e sustentável. Desse modo, de acordo com Barbosa (2021, p. 34) em seu estudo sobre a participação estrangeira na produção de energia eólica no Estado da Paraíba, este destaca que:

Há muito trabalho a ser realizado, ter acesso a fontes renováveis abundantes é um diferencial para o Brasil, especialmente para a região Nordeste, mas não é tudo. Trata-se de uma condição necessária, mas não suficiente, para o exercício de protagonismo na transição energética e constituição de uma indústria verde global, com vistas a não perder espaço para outras regiões

com potencial para energias renováveis, a exemplo do Chile, Argentina e Uruguai, na América do Sul, África, Oriente Médio e Austrália.

Em concordância com Barbosa (2021) fica evidente que o Brasil precisa avançar com celeridade naquilo que precisa ser feito para não deixar de aproveitar uma alternativa valiosa para diversificar sua economia, gerar empregos e fortalecer suas relações comerciais internacionais.

A falta de um ambiente regulatório claro e incentivos governamentais pode desencorajar investimentos estratégicos e atrasar o desenvolvimento do setor, cujo impacto direto é a possibilidade de o país ficar à margem do mercado internacional do hidrogênio verde. Países que já têm planos bem estruturados estão se posicionando como líderes nesse mercado emergente, enquanto o Brasil, mesmo possuindo recursos naturais e potencial para produção em larga escala, corre o risco de ser ultrapassado por nações que saíram à frente na formulação de políticas e na atração de investimentos (Luna, 2023, 28).

A disponibilidade de energias renováveis posicionaria o Brasil como um relevante ator na Cadeia Global de Valores, no entanto, torna-se imprescindível uma visão estratégica da abordagem política capaz de ampliar o direcionamento para, além do foco histórico de país exportador de *commodities*, incentivar a produção de energias renováveis, inclusive, como um aspecto propulsor para a industrialização do Nordeste.

O cenário apresenta-se favorável para o aproveitamento dessa nova janela de investimentos no Nordeste brasileiro, com a possibilidade da atração de plantas manufatureiras voltadas para exportação promove o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), o aumento do investimento, da tecnologia e da inovação, o aumento do emprego e a inserção da região em Cadeias Globais de Valor, promove as pequenas e médias empresas, a arrecadação de impostos, o desenvolvimento local e regional e, finalmente, ganhos generalizados de produtividade, e não apenas um produtor e exportador de *commodities*, o que colocaria a região em outro patamar de desenvolvimento econômico e social, pois permitiria o aproveitamento das condições climáticas e a convivência pacífica com a seca, problema histórico dos nordestinos, bem como atrairia indústrias e efeitos importantes na produtividade, na competitividade, na pobreza e na desigualdade de renda. De acordo com Arbache; Esteves (2023, p. 45):

As estratégias de exportar energia verde “embarcada” em produtos industriais e exportar energia verde “crua” são complementares, embora não sejam temporalmente sincronizadas. Isto porque ainda não estão disponíveis tecnologias seguras e economicamente viáveis de transporte marítimo do

H₂V na forma de amônia e derivados, bem como de tecnologias igualmente seguras e econômicas de reconversão da amônia em H₂V para uso industrial nos portos dos países importadores. Assim que, tudo o mais constante, o uso local provavelmente precederia temporalmente a exportação em grande escala da energia.

Com isso, caso o país adote a estratégia de *Powershoring* e a consequente industrialização do Nordeste a partir da disponibilidade das energias renováveis, provavelmente precederia temporalmente a exportação em grande escala da energia, largando na frente nessa corrida de oportunidades geradas pela transição energética. Reforça-se que uma estratégia não anula a outra, sendo complementares e trazem vantagens competitivas para o país.

Complementarmente, importa mencionar que o Brasil, por meio do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), lançou em janeiro de 2024, o plano de ação que estrutura a política pública para industrialização, denominada de Nova Indústria Brasil (NIB). (Brasil, 2024).

A NIB explicita as principais ações que o governo federal deverá adotar até 2026, para implementar a política de industrialização do país nos próximos 10 anos. Trata-se de uma política sistêmica e de longo prazo, que tem os seguintes objetivos: a) estimular o progresso técnico e, conseqüentemente, a produtividade e competitividade nacionais, gerando empregos de qualidade; b) aproveitar melhor as vantagens competitivas do país; c) reposicionar o Brasil no comércio internacional (Brasil, 2024).

A NIB está organizada em seis missões. Dentre elas, a Missão 5 - Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas para garantir os recursos para as gerações futuras, é a mais alinhada ao objeto deste trabalho e uma importante política pública que pode contribuir para o desenvolvimento da indústria na região Nordeste.

Araújo (2023) destaca que a citada Missão foca nas áreas de bioenergia, equipamentos para a geração de energia renovável e cosméticos para o desenvolvimento de nichos industriais e estabelece como meta aspiracional para 2033, promover a indústria verde, reduzindo em 30% a emissão de CO₂ por valor adicionado da indústria, ampliando em 50% a participação dos biocombustíveis na matriz energética de transportes e aumentando o uso tecnológico e sustentável da biodiversidade pela indústria em 1% ao ano.

Para tanto, ainda de acordo com Brasil (2024) constituem objetivos específicos:

Expandir a capacidade produtiva da indústria brasileira por meio da produção e da adoção de insumos, inclusive materiais e minerais críticos, tecnologias e processos de baixo carbono, com eficiência energética; fortalecer as cadeias produtivas baseadas na economia circular e no uso sustentável e inovador da biodiversidade, desenvolver indústrias da bioeconomia e promover a valorização da floresta em pé e o manejo florestal sustentável; adensar cadeias industriais para a transição energética, com vistas à autonomia, à eficiência energética e à diversificação da matriz brasileira; desenvolver tecnologias estratégicas para a descarbonização, a transição energética e a bioeconomia, catalisando vantagens intrínsecas do país com vistas ao protagonismo de empresas brasileiras no mercado doméstico e internacional; e garantir a segurança energética, estimulando a produção de petróleo e gás de baixo custo e baixa pegada de carbono.

