

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
INSTITUTO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS

YASMIN MARQUES DOS SANTOS

**BRASIL E ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CONTEXTO DO REGIME DO CLIMA: O
PAPEL DO HIDROGÊNIO NA POLÍTICA CLIMÁTICA BRASILEIRA**

Brasília

2025

YASMIN MARQUES DOS SANTOS

**BRASIL E ENERGIAS RENOVÁVEIS NO CONTEXTO DO REGIME DO CLIMA: O
PAPEL DO HIDROGÊNIO NA POLÍTICA CLIMÁTICA BRASILEIRA**

Monografia submetida ao Instituto de Relações
Internacionais da Universidade de Brasília.

Orientadora: Profa. Dra. Verônica Korber
Gonçalves

Brasília

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por abençoar minha vida e, especialmente, minha trajetória na graduação, desde o instante em que recebi a notícia da minha aprovação na universidade até aqui. Em nossas conversas silenciosas, Deus ouviu cada uma de minhas súplicas e me deu forças para continuar.

Aos meus pais, Marluce Marques de Oliveira Assis e Sivanildo Santos Assis, devo tudo. Com amor incondicional, me deram todo apoio em minhas escolhas e ações, e sempre acreditaram em mim e me incentivaram. Tenho imensa admiração pelos pais incríveis que tenho. Sou grata a eles por todo o esforço que fizeram e fazem por mim, para que nada nunca faltasse, para que eu tivesse todo conforto e para que fosse possível me dedicar aos meus estudos. Meus pais são a base do que eu sou, do que eu sei e para que eu esteja onde estou.

Agradeço a minha família de sangue e de coração por todas felicitações em minhas conquistas, por todo apoio e torcida que me deram, e por todos os ensinamentos que a mim foram passados. Faço menção especial às minhas queridas irmãs e querido irmão que me trouxeram momentos de motivação e felicidade quando me encontrava frustrada e cabisbaixa. Agradeço aos colegas e amigos que me auxiliaram na minha vida de estudos, sobretudo minha melhor amiga que assumiu papel fundamental na minha vida acadêmica, me impulsionando a tentar, persistir e acreditar.

Agradeço imensamente a professora e orientadora Verônica Gonçalves, uma profissional que exerce com excelência seu trabalho, cuja dedicação foi essencial para que eu conseguisse projetar, desenvolver e terminar a presente pesquisa. Agradeço igualmente a todos os integrantes do GERIMA, que me acolheram e me aconselharam durante todo o processo. Deixo meus agradecimentos também aos professores e demais profissionais do Instituto de Relações Internacionais da UnB, os quais me auxiliaram durante toda minha graduação e me capacitaram para ser a internacionalista que me tornei.

Por fim, deixo um agradecimento especial ao meu namorado por todo o companheirismo durante esse exaustivo processo. Agradeço por ter estado comigo em cada hora de estudo, me ajudando e me incentivando a dar seguimento. Obrigada por cada palavra de conforto, por acreditar em mim mesmo quando duvidei, e por me lembrar, sempre, do meu potencial.

RESUMO

Frente a urgência climática, os atores nacionais e internacionais têm fomentado cada vez mais a transição para uma matriz energética sustentável. Neste cenário, o hidrogênio verde tem sido apontado como uma potencial alternativa para a descarbonização da economia. O Brasil, um país com uma matriz predominantemente renovável, tem demonstrado interesse em explorar e desenvolver o setor de hidrogênio como um vetor para a transição energética, formulando políticas e incentivando projetos para essa tecnologia no país. Diante disso, este estudo objetiva analisar como o hidrogênio verde é incorporado ao planejamento energético brasileiro como uma ferramenta de mitigação das mudanças climáticas, considerando os compromissos assumidos pelo Brasil no contexto do regime do clima. A pesquisa adota abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica e análise documental de políticas públicas, planos estratégicos e iniciativas institucionais. Os resultados indicam que, embora existam incentivos e diretrizes para o desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão no país, sua implementação ainda requer um maior alinhamento com a sua política climática. Até então, a estratégia nacional sobre o hidrogênio demonstra uma predominância de interesses voltados à exportação e ao seu posicionamento no mercado internacional do hidrogênio. Conclui-se que o avanço do hidrogênio no Brasil depende de uma estrutura política mais robusta, que priorize sua utilização interna e sua consonância com as metas ambientais e climáticas, contribuindo para a transição energética do país.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Energia Renovável. Planejamento Energético. Política Climática.

ABSTRACT

Given the climate emergency, national and international actors have increasingly promoted the transition to a sustainable energy matrix. In this context, green hydrogen has been identified as a potential alternative for decarbonizing the economy. Brazil, a country with a predominantly renewable energy matrix, has shown interest in exploring and developing the hydrogen sector as a key driver for energy transition, formulating policies and fostering projects for this technology. In light of this, this study aims to analyze how green hydrogen is incorporated into Brazilian energy planning as a tool for mitigating climate change, considering the country's commitments within the climate regime. The research adopts a qualitative approach, based on a literature review and document analysis of public policies, strategic plans, and institutional initiatives. The results indicate that, although there are incentives and guidelines for the development of low-emission hydrogen in Brazil, its implementation still requires greater alignment with the country's climate policy. Until now, the national hydrogen strategy has so far been primarily focused on export opportunities and positioning in the international hydrogen market. It is concluded that the advancement of hydrogen in Brazil depends on a more robust political framework that prioritizes domestic use and alignment with environmental and climate goals, contributing to the country's energy transition.

Keywords: Green Hydrogen. Renewable Energy. Energy Planning. Climate Policy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões Totais Líquidas do Brasil (1990-2023).....	40
Figura 2 - Sub-categoria em Emissões Líquidas do Brasil (1990-2023).....	42
Figura 3 - Emissões Totais Líquidas do Brasil (1990-2023).....	43
Figura 4 - Emissões Totais Líquidas no Setor de Energia (1990-2023).....	50
Figura 5 - Categoria Emissora no Setor de Energia (1990-2023).....	51
Figura 6 - Cores do Hidrogênio.....	59
Figura 7 - Produção anual de H2 no Brasil.....	66

LISTA DE SIGLAS

- ABH2 — Associação Brasileira do Hidrogênio
- AIE — Agência Internacional de Energia
- ANP — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- CCUS — Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture, Utilization and Storage*)
- CNPE — Conselho Nacional de Política Energética
- COP — Conferências das Partes
- Fonte — Fórum Nacional de Transição Energética
- G20 — Grupo dos Vinte
- G7 — Grupo dos Sete
- GEE — Gases de Efeito Estufa
- GEG — Governança Global de Energia
- H2 — Hidrogênio
- H2V — Hidrogênio Verde
- INDC — Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada
- IRENA — Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency*)
- LULUCF — Mudança de Uso da Terra e Floresta (*Land Use, Land Use Change and Forestry*)
- NDC — Contribuição Nacionalmente Determinada
- ODM — Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
- ODS — Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONU — Organização das Nações Unidas
- Paten — Programa de Aceleração da Transição Energética
- Plante — Plano Nacional de Transição Energética
- PNH2 — Programa Nacional do Hidrogênio
- PNTE — Política Nacional de Transição Energética
- PROINFA — Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
- PTE — Pacto pela Transformação Ecológica
- SNI — Sistema Interligado Nacional
- UNFCCC — Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change*)

WSSD — Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (*World Summit on Sustainable Development*)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
1 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO REGIME DO CLIMA.....	23
1.1 O Regime do Clima.....	23
1.2 O Papel das Energias Renováveis no Combate às Mudanças Climáticas.....	26
1.2.1 Sobre Energias Renováveis.....	26
1.2.2 Inserção das Renováveis no Regime do Clima.....	28
1.3 Considerações parciais.....	37
2 BRASIL E ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	39
2.1 Brasil e Política Climática.....	39
2.1.1 Perfil de Emissões do Brasil.....	40
2.1.2 A Política Climática Brasileira.....	43
2.2 Brasil e Renováveis.....	48
2.2.1 Emissões do Setor Energético no Brasil.....	49
2.2.2 As Políticas para as Renováveis.....	51
2.3 Considerações parciais.....	56
3 O HIDROGÊNIO NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DO BRASIL E SUA CONTRIBUIÇÃO CLIMÁTICA.....	57
3.1 O Hidrogênio Verde.....	57
3.1.1 Produção e classificação.....	58
3.1.2 Armazenamento e transporte.....	60
3.2 Hidrogênio e Brasil.....	61
3.2.1 O Desenvolvimento do Hidrogênio no Brasil.....	62
3.2.2 As Políticas e Regulamentações para o Hidrogênio no Brasil.....	66
3.3 Política de Hidrogênio Brasileira e Mudanças Climáticas.....	71
3.3.1 Hidrogênio e Política Climática.....	71
3.3.2 Análise.....	75
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
REFERÊNCIAS.....	82

INTRODUÇÃO

Foi comprovado que as fontes de combustíveis fósseis são os maiores responsáveis pela aceleração das alterações climáticas (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Diante disso, a energia renovável é vista como uma alternativa sustentável para substituir aquelas fontes e desacelerar o fenômeno. Nesse sentido, a transição energética global, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes de fontes fósseis, tem levado países a reformular suas matrizes energéticas e adotar fontes renováveis e tecnologias emergentes para garantir um desenvolvimento mais sustentável. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma alternativa para descarbonizar setores intensivos em emissões e combater as mudanças climáticas.

O Brasil apresenta uma matriz energética predominantemente renovável, mas ainda é dependente dos combustíveis fósseis e apresenta um perfil de emissões elevado (EPE, 2024; SEEG, 2024). Nesse contexto, o hidrogênio tem sido promovido pelo Brasil, inclusive com diversos projetos estabelecidos no país, como uma rota tecnológica para contribuir com a expansão de suas fontes sustentáveis. Contudo, quando abordado Brasil e hidrogênio verde, o destaque é voltado para o país como um potencial líder no mercado de exportação do hidrogênio.

Nesse sentido, a problemática deste estudo reside na necessidade de compreender se e como o hidrogênio é apresentado na política climática brasileira. A pergunta de pesquisa que orienta esta investigação é: como o hidrogênio verde se insere no planejamento energético brasileiro como uma ferramenta no combate às mudanças climáticas? A partir dessa questão, busca-se realizar um levantamento bibliográfico e analisar políticas, planos e incentivos nacionais que se relacionam com essa tecnologia.

O trabalho está estruturado em três capítulos. O primeiro apresenta o regime climático internacional e a importância das energias renováveis no combate às mudanças climáticas, fornecendo o embasamento teórico e histórico para compreender o cenário global da transição energética. O segundo capítulo foca na inserção das energias renováveis no Brasil como instrumentos de apoio à sua política climática, abordando a trajetória das políticas de expansão de tais tecnologias. Por fim, o terceiro capítulo trata especificamente do hidrogênio de baixa emissão de carbono no planejamento energético brasileiro e seu alinhamento com as políticas climáticas nacionais.

Dessa forma, este estudo busca contribuir para a compreensão do papel do hidrogênio de baixa emissão de carbono nos compromissos climáticos do Brasil, avaliando sua inserção no planejamento energético e sua relação com a política climática nacional.

Tendo em vista a crescente pressão internacional para que os países reduzam suas pegadas de carbono e cumpram os compromissos assumidos em acordos climáticos, como o Acordo de Paris, abordar o tema se faz necessário para ampliar a discussão sobre as inovações energéticas integradas aos planejamentos nacionais e a busca por soluções de mitigação das mudanças climáticas.

O presente trabalho visa analisar como o hidrogênio se insere no planejamento energético brasileiro no contexto do regime do clima, avaliando nos programas, planos e políticas as possíveis contribuições dessa tecnologia para a transição energética do país e, por conseguinte, para a mitigação das mudanças climáticas.

Para isso, foram estabelecidos três objetivos específicos: (1) relatar a inserção e o papel das energias renováveis no regime do clima, identificando as discussões e acordos climáticos que promovem as energias renováveis como uma ferramenta de mitigação climática; (2) compreender o fomento às energias renováveis no Brasil, traçando a composição da matriz energética brasileira, com foco nas políticas e programas nacionais de desenvolvimento nas energias renováveis, bem como examinar a trajetória do país nas negociações internacionais e seus objetivos climáticos; (3) e, por fim, entender como o desenvolvimento do Hidrogênio Verde no segmento energético brasileiro contribui para a agenda climática no país.

Diante da intensificação das mudanças climáticas desencadeada pela ação humana no Antropoceno e da corrida contra o tempo para alcançar as metas ambientais, como a transformação da matriz energética global para fontes mais limpas e sustentáveis, a pesquisa visa contribuir para o avanço científico e acadêmico sobre o papel do hidrogênio verde no combate às mudanças climáticas e na transição energética brasileira. Além disso, busca-se identificar a importância estratégica dessa tecnologia renovável e ampliar o arcabouço teórico sobre as energias renováveis e os planos energéticos alinhados às metas climáticas.