Outra política anunciada pelo Poder Público e que pode contribuir com o desenvolvimento da Região e ir de encontro aos desafios para a transição energética e fortalecer a indústria do hidrogênio é o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) brasileiro que foi instituído pela Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), aprovado pelo governo federal em 3 de agosto de 2022 (Brasil, 2022d), que visa fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio no Brasil como fonte energética secundária. (Brasil, 2022).

Acerca do apoio financeiro aos investidores, em âmbito nacional, o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) possui programa que apoia projetos pilotos de produção ou que utilizarão hidrogênio verde cujas linhas de financiamento serão expandidas para apoio a projetos de produção e exportação de hidrogênio verde em larga escala (Chiapinni, 2022).

Em nível de região Nordeste, o Banco do Nordeste do Brasil tem desempenhado um papel fundamental nessa transição energética, investindo significativamente em projetos de energia renovável. Com crescente ênfase em fontes solar e eólica, o BNB busca impulsionar a mudança de matrizes fósseis para energias limpas. É a região que concentra a maior parte dos investimentos em energias renováveis no Brasil (BNB, 2023).

Assim, a Nova Indústria Brasil, juntamente com outras ações em desenvolvimento, tem o potencial de impulsionar a indústria e o desenvolvimento econômico e social do Nordeste brasileiro por meio de iniciativas que visam combater a desigualdade regional e promover o crescimento sustentável da Região.

Finalmente, levando-se em consideração os protocolos assinados com os Governos dos Estados do Nordeste e os projetos já divulgados e as perspectivas para o hidrogênio verde, a demanda por recursos para financiar os investimentos é maior que a disponibilidade do FNE para o período, daí a importância de o Banco do Nordeste buscar fontes alternativas de recursos, a exemplo da Agência Francesa de Desenvolvimento (AFD), Banco Mundial, Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), bem como do BNDES que financiam infraestrutura, além da participação ativa da iniciativa privada e do mercado de capitais.

4.3 Análise *SWOT* da industrialização do Nordeste brasileiro

Identificados e discutidos os desafios e oportunidades para industrialização do Nordeste brasileiro, mister se faz a aplicação da técnica administrativa denominada análise *SWOT* que consiste numa ferramenta de gestão para a tomada de decisões do planejamento estratégico de empresas e novos projetos.

SWOT significa *strengths* (forças), *weaknesses* (fraquezas), *opportunities* (oportunidades) e *threats* (ameaças) e compreende a averiguação de fatores internos, forças e fraquezas, que estão relacionados a funcionários, propriedade intelectual, estratégias de marketing, ambiente geográfico, inovação tecnológica, recursos financeiros, entre outros, e de fatores externos, oportunidades e ameaças, concernentes a tendências de mercado, concorrência, matérias-primas, mudanças na legislação e instabilidade econômica, por exemplo.

No contexto desta pesquisa, a matriz *SWOT* foi aplicada com vistas a analisar os desafios e oportunidades para industrialização do Nordeste brasileiro, representado pelos fatores internos, diante do cenário nacional e global, entendidos como fatores externos. Não se detém, portanto, a averiguar detidamente uma empresa ou projeto.

Quadro 1 – Análise SWOT da Industrialização do Nordeste brasileiro

Forças	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Estruturação pelo Banco do Nordeste de linhas de crédito adequadas para o financiamento de projetos de energias limpas e descarbonização; • Posição geográfica estratégica próxima aos grandes centros consumidores e extensa costa marítima; • Recursos naturais abundantes; • Tecnologia da eletrólise já difundida; • ZPEs para atração de investimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acordos internacionais de cooperação ambiental, bem como fatores geopolíticos; • Consumidores conscientes em relação às questões de ASG; • Elevação da demanda por energias renováveis; • Escassez e participação das energias de origem fóssil na emissão dos GEE; • Questionamento das vantagens do modelo de offshoring; • Mudanças climáticas; • Possibilidade de utilização da infraestrutura portuária, de armazenamento e distribuição existentes; • Participação do governo atuando como facilitador, promovendo parcerias público-privadas e incentivando a participação do setor privado, e no incentivo econômico que garanta preços competitivos para o hidrogênio verde, alinhando as expectativas de produtor e consumidor para induzir a demanda pelo produto; • Programa Nacional do Hidrogênio.
Fraquezas	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> • Atual capacidade dos eletrolisadores para elevar a escala produtiva do H2V; • Capacitação do capital humano; • Necessidade de investimento inicial significativo para a produção das energias renováveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de produção mais elevado das energias renováveis em relação os combustíveis fósseis; • Fortalecimento da infraestrutura existente de produção, armazenamento, transporte e distribuição de energias limpas; • Instabilidade política e econômica; • Marcos regulatórios que favoreçam e incentivem a inovação; • Relevantes desafios concernentes à transparência e segurança jurídica.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O quadro 1 exibe detalhadamente os fatores ambientais, internos e externos, que impactam na industrialização do Nordeste brasileiro, demonstrando as grandes potencialidades da região para o desenvolvimento sustentável por meio das energias renováveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo versa sobre os resultados e discussões da pesquisa, após a abordagem do referencial teórico, do qual serviram de aporte para se chegar as respostas aos objetivos propostos, bem como elucidação do questionamento proposto.

Para Notteboom e Haralambides (2023), é pouco contestado que o hidrogênio verde será a fonte de energia limpa do futuro e os investimentos que as principais economias (e os seus portos) estão a fazer para conquistar a liderança na corrida do hidrogênio demonstra isso.

Em que pese os desafios tecnológicos de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde, Notteboom e Haralambides (2023) pontuam que a tecnologia do eletrolisador é bastante simples, a decisão de localização do eletrolisador pode beneficiar avanços na investigação dos transportes e distribuição, as infraestruturas de distribuição (gasodutos) tornar-se-ão cada vez mais disponíveis graças ao declínio da procura de gás natural e as instalações do terminal portuário também serão liberados para novos investimentos devido ao declínio na demanda por movimentação de cargas de combustíveis fósseis (petróleo e carvão).