No âmbito político-social, o trabalho poderá servir de base para a formulação de políticas públicas que tencionam uma transição energética sustentável no Brasil e para fundamentar revisões nos planejamentos energéticos, tornando-os mais eficientes e estratégicos. Poderá ser um meio de consulta para ponderar os investimentos e o fomento a tecnologias renováveis que de fato agregam ganhos para a agenda climática brasileira e atendam às necessidades e objetivos do país. Com um panorama sobre o hidrogênio verde no

Brasil, esta pesquisa fornecerá subsídios para melhor compreendê-lo e viabilizar medidas para sua implementação no país.

A realização deste trabalho se faz viável considerando o amplo acesso a recursos informativos sobre temas de energias renováveis, mudanças climáticas e políticas ambientais. O desenvolvimento dessa pesquisa se dará por meio de consultas bibliográficas, tornando o processo mais acessível, prático e tangível.

A presente pesquisa adota a modalidade de Pesquisa Bibliográfica para reunir, organizar e analisar informações a respeito do tema e problema de pesquisa selecionados. Tal modalidade se caracteriza pela pesquisa profunda de materiais já elaborados e publicados. Ou seja, conhecer o tema de estudo a partir de uma vasta gama de instrumentos teóricos existentes. No entanto, é importante frisar que “a pesquisa bibliográfica não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas propicia o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras” (Lakatos e Marconi, 2003, p. 183, tradução própria¹).

Nesse sentido, foram selecionados, arquivados e analisados artigos científicos, dissertações, relatórios, leis, teses, livros e jornais. Diante de tal arcabouço, será adotada abordagem qualitativa e perfil descritivo, tendo este o objetivo de descrever as características de determinado fenômeno ou estabelecer conexões entre variáveis (Gil, 2002), para analisar, em uma perspectiva longitudinal, o papel das energias renováveis, com ênfase no hidrogênio verde, no planejamento energético brasileiro voltado ao combate das mudanças climáticas no contexto do regime do clima.

Para a coleta de informações, foi realizada uma revisão de literatura, a partir de pesquisas em português e inglês em sites como Google, Google acadêmico, Periódicos CAPES, SciELO e portais oficiais de instituições de pesquisa e ensino. Algumas das palavras-chaves usadas foram “hidrogênio verde”, “energias renováveis”, “planejamento energético” e “política climática”. Foram selecionados materiais de fontes primárias, ou seja, textos e arquivos sobre ideias, fenômenos e contextos registrados no momento presente ao acontecimento ou próximo ao mesmo, e secundárias, referente ao conteúdo de interpretação e comentários produzidos a partir das fontes primárias (Pinto, 2023). O trabalho apresenta uma análise de conteúdo interpretativa desses materiais, priorizando a versatilidade das estratégias

¹ No original: “[...]bibliographic research is not a mere repetition of what has already been said or written about a certain subject, but it allows the examination of a topic from a new perspective or approach, reaching innovative conclusions”.

de investigação, com o objetivo de compreendê-los com profundidade e garantir uma visão crítica a respeito do tema de pesquisa.

Além disso, foi realizada uma entrevista com um representante do Ministério das Relações Exteriores (MRE), sendo este um profissional que atua nos interesses do Brasil e que tem proximidade com a política energética do país, com o objetivo de adquirir a perspectiva profissional e pessoal do entrevistado a respeito do tema de forma complementar (Pinto, 2023). Realizou-se uma triangulação de pesquisa para ter mais uma abordagem e fortalecer a confiança nas descobertas por meio de confirmações de proposições feitas no âmbito desta pesquisa (Heale; Forbes, 2013). A entrevista consiste em uma amostra “de conveniência” não probabilística, uma vez que tive a oportunidade de realizá-la por ter sido estagiária no MRE (Figueiredo e Figueiredo, 2011).

A entrevista foi configurada em semiestruturada, com algumas perguntas previamente formuladas e outras originadas no decorrer da conversa², com a adoção do método de análise “transcrição essencial” pela variante “condensada” que permitiu identificar e interpretar as partes de maior relevância ao estudo (Pinto, 2023).

A seguir, são apresentados os conceitos fundamentais, trazendo definições e fatores relacionados, para a compreensão do tema desta pesquisa e seus desdobramentos. Primeiro, discute-se a política climática, destacando seu papel na formulação de estratégias para a mitigação das mudanças climáticas. Em seguida, é abordado o planejamento energético como um instrumento importante para orientar a transição para fontes mais limpas, considerando aspectos ambientais, políticos, econômicos e sociais. Por fim, apresenta-se o conceito de hidrogênio verde, destacando sua relação com as fontes renováveis e seu potencial como tecnologia para a descarbonização.

a) Política Climática

Nascimento et al. (2020) define Política Climática como políticas setoriais e abrangentes que visam alcançar reduções duradouras de emissões. Isto é, são medidas elaboradas no âmbito político, de forma específica ou geral, para promover a sustentabilidade e a proteção ao meio ambiente a partir das reduções de emissões de gases poluentes.

Os autores Kriegler et al. (2014) argumentam que as políticas climáticas podem ser descritas com base em atributos como a ambição das metas políticas, os instrumentos

² As perguntas utilizadas na entrevista se encontram no APÊNDICE A deste trabalho.

utilizados para alcançá-las e o contexto temporal e geográfico de sua implementação. Nesse sentido, as políticas climáticas têm como atributos metas de redução de emissões, os regimes e medidas políticas para alcançá-las e os obstáculos de implementação.

Seguindo essa lógica, segundo Nascimento et al. (2020), é fundamental considerar elementos como ambição, rigor, credibilidade, viabilidade e outras características de concepção para compreender o papel das políticas climáticas nos esforços de descarbonização e garantir sua eficácia. Trata-se de fatores determinantes para estabelecer objetivos precisos a serem alcançados em um processo seguro e de alta capacidade de desenvolvimento, atendendo as exigências do contexto vigente.

Além disso, segundo Jaccard (2006 apud Rodes, Axsen & Jaccard, 2017), as políticas climáticas podem ser definidas de acordo com seu nível de obrigatoriedade, considerando até que ponto as ações de redução de emissões são impostas pelo governo ou por outro agente. Nesse sentido, as políticas obrigatórias geralmente envolvem regulamentações que estabelecem requisitos específicos para emissões ou tecnologias, bem como impostos sobre carbono com taxas definidas por unidade de emissão. Já as políticas não obrigatórias incluem iniciativas voluntárias, como programas de educação e subsídios para a aquisição de tecnologias de baixo carbono.