Os autores argumentam, ainda, acerca da economia do hidrogênio, que, aparentemente, o interesse do investimento privado não se concretizará ou será evidenciada bastante relutância, se não houver procura suficiente; por outro lado, a procura só surgirá se a oferta for adequada e numa escala que garanta preços competitivos (Notteboom; Haralambides, 2023). Desse modo, Notteboom e Haralambides (2023) ressaltam o papel do setor público ao proporem que o financiamento e os investimentos, públicos ou privados, devem ser avaliados através do método habitual taxas de desconto social. Ademais, a mobilização de investimentos para aumentar a produção de hidrogênio verde exigirá mais colaboração internacional para moldar acordos políticos, regionais e multilaterais e estruturas de apoio dos órgãos reguladores.

No cenário nacional, Vasconcelos (2023) apesar de reconhecer o potencial brasileiro para a produção de hidrogênio de baixo carbono, lista desafios a serem superados para o país elevar a escala produtiva, são eles:

- a) o preço final: de acordo com a IEA, em 2022 a produção de 1 kg de hidrogênio de fontes fósseis custava entre US\$ 1,5 e US\$ 6,1; o de baixa

emissão de carbono a partir de combustíveis fósseis variava entre US\$ 1,8 e US\$ 7,6; e, o hidrogênio verde ia de US\$ 3,8 a US\$ 12. A redução do custo do H2V depende de algumas variáveis, entre elas, a disponibilidade e o preço da energia elétrica renovável usada para converter a água no gás;

- b) capacidade de eletrólise para elevar a escala produtiva do H2V: fabricação de eletrolisadores mais eficientes e construção de usinas que adotem essa rota, bem como o desenvolvimento de catalisadores, materiais que elevam a velocidade das reações químicas na eletrólise, de baixo custo, fácil produção e boa eficiência energética;
- c) alinhar as perspectivas de produtor e consumidor para criar demanda pelo hidrogênio;
- d) elaboração de um marco regulatório e o estabelecimento de políticas públicas de incentivo para impulsionar os diversos projetos ainda em estágio inicial de hidrogênio de baixo carbono no país.

Ainda assim, fatores como a questão climática, econômicos e geopolítica tem contribuído para o aumento da demanda por hidrogênio verde em todo o mundo como uma alternativa mais limpa e sustentável aos combustíveis fósseis. Atentos a esse movimento, diversos estados brasileiros têm realizado ações no sentido de atrair empreendimentos de produção desse energético, a exemplo da parceria firmada, em fevereiro de 2021, pelo Governo do Ceará, a Federação das Indústrias do Ceará (FIEC), o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) e a Universidade Federal do Ceará visando tornar o Ceará um *hub* de produção e exportação de hidrogênio verde.

Nesse sentido, os resultados listam os principais projetos anunciados de hidrogênio verde no Nordeste, descrevem o apoio financeiro do Banco do Nordeste, bem como as demandas por financiamentos de projetos em energias renováveis pelo BNB. De acordo com dados do BNB (2023) “nos últimos cinco anos, foram aplicados mais de R\$ 30 bilhões em energias renováveis. Isso evitou que 40 milhões de toneladas de CO2 fossem lançados na natureza a cada ano, o equivalente ao plantio de 3,5 milhões de hectares de floresta”.

Para que o setor privado tenha confiança para a realização de investimentos, existe a necessidade de uma regulamentação transparente, segurança jurídica, estabilidade política e econômica, bem como a disponibilização de linhas de

crédito com condições condizentes com as especificidades demandadas pelo setor de infraestrutura.

Dentre outras fontes de recursos financeiros, o Banco do Nordeste administra o FNE que é o principal instrumento financeiro da Política Nacional de Desenvolvimento Regional (PNDR) para a Região e um dos pilares do Plano Regional de Desenvolvimento do Nordeste (PRDNE) (BNB, 2023a).

O Banco do Nordeste dispõe de diversas linhas de financiamento com recursos do FNE, dentre aquelas que financiam o setor de infraestrutura e indústria, em particular o FNE Industrial, FNE Proinfra e FNE Verde, que têm relação com o tema em estudo (BNB, 2023b).

Estas Linhas, em geral, têm como finalidade o financiamento à infraestrutura complementar da região Nordeste, objetiva ampliar serviços de infraestrutura econômica, dando sustentação às atividades produtivas da região mediante a Implantação, ampliação, modernização e reforma de empreendimentos, inclusive as energias renováveis e o hidrogênio verde, com carência, prazos e custos adequados a este tipo de financiamento de longuíssimo prazo (BNB, 2023b).

Nos últimos anos, o Banco do Nordeste fortaleceu o apoio ao setor de infraestrutura por meio, principalmente, do financiamento de projetos de energias renováveis e eficiência energética. O volume total de recursos aplicados junto ao setor até dezembro de 2023, chegou ao patamar de R\$ 65,01 bilhões em ativos totais, financiados com recursos do FNE e outras fontes, mediante a contratação de 994 operações de crédito (BNB, 2023c). Desse montante, somente no ano de 2023, o Banco do Nordeste aplicou R\$ 12,27 bilhões no setor. O Quadro 2, exibe a quantidade e o valor das operações de concessão de crédito, por estado da sua área de atuação, financiadas pelo Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023.

Quadro 2 – Financiamentos do Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023, por estado

UF	Quantidade de operações de crédito	Valor (R\$)
AL	13	1.721.949.368,23
BA	70	2.591.409.484,98
CE	46	1.782.882.961,82
ES	2	511.344.809,27
MA	6	660.614.614,62
MG	29	1.154.462.804,91

Continua

Conclusão

Quadro 2 – Financiamentos do Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023, por estado

UF	Quantidade de operações de crédito	Valor (R\$)
PB	12	520.083.017,06
PE	43	849.553.334,93
PI	5	423.927.757,77
RN	26	1.756.098.602,60
SE	6	300.000.000,00
Total	258	12.272.326.756,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foram financiados projetos em todos os estados da área de atuação do Banco do Nordeste, considerando as especificidades e potenciais de cada um, cujas contratações envolveram, especialmente, a geração de energia de fontes renováveis ou atendimento a empresas concessionárias de serviço público e parcerias público-privadas em nível federal, estadual ou municipal, nas áreas de logística e saneamento básico. A Tabela 1, detalha, por área de aplicação, a quantidade e valor das operações de concessão de crédito financiadas pelo Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023.