Segundo Kriegler et al. (2014), a política climática tem como informações qualitativas, isto é, informações que descrevem a evolução das políticas climáticas, o conhecimento sobre a natureza da política climática, como políticas regulatórias ou fiscais e medidas com relação à demanda ou com foco maior em mitigação de emissões através de soluções tecnológicas. Já quanto às informações quantitativas têm-se, por exemplo, metas relacionadas à temperatura global e orçamento de emissões cumulativas globais.

Afirma-se que o número de políticas climáticas aumentou ao longo do tempo devido aos acordos climáticos internacionais firmados, a difusão entre políticas internacionais e nacionais e a ideia de haver uma relação entre desenvolvimento econômico e mitigação das mudanças climáticas (Nascimento et al., 2020). Ou seja, as políticas climáticas têm se mostrado cada vez mais relevantes devido ao aumento da discussão sobre as mudanças climáticas e a necessidade de combatê-las no âmbito internacional, sendo formalizadas por acordos que garantem certa credibilidade. Além disso, a política climática tem despertado cada vez mais interesse nos países pelo seu potencial de gerar desenvolvimento econômico, ao passo que fomenta a mitigação das emissões.

No entanto, Nascimento et al. (2020) aponta que os objetivos e as ações estabelecidas, como as metas de redução das emissões atribuídas aos governos pelas Contribuições

Nacionalmente Determinadas (NDC) e as políticas nacionais de combate às mudanças climáticas, são insuficientes e que as políticas podem ser fortalecidas por meio do aumento dos custos associados às emissões e da replicação de práticas bem-sucedidas.

Da mesma forma, Folster e Nystrom (2010) argumentam que o aumento acelerado das emissões de dióxido de carbono se dá, não só pelo avanço do crescimento econômico global e pelos atrasos na implementação de instrumentos de políticas, mas também devido à falta de eficácia das políticas destinadas à redução das emissões de CO₂. Isso porque muitos estudos sobre vazamento e recuperação de carbono (isto é, transferência da produção intensiva de emissões para outras regiões e a adoção de tecnologias de captura de carbono) são limitados por sua abordagem parcial e de curto prazo (Folster; Nystrom, 2010).

Roelfsema et al. (2020) indicam que, sem ações adicionais às políticas climáticas nacionais já implementadas, as emissões de gases de efeito estufa tendem a crescer significativamente entre 2015 e 2030, embora em um patamar inferior ao que seria observado na ausência dessas políticas. Isto porque o esforço conjunto das políticas climáticas nacionais atualmente em vigor é insuficiente para alcançar os objetivos estabelecidos pelo Acordo de Paris e não consegue atingir plenamente a ambição coletiva prometida nas NDC.

É possível observar na literatura anterior uma forte crítica a eficiência das políticas climáticas atuais (Nascimento et al., 2020; Folster; Nystrom, 2010; Roelfsema et al., 2020). Roelfsema et al. (2020) apontam que para preencher tais lacunas das políticas climáticas é necessário que todos os países intensifiquem a adoção de tecnologias renováveis e que as economias emergentes e aquelas altamente dependentes em combustíveis fósseis aprimorem sua eficiência energética.

Já Nascimento et al. (2020) defendem as políticas setoriais como um meio para fortalecer as políticas climáticas. As políticas setoriais, como as políticas aplicadas nos setores de indústria e transportes, abrangem todas as fontes relevantes de emissões e garantem a implementação das principais opções de mitigação, combinadas com instrumentos de precificação amplas e transversais para contribuir significativamente para a redução de emissões e para superar barreiras de longo prazo na implementação dessas medidas (Nascimento et al., 2020).

Ou seja, as políticas setoriais são conduzidas por planos climáticos de redução das emissões de gases de efeito estufa a partir de planos estruturados e aplicados em setores específicos da economia. É uma forma de garantir cobertura abrangente com medidas específicas conforme as necessidades de cada setor e que promove os mecanismos de incentivo econômico, tecnológico e político de aplicação. Além disso, é um meio para adotar

iniciativas complementares voltadas para a redução do uso de combustíveis fósseis e não somente medidas de energias renováveis (Nascimento et al., 2020).

Tendo em vista o número elevado de emissões totais de dióxido de carbono provenientes da geração de energia, Metz e Davidson (2007 apud Hughes; Urpelainen, 2015) apresentam a teoria da política climática relacionada à energia. Esta pode ser entendida de maneira ampla como qualquer política voltada para a redução das emissões de carbono no setor energético de um país, incluindo o apoio a tecnologias limpas que promovam a descarbonização (Hughes; Urpelainen, 2015).

A referida teoria destaca os impactos distributivos das políticas e os diversos instrumentos empregados para alcançar as metas estabelecidas. Para tanto, os autores Hughes e Urpelainen (2015) analisam a interação entre os fatores de interesses da indústria, a demanda pública por políticas de mudança climática e as capacidades institucionais dos governos em países democráticos para compreender como as decisões políticas em relação às mudanças climáticas são tomadas.

A partir da teoria da política climática relacionada à energia, conclui-se que as políticas climáticas são moldadas pelos interesses dos setores industriais, especialmente aqueles que são intensivos em energia ou que produzem tecnologias limpas. A teoria também sugere que quanto mais forte for a preocupação pública com as mudanças climáticas, mais ambiciosas serão as políticas. Ademais, os governos com maior capacidade institucional tendem a favorecer os instrumentos regulatórios, como normas e procedimentos, e não fiscais, como impostos (Hughes; Urpelainen, 2015).

b) Planejamento Energético

Segundo They e Zarate (2009 apud Prasad; Bansal; Raturi, 2014), o planejamento energético é o que define o arranjo de fontes de energia para atender uma determinada demanda, considerando os critérios quantitativos, sendo estes econômico e técnico, e qualitativos, referente ao impacto ambiental e critério social. Isto é, a partir do planejamento energético, é estabelecido quais as opções energéticas que serão adotadas e utilizadas em determinados setores a fim de atender as demandas específicas. Tendo em vista os variados tipos de fontes de energia, como fontes renováveis e não renováveis, e o impacto que as mesmas geram, o plano é estruturado considerando as necessidades e influências externas ao processo, como fatores de mercado e desenvolvimento, e o impacto das mesmas para a sociedade e o meio ambiente, tanto em sua produção, como em seu uso.

O planejamento energético tem como base satisfazer a demanda energética em um determinado período de tempo, considerando os fatores sociais, ambientais e políticos, assim como os históricos de planos energéticos (Cormio et al., 2003 apud Prasad; Bansal; Raturi, 2014). Espera-se, então, um plano estruturado em vertentes básicas para fornecer um sistema energético que abarque as necessidades de uma organização social. Para tanto, é analisado as realizações passadas, o contexto presente e os cenários futuros para compreender a demanda energética, tanto para uso interno quanto para uso externo, e então projetar um conjunto de ações a serem tomadas, considerando as possibilidades econômicas, o impacto ambiental e social, e as adaptações/medidas políticas necessárias.

Hiremath et al. (2007 apud Prasad; Bansal; Raturi, 2014, p. 687, tradução própria³) sintetizam que o “planejamento energético envolve encontrar um conjunto de fontes e dispositivos de conversão para atender aos requisitos/demanda de energia de todas as tarefas de maneira ideal”. Ou seja, no planejamento energético, como uma formalização política, há a união entre fatores tecnológicos, investimentos, pesquisas, regulamentação e procedimentos técnicos, além de projeções de impacto, para possibilitar a produção e o fornecimento necessário que atenda a demanda energética de forma sustentável. O planejamento oferece mais precisão e estabilidade ao futuro energético para ter maior segurança, eficiência, menores custos e sustentabilidade ambiental (Llano-paz et al., 2017).

Na literatura, argumenta-se a necessidade de integrar as questões ambientais e climáticas aos planos de energia, considerando o impacto ambiental gerado pelo setor energético (Prasad; Bansal; Raturi, 2014; Vera; Langlois, 2007; Lehtila; Pirila, 1996). A mitigação dos impactos ambientais associados ao fornecimento e uso de energia passou a ser um elemento central no planejamento de políticas energéticas com o aquecimento global, destacando-se como um desafio que demanda reduções significativas no consumo de combustíveis fósseis (Lehtila; Pirila, 1996).

“A produção, o transporte e o uso de energia levam a importantes pressões antropogênicas sobre o meio ambiente, que vão desde mudanças climáticas, desmatamento, poluição do ar, da água e do solo” (Vera; Langlois, 2007, p. 880, tradução própria⁴). Todo o processo de geração e uso energético pela humanidade pode gerar impactos negativos ao meio ambiente, como poluição atmosférica e perdas aos ecossistemas, a depender do tipo de fonte e recursos utilizados, a forma de manejo dos mesmos, a regulamentação e a disponibilidade de

³ No original: “energy planning involves finding a set of sources and conversion devices so as to meet the energy requirements/demand of all tasks in an optimal manner”

⁴ No original: “energy production, transport and use lead to important anthropogenic pressures on the environment, ranging from climate change, deforestation, air, water and soil pollution”.

mercado. O nível de impactos ambientais depende, então, da estrutura política e técnica adotada no setor de energia combinadas e selecionadas a partir do planejamento energético.

Em vista disso, argumenta-se que o plano de energia deve apoiar o desenvolvimento sustentável. Para isso, Prasad, Bansal e Raturi (2014) apontam que é preciso considerar o critério ambiental, econômico e social. O planejamento energético deve inserir tecnologias sustentáveis que contribuam para a redução das emissões de gases de efeitos estufa (GEE) e que reduzam os impactos socioambientais. Além disso, é necessário promover uma economia energética menos dependente em combustíveis fósseis, conciliando o crescimento econômico e a preservação ambiental. Ademais, defende-se a necessidade de levar em consideração o impacto desse setor à sociedade e seu bem-estar, bem como promover a participação social, tanto no processo político quanto no processo produtivo.

Nesse sentido, a demanda global pelas energias renováveis tem crescido com novos investimentos e mercados para substituir os combustíveis fósseis nos serviços de energias, como geração elétrica e combustíveis para transportes (REN21, 2013 apud Prasad; Bansal; Raturi, 2014). O aumento dos investimentos ilustra o interesse do mercado e dos governos nas renováveis. Tais tecnologias representam uma alternativa mais sustentável na produção, fornecimento e utilização de energia, substituindo as fontes tradicionais de energia poluentes e prejudiciais ao meio ambiente, contribuindo para a redução dos gases de efeito estufa e, conseqüentemente, para alcançar as metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

Ressalta-se, ainda, que não há exatamente um planejamento energético global em termos de legislação e execução. Sendo assim, o planejamento nacional assume peso no meio internacional representado por acordos internacionais estabelecidos entre diferentes governos em conferências como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (Prasad; Bansal; Raturi, 2014). As metas climáticas são definidas em acordos internacionais por meio de reuniões multilaterais entre os agentes governamentais e as instituições de atuação global, contudo a jurisdição e prática dos referidos objetivos são exercidos pelos Estados a partir de seus respectivos planos. O planejamento energético nacional representa, então, fator determinante para progredir nos debates ambientais e alcançar o escopo de combate às alterações climáticas globais.

No planejamento energético nacional, argumenta-se que é preciso realizar uma análise detalhada do setor energético, a qual deve ser integrada a um programa ou estratégia nacional voltada para o desenvolvimento sustentável no setor de energia (Vera; Langlois, 2007). Além disso, os formuladores de política energética nacional devem ter conhecimento sobre os status atual do país em termos de sustentabilidade energética e econômica, identificar os pontos que

necessitam de melhorias e considerar as formas de alcançá-las. É fundamental que os formuladores de políticas compreendam as implicações das estratégias e iniciativas adotadas nas áreas de energia, meio ambiente e economia, bem como seus efeitos na estruturação do desenvolvimento e na possibilidade de torná-lo sustentável (Vera; Langlois, 2007).

Para um plano que promova a sustentabilidade, alguns autores se atêm ao fator econômico para os planejamentos do setor energético como uma das vertentes importantes (Prasad; Bansal; Raturi, 2014; Schrattenholzer, 2005; Llano-paz et al., 2017; Awerbuch, 2006). Nessa perspectiva, entende-se que os múltiplos setores da economia, como os setores comercial, de transporte e residencial, dependem de serviços de energia eficientes e seguros (Vera; Langlois, 2007). Ou seja, a energia é essencial para o mecanismo das cadeias produtivas, uma vez que a indústria e demais setores econômicos dependem da energia para produzir. No setor agrícola, a exemplo, as máquinas de plantação e colheita são movidas a combustíveis, isto é, por uma fonte de energia. O produto proveniente desse setor é base para o abastecimento dos mercados e indústrias. Dessa forma, o planejamento energético deve considerar a influência do setor de energia nos demais setores econômicos, e não ser tratado de forma isolada.

Além disso, o planejamento energético deve levar em consideração o fator econômico como instrumento para a realização do plano, estruturando-o em conformidade ao contexto econômico nacional. Considerando os mercados de energias, por exemplo, estabelece-se subsídios como um instrumento de incentivo para a formulação de políticas energéticas nacionais, direcionados, cada vez mais, às energias renováveis. Além disso, tem-se os impostos para internalizar os custos externos e a possibilidade de permissões para emissão, o que permite ao proprietário emitir uma determinada quantidade de poluentes (Schrattenholzer, 2005). É uma forma de conseguir recursos financeiros, viabilidade política e regulamentação alinhada ao mercado e ao cenário econômico do país para garantir uma maior eficiência do planejamento e o desenvolvimento sustentável.