Tabela 1 – Financiamentos do Banco do Nordeste ao setor de infraestrutura no ano de 2023, por área de aplicação

Área	Quantidade	Valor (R\$)
Fotovoltaica	53	3.638.952.551,67
Eólica	45	3.287.198.463,19
Saneamento básico	15	2.710.707.065,01
Logística	5	1.292.555.694,30
GD fotovoltaica	130	655.753.907,62
Telecomunicações	4	371.862.000,00
Distribuição de gás	3	157.827.588,00
Transmissão de energia	1	137.557.686,40
Iluminação pública	1	13.700.000,00
Indústria	1	6.211.800,00
Total	258	12.272.326.756,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Verifica-se que o estado da Bahia se destaca com a maior quantidade de operações e valor de concessão de crédito financiados em 2023, quais sejam, R\$ 2.591.409.484,98, em 70 operações, o que corresponde a aproximadamente 21% do valor e 27% da quantidade de operações financiadas pelo Banco do Nordeste. Há que ressaltar a maior concentração em energias renováveis.

Sobre isso, convém mencionar que a partir de 2017, o Banco do Nordeste passou a aportar um maior valor de recursos financeiros para o financiamento de projetos de energias renováveis. Entre os anos de 2017 e 2023, a instituição financeira aplicou R\$ 44,61 bilhões (BNB, 2023c). A Tabela 2, mostra a distribuição desse montante por área, quantidade de operações de concessão de crédito e valor de contração.

Tabela 2 – Financiamentos do Banco do Nordeste para energias renováveis, no período de 2017 a 2023

Área	Quantidade	Valor (R\$)	%
Eólica	293	26.752.525.877,87	59,97
Fotovoltaica	211	17.201.750.448,22	38,56
GD fotovoltaica	130	655.753.907,62	1,47
Total	634	44.610.030.233,71	100

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Considerando o ativo total junto ao setor de infraestrutura até dezembro de 2023, que é de R\$ 65,01 bilhões, o percentual financiado para energias renováveis no período de 2017 a 2023, corresponde a aproximadamente 68% do valor de contratação das operações de crédito, o que demonstra a disponibilização de recursos pelo Banco do Nordeste para o fomento da atividade.

Estudo realizado pelo Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE), aponta que a geração de energia solar cresce, em média, desde 2011, 112% ao ano no Brasil; para a fonte eólica, esse crescimento é de 40% ao ano. A pesquisa conclui que a região Nordeste, pela radiação solar e ventos constantes, desponta como protagonista da mudança da matriz energética do país e concentra a maior parte dos investimentos.

O crédito para o setor de infraestrutura contribuiu para causar impactos positivos e desdobramentos virtuosos na economia do Nordeste. Segundo o ETENE, dentre as repercussões socioeconômicas analisadas a partir do investimento de R\$ 6,4 bilhões aplicados em energias renováveis, pelo Banco do Nordeste, em 2022, foram criados ou mantidos 102,5 mil empregos na sua área de atuação, além disso, houve um aumento da massa salarial em R\$ 1,9 bilhão e da arrecadação de tributos na ordem de R\$ 1.731,3 milhões.

A pesquisa demonstra, ainda, que a concessão do crédito para o setor de infraestrutura gerou R\$ 13,1 bilhões no valor bruto da produção e R\$ 7,3 bilhões no valor agregado à economia. Os impactos foram estimados a partir da matriz de

insumo-produto, na área de atuação do Banco do Nordeste, contemplando os efeitos diretos, indiretos e induzidos (renda), a partir da aplicação dos recursos.

5.1 Projetos de hidrogênio verde anunciados no Nordeste

Frente as perspectivas do hidrogênio de baixo carbono, em particular, do hidrogênio verde, diversos estados brasileiros têm realizado ações no sentido de atrair empreendimentos de produção desse energético. Este tópico apresenta as principais iniciativas de projetos de hidrogênio, em andamento, nos estados do Nordeste.

No Estado do Ceará, em 19 de fevereiro de 2021, o Governo do Ceará, a Federação das Indústrias do Ceará, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém e a Universidade Federal do Ceará firmaram parceria visando tornar o Ceará um *hub* de produção e exportação de hidrogênio verde (Bezerra, 2023).

Desde então, foram assinados pelo Governo do Ceará 35 Memorandos de Entendimento (MoU) com *players* nacionais e internacionais interessados em desenvolver os seus projetos no Estado, especialmente, no Complexo Industrial e Portuário do Pecém. Dos projetos previstos, 4 já avançaram para a fase de pré-contrato: Fortescue, Casa dos Ventos, AES Brasil e Cactus Energia Verde (Bezerra, 2023). O Quadro 3, lista os 35 projetos previstos para instalação no Ceará (Bezerra, 2023).

Quadro 3 – *Hub* de hidrogênio verde – Pecém, no Ceará: empresas que assinaram MoU

1 Eneqix Energy	13 AES Brasil (Pré-contrato)	25 Spic
2 White Martins/Linde	14 Cactus Energia Verde (Pré-contrato)	26 Gansu Science & Technology Investment
3 Qair	15 Casa dos Ventos (Pré-contrato)	27 PowerChina
4 Fortescue (Pré-contrato)	16 H2 Green Power	28 Platform Zero (Complexo do Pecém + 13 instituições de cinco países)
5 Eneva	17 Comerc Eficiência	29 Green Hydrogen Corridor (Complexo do Pecém, AES Brasil, Casa dos Ventos, Comerc Eficiência, Havenbedrijf Rotterdam, Fortescue e EDP)
6 Diferencial	18 Enel Green Power	30. Voltalia
7 Hytron	19 HDF	31 Lightsource bp

Continua

Conclusão

Quadro 3 – *Hub* de hidrogênio verde – Pecém, no Ceará: empresas que assinaram MoU

8 H2helium	20 Mitsui	32 EDF Renewables
9 Neoenergia	21 ABB	33 GoVerde
10 Engie	22 Gold Wind	34 Hitachi
11 Transhydrogen Alliance	23 Alupar	35 Jepri
12 Total Eren	24 Mingyang Smart Energy	

Fonte: Cruz (2024) *apud* Bezerra (2023).

O Ceará já soma aproximadamente US\$ 34 bilhões em intenções de investimento, considerando apenas as empresas que anunciaram o valor de seus projetos a serem implantados no *hub* de hidrogênio verde do Ceará. Atualmente, encontra-se em operação no estado a usina de H2V da EDP Brasil, com capacidade de 1 MW de eletrólise (Bezerra, 2023).

Na Bahia, em 12/04/2022, o Governo lançou o Plano Estadual para Economia de Hidrogênio Verde. No estado, encontra-se em construção, no Polo Industrial de Camaçari, a primeira fase do projeto de H2V da Unigel de 60 MW de eletrólise e capacidade para produzir 10 mil toneladas de hidrogênio verde e 60 mil toneladas de amônia verde por ano (Bezerra, 2023).

De acordo com a Secretaria de Desenvolvimento Econômico estadual, a Bahia fechou o ano de 2022, com 265 parques eólicos e 46 parques solares fotovoltaicos em operação, com capacidade instalada de 7 GW de energia eólica e 1,3 GW de energia solar, e investimentos totais de R\$ 34 bilhões (Bezerra, 2023).

Além da Unigel, a Voltália anunciou a implantação de uma planta de H2V na Bahia, visando atender empresas do estado. Por sua vez, as empresas norueguesas *Statkraft* e *Aker Clean Hydrogen* e a alemã *Sowitec* fecharam acordo de colaboração para explorar conjuntamente oportunidades de produção de hidrogênio verde e amônia na Bahia (Bezerra, 2023).

O Estado do Piauí tem procurado realizar parcerias com vistas a atrair empreendimentos de H2V, já tendo firmado Memorandos de Entendimento com as seguintes empresas (Portal Tratamento de Água, 2023): *Solar Outdoor Media*, *All Energy*, Quinta Solar Energia, Celeo Redes Brasil e Green Energy Park (Bezerra, 2023).

O Piauí prevê a implantação de 3 *hubs* de hidrogênio verde – áreas no Estado que reunirão diferentes atores da cadeia de hidrogênio verde com alta sinergia para o desenvolvimento de parcerias e negócios no setor – a serem instalados em

locais estratégicos, levando em consideração a existência de demanda, recursos energéticos renováveis, baixo preço da eletricidade, infraestrutura disponível e contexto hídrico não conflituoso (Bezerra, 2023). São eles:

- a) *Coast Hub* – Destinado a atender a demanda de exportação de hidrogênio através do Porto Piauí, localizado em Luís Correia.
- b) *Hub de Teresina* – Destinado a atender a demanda interna das indústrias do entorno de Teresina em virtude do seu potencial logístico no Estado.
- c) *Hub de São João do Piauí* – Destinado a atrair novas empresas para a região e fomentar o desenvolvimento de importantes setores e *offtakes* no mercado doméstico brasileiro.

Em Pernambuco o Porto de Suape possui 5 Memorandos de Entendimento com as empresas Casa dos Ventos, Neoenergia, White Martins/Linde, Qair e Voltália (Bezerra, 2023).

O Estado Rio Grande do Norte assinou 2 Memorandos de Entendimento para desenvolvimento de plantas de produção hidrogênio verde e derivados em áreas próximas ao futuro Porto Indústria-Multipropósito *Offshore* do Rio Grande do Norte: Voltália (grupo francês) e Enerfín (grupo espanhol) (Bezerra, 2023).

Essas iniciativas a partir de grandes *players* nacionais e internacionais demonstram o potencial do Nordeste brasileiro para se tornar uma referência na produção de hidrogênio verde, contribuindo para a transição energética do país e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Ressalta-se que além de Estados Unidos e União Europeia, mais de 30 países já aprovaram seus planos nacionais de hidrogênio de baixo carbono ou hidrogênio verde, todos enfatizando a importância dessa indústria para suas metas de descarbonização e para o crescimento econômico, com expectativas de investimentos anunciados que superam a casa das centenas de bilhões de dólares, apenas no caso americano (Bezerra, 2023).

Assim, conforme amplamente demonstrado neste estudo, a indústria do hidrogênio ou hidrogênio verde apresenta grande potencial e com perspectivas crescentes de demanda, sendo que a região Nordeste brasileira conta com condições favoráveis para a produção de energias renováveis, como solar, eólica e biomassa, que podem ser aproveitadas na produção sustentável dessa matriz energética, bem como atender parcela significativa dessa demanda e fortalecer a indústria local.

5.2 Demandas de financiamento para projetos de hidrogênio verde pelo Banco do Nordeste

Em pesquisa realizada no Banco do Nordeste, no período de janeiro e fevereiro de 2024, sobre as demandas de financiamento para projeto de hidrogênio verde e descarbonização da indústria e redução da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, identificou-se o seguinte:

- a) 5 empresas das citadas na subseção 5.1, localizadas nos estados da Bahia, Ceará, Espírito Santo, Pernambuco e Piauí, iniciaram as tratativas acerca da estruturação de proposta de crédito;
- b) 5 empresas que não constam na subseção 5.1, indicaram interesse em financiamento, sendo que 1 está localizada no estado da Bahia, 2 no Maranhão, 1 na Paraíba e 1 no Piauí;
- c) Desse total de 10 empresas, 8 têm como atividade a produção de hidrogênio verde e 2 atuam com descarbonização da indústria e redução da emissão de GEE na atmosfera;
- d) As 2 empresas cuja atividade é descarbonização da indústria e redução da emissão de GEE na atmosfera estão localizadas no estado do Maranhão;
- e) As 10 demandas por financiamento encontram-se em fase inicial de tratativas, portanto, sem definição concreta de valores de investimento;
- f) Dos 11 estados que integram a área de atuação do Banco do Nordeste, 7 apresentam demandas de financiamento para projeto de hidrogênio verde e descarbonização da indústria e redução da emissão de GEE na atmosfera.