Apesar do reconhecimento do setor econômico como fundamental no planejamento energético, parte da literatura critica o critério de custo com o objetivo de garantir benefícios econômicos. No planejamento energético, na análise de benefícios, geralmente usa-se como abordagem metodológica o critério de menor custo para selecionar as fontes e as formas de geração de energia no setor energético, favorecendo a tecnologia de menor custo (Llano-paz et al. 2017). Isto é, existe uma tendência tradicional metodológica no processo de elaboração do planejamento energético que, ao considerar a vertente econômica, adota-se o critério de menor custo para gerar energia da forma mais econômica disponível, sendo esta comumente

relacionada a fontes já estabelecidas no mercado internacional e nacional, com destaque às fontes fósseis, caracterizadas por um alto nível de poluição.

No entanto, essa abordagem era consideravelmente suficiente em uma era tecnológica em que as alternativas de geração de energia e preços estáveis eram mais homogêneas. No contexto atual, com altas inovações e múltiplas tecnologias em alto nível de complexidade e incertezas, esse critério não se apresenta como o mais viável (Awerbuch, 2006). As tecnologias energéticas avançaram e há um grande portfólio de energias, o que agrega um alto nível de complexidade para definir e reconhecer quais os benefícios possíveis atrelados não só ao barateamento da produção de novas fontes de energia, sobretudo renováveis, mas também ao ganho final para o desenvolvimento ambiental, econômico e social.

Sendo assim, defende-se um planejamento que avalie o mix de geração entre fontes de energias convencionais e renováveis, deixando de priorizar exclusivamente alternativas de baixo custo (Awerbuch, 2006). Apesar da importância econômica como promoção para a viabilidade técnica e como uma forma de análise de benefícios econômicos, o planejamento energético deve ser estruturado em uma combinação estratégica de recursos e redução dos custos ambientais e sociais.

c) Hidrogênio Verde

Apesar dos esforços globais para alertar sobre a urgência climática e sobre a necessidade de acelerar o processo de transição energética, a alta dependência em combustíveis fósseis dificulta a redução das emissões nos segmentos relacionados à energia, em especial o setor de energia elétrica, transporte e indústria (Oliveira; Beswick; Yan, 2021). Diante disso, os debates para a implementação das tecnologias de energia renovável em substituição às fontes de energias fósseis têm gerado pressões em muitos países.

Nesse cenário, a energia fotovoltaica e a eólica são frequentemente vistas como as tecnologias mais apropriadas e econômicas para a implementação em larga escala. No entanto, Squadrito, Maggio, e Nicita (2023) argumentam que essas tecnologias são dependentes das condições climáticas e geográficas e que, por essa razão, o hidrogênio, com alto potencial para armazenamento de energia, apresenta-se como uma solução ecologicamente sustentável e economicamente competitiva.

Além disso, o hidrogênio, um vetor de energia sustentável, tem sido promovido como uma alternativa para descarbonizar setores difíceis de abater, como a indústria pesada e o setor de transporte de longa distância (Cheng; Lee, 2022). Para tanto, a produção dessa

tecnologia deve ter como base fontes renováveis ou de baixa emissão, configurando-se, então, como hidrogênio verde. Como Hassan et al. (2024) define:

O conceito de hidrogênio verde refere-se ao processo de produção do gás hidrogênio por meio da eletrólise, utilizando fontes de energia renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. Diferentemente do método convencional de produção de hidrogênio a partir do gás natural, o hidrogênio verde é considerado uma opção ambientalmente amigável e sustentável, pois não emite gases de efeito estufa durante sua produção e uso (Hassan et al., 2024, p. 311, tradução própria⁵).

Isto é, o hidrogênio pode ser produzido a partir de variadas matérias-primas e tipos de fonte de energia, o que determina os níveis de emissões no processo de obtenção e transmissão desse gás (Velazquez Abad; Dodds, 2020). O hidrogênio verde (H2V) é a produção do hidrogênio pelo processo de eletrólise da água, ou seja, pela separação da água em moléculas de hidrogênio e oxigênio, a partir da eletricidade renovável, se categorizando como “verde” por não emitir dióxido de carbono em seu processo. Portanto, o H2V, como uma tecnologia que pode ser transformada em eletricidade ou combustível, configura-se como uma alternativa sustentável às fontes fósseis para reduzir as emissões de poluentes.

Segundo os autores Squadrito, Maggio e Nicita (2023), a definição geral de hidrogênio verde está associada à ausência de emissões de CO₂, sendo produzido por tecnologias que utilizam fontes renováveis ou que são neutras em carbono, como por processos baseados em bioenergia. Nesse sentido, o hidrogênio derivado da biomassa também pode ser considerado “verde” por sua baixa emissão de CO₂.

Importante ressaltar que, apesar de ser conhecido como “hidrogênio verde”, as definições de hidrogênio verde variam de texto para texto, como “hidrogênio limpo”, “hidrogênio de baixa emissão” ou “hidrogênio renovável”, o que dificulta o entendimento sobre a tecnologia e o processo de inserção do gás nas políticas governamentais e no comércio internacional (Ajanovic, 2022). Existem definições que tanto focam na neutralidade e nas reduções de emissões de gases de efeito estufa, quanto na produção a partir de renováveis com ou sem ressalvas, como o uso de sistemas de captura de carbono (Velazquez Abad; Dodds, 2020)

De todo modo, argumenta-se que hidrogênio verde integra o conjunto de tecnologias essenciais para uma transição energética alinhada às metas climáticas (Noussan et al., 2021). Isto é, o hidrogênio derivado de uma produção sustentável é visto como uma tecnologia

⁵ No original: “the concept of green hydrogen refers to the process of producing hydrogen gas through electrolysis, using renewable energy sources such as solar, wind, or hydroelectric power. Unlike the conventional method of producing hydrogen from natural gas, green hydrogen is considered an environmentally friendly and sustainable option as it emits no greenhouse gases during its production and use”.

promissora para a descarbonização do setor energético e, conseqüentemente, para a redução das emissões de poluentes.

Em vista da implementação dessa tecnologia, diversos planos e estratégias para o desenvolvimento do hidrogênio têm sido elaborados. Para apoiar esses esforços, os governos estão implementando políticas de incentivo, tanto para a construção de novas infraestruturas de distribuição quanto para a produção de hidrogênio verde. Nesse contexto, muitos países têm desenvolvido e implementado estratégias nacionais de hidrogênio com o objetivo de avançar em tecnologias e mercados da substância (Squadrito et al, 2023).