Verifica-se o interesse das empresas em obter financiamento para projetos de hidrogênio verde com o objetivo de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa e promover a descarbonização da indústria, cujas oportunidades de investimento estão distribuídas, com destaque, nos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí.

As principais áreas de atuação das empresas que buscam financiamento para projetos de hidrogênio verde são: energia, petroquímica, mineração, transportes e agricultura e a maioria delas planeja utilizar o financiamento para investir em instalações e equipamentos de produção de hidrogênio verde, infraestrutura de armazenamento e transporte, pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

Registre-se que não foram explicitados os nomes das empresas demandantes de financiamento, uma vez que inexistente autorização destas empresas para exposição dos dados, e em observância ao sigilo bancário e à Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa tem por objetivo geral analisar a situação da matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050, com foco na industrialização do Nordeste a partir das energias renováveis e, secundariamente, a exportação da produção excedente, notadamente, de hidrogênio verde (H2V). Acerca disso e, com base no referencial teórico levantado e nos dados coletados, verifica-se que as perspectivas da transição energética para o Brasil são promissoras, com a expectativa de aumento da participação das energias renováveis na matriz energética e a consolidação do país como um produtor e exportador de energias limpas, em resposta às mudanças climáticas e os acordos internacionais de cooperação ambiental, bem como fatores geopolíticos.

Ademais, constata-se que com o potencial do Nordeste para produção de hidrogênio verde e o incentivo do Banco do Nordeste, por meio de linhas de financiamento específicas para projetos de energias limpas e descarbonização, a região pode se tornar um polo de industrialização e exportação do excedente de energias renováveis, gerando emprego, renda e desenvolvimento sustentável.

Particularmente quanto ao primeiro objetivo específico que consiste em verificar o panorama geral do setor energético brasileiro no contexto mundial, pontua-se que, historicamente, desde os anos 1990 até 2015, ocorreu uma elevação na emissão global de GEE, tendo havido uma redução no último quinquênio contabilizado, 2015 a 2020.

Além disso, apura-se que em 2023, 80,3% da composição da matriz energética mundial se dá por fontes não renováveis, como petróleo e derivados, carvão mineral e gás natural; enquanto no Brasil, 47,4%, advém de fontes renováveis, quais sejam, lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana, eólica e solar e outras. Proporções similares ao consumo de energia no ano de 2021, em que decorreram de fontes renováveis aproximadamente 45% e 15%, respectivamente, no Brasil e no mundo, sendo 55% e 85% de fontes não renováveis.

Esta constatação também se aplica à matriz elétrica, uma vez que no ano de 2021, mais da metade da geração mundial foi a partir de carvão mineral e gás natural e, no Brasil, a matriz elétrica é ainda mais renovável que a energética, com destaque para as fontes hídrica, solar fotovoltaica e eólica que, em 2022, responderam por 77,9% da geração.

Concernente ao segundo objetivo específico que busca destacar os desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro e o papel do FNE, como principal linha de financiamento do BNB, nesse processo de transição para energias renováveis, averigua-se que a transição energética em curso está reconfigurando a cadeia produtiva de energia em todo o mundo e, com isso, surgem oportunidades e desafios para a industrialização do Nordeste brasileiro.

O questionamento das vantagens do modelo de *offshoring*, tecnologia da eletrólise já difundida, possibilidade de utilização da infraestrutura portuária, de armazenamento e distribuição existentes, posição geográfica estratégica próxima aos grandes centros consumidores e extensa costa marítima, faz com que o país seja uma opção atrativa para o *Powershoring*, aliado à isso, os recursos naturais abundantes, ZPEs para atração de investimentos, Programa da Nova Indústria Brasil, Programa Nacional do Hidrogênio, estruturação pelo Banco do Nordeste de linhas de crédito adequadas para o financiamento de projetos de energias limpas e descarbonização têm aberto uma janela de oportunidades de novos investimentos para instalação de plantas industriais no Nordeste brasileiro, com destaque, para a implantação de plantas produtoras de hidrogênio verde cujo produto também serviria como insumo para atendimento da demanda regional e, portanto, atrativo para as demais, promovendo ganhos generalizados de produtividade, o que colocaria a região nas Cadeias Globais de Valor e em outro patamar de desenvolvimento econômico e social.

Por outro lado, existem relevantes desafios concernentes à transparência, segurança jurídica e o aprimoramento dos marcos regulatórios que favoreçam e incentivem a inovação, a competitividade e a sustentabilidade, estabilidade política e econômica, participação do governo atuando como facilitador, promovendo parcerias público-privadas e incentivando a participação do setor privado, e no incentivo econômico que garanta preços competitivos para o hidrogênio verde, alinhando as expectativas de produtor e consumidor para induzir a demanda pelo produto, capacitação do capital humano, aumento da capacidade dos eletrolisadores para elevar a escala produtiva do H₂V e fortalecimento da infraestrutura existente de produção, armazenamento, transporte e distribuição de energias limpas.

Com o potencial para a geração de energia limpa e produção de hidrogênio verde no Nordeste, o BNB desenvolveu linhas de crédito direcionadas para financiamento de projetos que visem incentivar a transição energética na região, com a disponibilidade de recursos a longo prazo para empresas e indústrias investirem na

produção de energia renovável e na industrialização do Nordeste com base nessas fontes.