Com isso, autores apontam que o avanço do hidrogênio verde na economia global pode resultar em mudanças significativas nas dinâmicas geoeconômicas e geopolíticas (Squadrito et al., 2023; Noussan et al., 2021). Noussan et al. (2021) indicam que essas estratégias de desenvolvimento da tecnologia de hidrogênio refletem as distintas ambições e demandas energéticas de cada nação, além de evidenciar uma possível divisão entre países importadores e exportadores. Ou seja, visualiza-se uma possível cisão entre aqueles que buscam desenvolver estratégias para impulsionar os objetivos de descarbonização e aqueles que avaliam o hidrogênio como um recurso de exportação.

Apesar das movimentações e ensejos, a literatura aborda as dificuldades da produção e implementação dessa tecnologia. Os autores Noussan et al. (2021) ressaltam que diversos desafios tecnológicos devem ser enfrentados ao longo da complexa cadeia de suprimentos de hidrogênio, como a eficiência relativamente baixa, o que acaba gerando custos elevados para os consumidores finais, além de questões relacionadas ao consumo de água, sendo necessário recorrer à dessalinização ou à recuperação de águas residuais quando não há disponibilidade de fontes de água doce.

Outro desafio são os altos custos de geração do hidrogênio, sobretudo os custos de investimento para eletrolisadores e o preço da eletricidade (Noussan et al., 2021). Alguns afirmam, inclusive, que o gás não assumirá um papel significativo no setor energético tendo em vista seus altos custos de produção (Oliveira et al. 2021)

Diante disso, observa-se a necessidade de ponderar as vantagens e desvantagens do desenvolvimento e inserção da referida tecnologia e considerar o possível papel de complementaridade entre as energias renováveis e o hidrogênio verde para, assim, absorver o que for benéfico para o setor de energia e para atender os critérios de sustentabilidade.

Os conceitos e seus aspectos apresentados serão instrumentalizados ao longo dos capítulos deste trabalho como um plano de fundo para determinados contextos e particularidades. A política climática será abordada a partir da análise do regime climático

internacional e das políticas climáticas nacionais desenvolvidas nesse cenário global. O planejamento energético se relaciona com os trabalhos relativos ao setor energético e a expansão das energias renováveis como um mecanismo de combate às mudanças climáticas, isto é, o planejamento energético como um “braço” da política climática. O hidrogênio verde será discutido como uma tecnologia emergente nesse quadro energético e sua relação com as questões climáticas, especificamente no contexto brasileiro.

A fim de responder à pergunta de pesquisa – como o hidrogênio verde se insere no planejamento energético brasileiro como uma ferramenta de combate às mudanças climáticas? – o presente trabalho estrutura-se em três capítulos, abordando os três aspectos que são necessários para a análise. O primeiro capítulo apresenta a inserção das energias renováveis no regime internacional do clima como tecnologias para promover a transição energética global. No segundo capítulo, analisa-se a trajetória do Brasil nesse cenário, desenvolvendo sobre as políticas e planos voltados para as fontes renováveis, especialmente a partir do contexto do regime climático. O terceiro capítulo aprofunda a inserção do hidrogênio de baixa emissão de carbono no planejamento energético do país e sua relação com a política climática nacional. Dessa forma, a estrutura do trabalho permite compreender como esses três aspectos se conectam e contribuem para a construção de um modelo energético mais sustentável.

1 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO REGIME DO CLIMA

O presente capítulo tem como objetivo contextualizar o papel das energias renováveis no regime internacional do clima, destacando sua relevância na mitigação das mudanças climáticas e na transição energética mundial. A crescente preocupação com o impacto ambiental das atividades humanas levou ao fortalecimento de negociações internacionais sobre a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), nas quais as energias renováveis emergem como uma ferramenta essencial para a descarbonização econômica e a segurança energética.

Inicialmente, será apresentado o regime do clima, com ênfase na evolução dos acordos e tratados internacionais voltados para a mitigação das mudanças climáticas. Isto é, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) e os dois acordos elaborados neste âmbito: o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris. Em seguida, será analisada a inserção e o papel das energias renováveis no combate às mudanças climáticas, abordando as principais políticas e mecanismos que incentivam sua adoção, bem como os atores envolvidos. Dessa forma, este primeiro capítulo estabelece as bases conceituais e históricas que sustentam a investigação central deste trabalho.

1.1 O Regime do Clima

Ao passo que a ciência comprovou os impactos das ações humanas ao meio ambiente, a questão climática e ambiental passou, cada vez mais, a ocupar espaço nos debates políticos, ultrapassando o meio acadêmico e científico. Por volta da década de 1980, iniciaram-se os debates e as rodadas de negociações internacionais a respeito das mudanças climáticas. Em 1992, os países assinaram, na Cúpula da Terra, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) como um foro intergovernamental para debater e apresentar soluções para a questão das mudanças climáticas (Basso, 2018).

A UNFCCC, atualmente com 196 países membros, é um instrumento diplomático que afirma o impacto das atividades humanas para as alterações climáticas e a necessidade de agir para reverter tal situação a partir de um plano de ação cooperativo, mas sem estabelecer metas e objetivos específicos (Basso, 2018). A partir dos órgãos subsidiários da convenção e conferências promovidas pela mesma, os países e atores internacionais se reúnem para contribuir na formulação das metas de combate às alterações climáticas, sendo estas provocadas pelas atividades antropogênicas, como a produção de transporte, indústria e

agricultura (Greene, 2000). A Conferência das Partes (COP) é o órgão decisório da UNFCCC desde que esta entrou em vigor em 1994. Sua primeira reunião, em 1995, fomentou as próximas negociações para um novo tratado, resultando no Protocolo de Quioto em 1997 (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018).

Sob o Protocolo de Quioto, a convenção estabeleceu que os países industrializados definissem as metas para a redução dos gases de efeito estufa de forma quantificada, o mesmo que Objetivos Quantificados de Limitação ou Redução de Emissões (QELROs) (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018). Os Estados signatários deveriam buscar reduzir as emissões dos gases poluentes, especialmente dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. O objetivo inicial da UNFCCC centrava-se, então, em controlar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, de modo a não emitir em um nível prejudicial ao planeta Terra (Greene, 2000).