A industrialização do Nordeste a partir da produção de energias renováveis viabilizará o desenvolvimento econômico e social, por meio da atração de indústrias e seus efeitos na produtividade, competitividade e geração de emprego e renda, bem como da redução da pobreza e desigualdade social. Ademais, é capaz de permitir o aproveitamento das condições climáticas e a convivência pacífica com a seca, problema histórico dos nordestinos.

Relativo ao terceiro objetivo específico, qual seja, averiguar as projeções de demanda nacional e internacional por energias renováveis, tendo como premissas a instalação de indústrias no Nordeste brasileiro e a demanda por exportação de energias com emissão de baixo carbono, explorando a viabilidade e as implicações da transição para uma economia sustentável baseada em hidrogênio verde, argumenta-se que o cenário de demanda global de H2V atingiu 94 milhões de toneladas, em 2021, e projeta-se a variação entre 115 Mt a 130 Mt, até 2030 (IEA, 2022), todavia, a produção de hidrogênio de baixas emissões representou menos de 1 Mt, 0,7% da produção total, em 2021, o que demonstra o potencial de crescimento do H2V como uma alternativa viável e importante na transição energética para uma economia de baixo carbono.

Nota-se que o mundo está passando por um processo de transição energética para reduzir sua dependência de fontes não renováveis e aumentar a participação de energias limpas e, nesse movimento, o H2V tem despontado como uma alternativa promissora, por ser sustentável, armazenável, versátil e considerado um vetor energético, em que pese seu manejo ser bastante desafiador e a baixa capacidade de produção por meio de eletrólise cujo tamanho médio das plantas de eletrolisadores que entraram em operação em 2021, foi de 5 MW, entretanto, estima-se que a média das novas instalações possa chegar a aproximadamente 260 MW, em 2025, e na escala de gigawatts até 2030.

O Brasil pode gerar entre US\$ 15 bilhões e US\$ 20 bilhões em hidrogênio verde até 2040, podendo exportar entre US\$ 4 bilhões e US\$ 6 bilhões anuais (Gurlit *et al*, 2021). Somente o estado do Ceará soma cerca de US\$ 34 bilhões em intenções de investimento no *Hub* de hidrogênio verde do Pecém. Registre-se que os financiamentos do Banco do Nordeste para energias renováveis, no período de 2017 a 2023, totalizaram o montante de R\$ 44,6 bilhões e há o interesse de empresas na

obtenção de crédito para projetos de H2V com o objetivo de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa e promover a descarbonização da indústria, nos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Piauí.

Pelo exposto, é possível ratificar que os objetivos específicos e, consecutivamente, o objetivo geral foram atingidos. Em relação ao problema de pesquisa, constata-se que, em suma, os desafios versam sobre o estabelecimento de uma regulamentação transparente, segurança jurídica, tecnologia, viabilidade financeira, estabilidade política e econômica, fortalecimento da infraestrutura e capacitação profissional, contudo, a imperiosa transição energética global aliada ao questionamento das vantagens do modelo de *offshoring*, condições climáticas, posição geográfica, infraestrutura existente e estruturação de linhas de financiamento representa uma oportunidade para a industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis.

Este estudo contribui para um melhor entendimento da matriz energética atual, no mundo e no Brasil, os desafios e oportunidades para a transição para fontes renováveis, bem como o potencial de desenvolvimento econômico do Nordeste a partir das energias limpas, com perspectivas positivas para uma histórica mudança econômica até então marcada pela produção concentrada em produtos básicos, como *commodities* agrícolas e minerais, situação que, de acordo com Gereffi *et al* (2014, p. 13), tornou o país vulnerável a flutuações de preços no mercado internacional e dificultou o desenvolvimento de setores mais complexos e inovadores.

Corroborando Gereffi *et al* (2014), Antrás (2020, p. 9) destaca que ainda há a participação passiva nas cadeias produtivas globais que limitou a capacidade de inovação e de agregação de valor aos produtos exportados, conforme estudo do Banco Mundial que mostra a especialização dos países com amplos recursos naturais, como o Brasil, na produção de produtos primários.

Reconhece-se a relevância desta pesquisa em tempos de discussão de mudanças climáticas e necessidade de transição da matriz energética, todavia, possui limitações, especialmente, por não levantar, de forma detalhada, a tecnologia de produção em larga escala, a viabilidade econômico-financeira, a infraestrutura existente e necessária para a produção e armazenagem de hidrogênio verde a partir das fontes solar e eólica e para o transporte aos centros consumidores.

Em vista disso, sugere-se a realização de estudo complementar com vistas a identificar, especificamente no Nordeste, região detentora de condições climáticas

para a produção de energias solar e eólica, tecnologia de produção e a infraestrutura existente e necessária para a geração, armazenamento e transporte aos centros consumidores de hidrogênio verde.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. *et al.* **Gás do pré-sal: oportunidades, desafios e perspectivas.** Ciclo de Debates sobre Petróleo e Economia. IBP: 2022.

ANTRÁS, Pol. Conceptual aspects of global value chains. **The World Bank Economic Review**, Washington, v. 34, n. 3, p. 551-574, 2020.

ARAÚJO, Alex. **Hidrogênio verde: uma proposta de mapeamento da cadeia global de valor.** Rio de Janeiro: ESG, 2023.

ARBACHE, J.; ESTEVES, L. A. Resiliência com eficiência: Como o *powershoring* pode colaborar para a descarbonização e desenvolvimento econômico da América Latina e Caribe. **Scioteca, Espaço de Conhecimento Anerto**, Banco de Desenvolvimento da América Latina e Caribe, Caracas, 2023. Disponível em: <<https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2078>>. Acesso em: 22 mar. 2024.

BNB. **Institucional.** 2023a. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/web/guest/institucional>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

_____. **Desenvolvimento regional.** 2023b. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/web/guest/desenvolvimento-regional>>. Acesso em: 20 dez. 2023.

_____. **Contratações FNE.** 2023c. Disponível em: <<https://www.bnb.gov.br/aceso-a-informacao/dados-de-contratacoes/contratacoes-fne>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica.** Brasília: MME/EPE, 2023.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021.** Rio de Janeiro: MME/EPE, 2022.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.** Brasília: MME/EPE, 2021.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Nova indústria Brasil – forte, transformadora e sustentável: Plano de Ação para a neointustrialização 2024-2026 / Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI).** -- Brasília: CNDI, MDIC, 2024.

BARBOSA, André Lucas Fernandes. **O setor de energia elétrica brasileiro à luz da regulação e alguns aspectos da geração distribuída no contexto regulatório.** Orientação de Marcelo Pereira da Cunha. Avaliação de Rosangela Ballini. 2021. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2021. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.12733/1508>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

BEZERRA; Francisco Diniz. **Hidrogênio Verde**: Oportunidade para o Nordeste. Caderno Setorial ETENE, ano 8, n. 320, dez. 2023.

CASTRO, N. de; BRANDÃO, R.; AQUINO, T. **A Indústria Nascente do Hidrogênio Verde no Brasil**. Broadcast da Agência Estado de São Paulo, 2021.

CORREIA, Valnaire Elza Santana Nascimento. **Desindustrialização e reindustrialização**: o papel do Estado na adoção de políticas industriais. 2024. 126f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.

DALMARCO, Arthur Rodrigues. **Regulação Energética**: Sustentabilidade e Inovação nos Ambientes Regulatórios Brasileiro e Estadunidense. 2017. 244f. Dissertação (Mestrado em Direito) – Programa de Pós-Graduação em Direito, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

DINIZ, Clélio Campolina; MENDES, Philipe Scherrer. **Tendências Regionais da Indústria Brasileira no Século XXI**. Rio de Janeiro, RJ: IPEA, 2023.

GEREFFI; Gary. Promessa e desafios do desenvolvimento. **Tempo Social**, revista de sociologia da USP, v. 19, n. 1. 2014.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

GREENER. **Estudo Estratégico do Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil 2021**. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-do-mercado-de-armazenamento--de-energia-no-brasil-2021>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

GUIMARÃES, Leonam. A Geopolítica da Energia de Baixo Carbono *In*: GÓES, Guilherme (Org). **A Geopolítica da Energia do Século XXI**. Rio de Janeiro/RJ: Editora Sinergia, 2021.

GURLIT, Wieland; GUILLAUMON, João; AUDE, Marcelo; CEOTTO, Henrique. Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo. **McKinsey & Company**, [online], 25 nov. 2021. Disponível em: <[https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidadede-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo#/>](https://www.mckinsey.com/br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidadede-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo#/)>. Acesso em: 02 abr. 2024.

IEA. **Energy End-uses and Efficiency Indicators Data Explorer**. Paris: IEA, 2023.

_____. **Global Hydrogen Review 2022**. Paris: IEA, 2022.

_____. **World Energy Outlook 2016**. IEA. Paris. 2021.

IRENA. **Energia Renovável e Empregos**: revisão anual 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Socio-economic-impact/Energy-and-Jobs>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

IPECE. **Panorama da produção de energia elétrica no estado do Ceará**: Um enfoque para a matriz eólica. Informe n. 141, dez. 2018. Disponível em: <<https://www.ipece.ce.gov.br/ipece-informe/>>. Acesso em: 16 jan. 2024.

LAMEIRAS, Fortunato Lobo. **O hidrogênio como vetor de energia**. Rio de Janeiro: ESG, 2019.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. Strategies for the Energy Transition: Literature Review. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 8, n. 6, p. 96-120, jun. 2022.

LUNA, Denise. Falta de um plano nacional pode deixar Brasil fora da corrida pelo hidrogênio verde. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 25 jun. 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

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

MIRANDA, P. E. V. O Alvorecer da Energia do Hidrogênio. FGV ENERGIA. **Caderno Opinião**, dez. 2017.

NOTTEBOOM, T.; HARALAMBIDES, H. Seaports as green hydrogen hubs: advances, opportunities and challenges in Europe. **Marit Econ Logist**, v. 25, p. 1-27, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-023-00253-1>.

OLIVEIRA, P. M. T. **Produção de metanol através da reciclagem química de CO₂ e H₂**: combustível renovável a partir de gases de efeito estufa. 2022. 15 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia do Mar) - Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.unifesp.br/handle/11600/60389>>. Acesso em: 29 mar. 2024.

OLIVEIRA, C. **Avaliação do impacto da alteração das condições de financiamento sobre a energia eólica no Brasil**: evolução e perspectivas. 2019. 190f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PINTO, Eduardo Costa; FIANI, Ronaldo; CORRÊA, Ludmila Macedo. **Dimensões da abordagem da cadeia global de valor: *upgrading*, governança, políticas governamentais e propriedade intelectual**. Brasília, DF: IPEA, 2015.

PORTER, M. E. **Vantagem Competitiva**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.

_____. **Vantagem Competitiva**. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

RODRIGUES, A. C. **Simulação de um sistema híbrido de geração de energia para pequenas comunidades baseado em energia solar, reforma de etanol e armazenamento de hidrogênio**. 2018. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2018.

ROSA, Antônio Robson Oliveira da; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

TRINDADE, Carolina Silva da; ALVIM, Augusto Mussi. **O acordo de Paris e as emissões de gases**: impactos sobre a produção de suínos no Brasil. 2022.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **World Investment Report 2022**: International tax reforms and sustainable investment. Geneva: UNCTAD, 2022.

VASCONCELOS, Yuri. Na rota do hidrogênio sustentável: Brasil inicia a produção do combustível, estratégico para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. **Pesquisa Fapesp**, v. 333, nov. 2023. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/na-rota-do-hidrogenio-sustentavel/>>. Acesso em: 21 abr. 2021.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo. **Roadmap tecnológico do cimento**: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria de cimento até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

XAVIER, Carla Leal Barboza. **Produção de hidrogênio verde a partir da energia solar no Brasil**. 2022. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.