O Protocolo de Quioto deu início a um processo para mitigar as mudanças climáticas. No entanto, as negociações nesse âmbito são marcadas por difíceis debates e divergências entre os Estados, sobretudo quanto aos níveis de emissões. A União Europeia, por exemplo, apoiava metas mais rígidas, enquanto que os Estados Unidos e a Austrália queriam metas mais fracas (Basso, 2018). As exigências dos Estados Unidos para máxima flexibilidade e participação dos países em desenvolvimento na redução das emissões não foram atendidas, o que resultou em sua saída do processo (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018).

O acordo estabeleceu uma meta de redução das emissões em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 entre os anos de 2008 e 2012 pelos 37 países industrializados. No entanto, as ações governamentais não se fizeram efetivas, com países adotando políticas e medidas superficiais (Basso, 2018). Tal política tornou-se complicada devido às divergências e desconfortos entre os países, por não demonstrar ser equitativa. Os desentendimentos nas tomadas de decisões quanto às metas e compromissos da convenção demonstraram a fragilidade de seu objetivo, sendo interpretado como uma questão política e não científica (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018).

Quando o 1º período de compromisso do Protocolo chegou ao fim em 2012, apenas a Nova Zelândia, a União Europeia e a Rússia tinham reduzido suas emissões em comparação aos níveis de 1990. Nas negociações posteriores, teve-se uma transição da abordagem QELROs para mecanismos mais flexíveis e voluntários. Em 2013, na COP 19, para estabelecer um novo acordo climático global, ficou definido que, em uma abordagem bottom-up, os membros da UNFCCC teriam que apresentar as Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (INDC) em 2015, visando substituir o Protocolo de Quioto após 2020 (Basso, 2018).

No Acordo de Paris, adotado no contexto da COP 21, em 2015, foi definida uma meta ambiciosa de manter a temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e limitá-la em 1,5°C a partir de esforços globais. Além disso, foi expresso que é preciso alcançar as metas de mitigação de emissões globais o mais rápido possível para manter um equilíbrio sustentável entre fontes e sumidouros de gases de efeito estufa (GEE) que capturam e armazenam emissões (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018). Para tanto, os países devem planejar e comunicar as Contribuições Nacionalmente Determinantes (NDC). Estas, formalizadas no Acordo de Paris, são:

peças de informação quantificáveis sobre como cada país contribuiria para enfrentar as alterações climáticas globais, incluindo o ponto de referência e o ano base, os prazos e períodos de implementação, escopo e cobertura, processos de planejamento, premissas e abordagens metodológicos para estimar e contabilizar as emissões de GEE e remoções (Basso, 2018, p. 44, tradução própria⁶).

A nova abordagem permite que os países estabeleçam suas metas e políticas climáticas internamente, conferindo adaptabilidade e flexibilidade. No entanto, a associação entre as metas globais e as Contribuições Nacionalmente Determinantes não está bem definida no Acordo de Paris. As NDC não estabelecem vinculação jurídica, assumindo caráter de *soft power*, o que dificulta a capacidade da UNFCCC de garantir o cumprimento dos objetivos climáticos do Acordo de Paris. Nesse contexto, muitos países definem contribuições conservadoras, o que limita sua eficiência no cumprimento da meta global de 2°C. Isto é, seu caráter voluntário dá margem aos países para implementarem ações conforme o que for mais vantajoso a curto prazo (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018; Basso, 2018).

Sob o Acordo de Paris, a UNFCCC reconhece a atuação de governanças climáticas não estatais, a qual solidifica o “multilateralismo híbrido” que contribui para a supervisão e facilitação da implementação das NDC, bem como nos esforços iniciados pela convenção para cumprir os objetivos climáticos. Além disso, há a incorporação das questões de adaptação dos sistemas naturais aos impactos climáticos reais ou previstos e de financiamento que disponibiliza recursos para apoiar os países em desenvolvimento a cumprir suas metas climáticas. Sendo assim, a UNFCCC sob o Acordo de Paris incorpora em seus objetivos a mitigação das mudanças climáticas, a adaptação e o financiamento climático em prol de uma atuação ampla e justa (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018).

⁶ No original: “[...] are quantifiable information pieces on how each country would contribute to tackle global climate change, including the reference point and base year, time frames and periods for implementation, scope and coverage, planning processes, assumptions and methodological approaches for estimating and accounting GHG emissions and removals”.

Contudo, a nova abordagem confere aos países a autonomia de escolher seus próprios caminhos para combater as mudanças climáticas. Cabe aos Estados-Partes da UNFCCC definirem suas políticas climáticas, estabelecendo suas metas e setores de atuação. Portanto, alcançar os objetivos de combate às mudanças climáticas da convenção-quadro depende da atuação interna dos Estados. Isto é, apesar do regime do clima internacional apresentar alta relevância para o rumo climático global, coordenando as ações entre os atores internacionais, é necessário considerar a incorporação dos requisitos científicos na política climática doméstica para a promulgação e implementação das medidas de mitigação das alterações climáticas (Basso, 2018).

1.2 O Papel das Energias Renováveis no Combate às Mudanças Climáticas

Essa seção examina a inserção das energias renováveis no regime climático como uma forma de mitigar as mudanças climáticas, destacando sua importância para a redução das emissões de GEE e a transição para uma matriz energética sustentável. No subtópico 1.2.1, será abordado o conceito de energias renováveis, suas principais características e vantagens ambientais. Já no subtópico 1.2.2, será analisada sua inserção nas políticas climáticas internacionais, considerando as iniciativas voltadas para sua promoção. A compreensão desses aspectos é essencial para embasar as discussões dos capítulos seguintes, em especial a análise do papel do Brasil na implementação das renováveis para promover a transição energética.

1.2.1 Sobre Energias Renováveis

O consumo de combustíveis fósseis aumentou significativamente a partir de 1850, resultando em emissões de gases poluentes para atmosfera em grandes quantidades e de forma acelerada. Ao final de 2010, foi comprovado que a maioria das emissões globais de gases de efeito estufa antropogênicas foi resultado do consumo de combustíveis fósseis, em que o aumento das concentrações corresponderam a 39% acima dos níveis pré-industriais (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016).

Diante do desafio que a aceleração das mudanças climáticas representa, as energias renováveis são a alternativa mais viável e capaz de reverter a situação. As energias renováveis, também chamadas de fontes de energia alternativas, são definidas como um recurso energético sustentável, inesgotável ou disponibilizado por um longo prazo, pois as

mesmas se reabastecem, que podem ser utilizadas com impactos ambientais mínimos e pouca produção de resíduos. Sua geração, para poder se configurar como uma fonte limpa de energia, tem que ser sustentável para a sociedade e economia atual e futura (Aleixandre-Tudó et al., 2019; Panwar; Kaushik; Kothari, 2011).

A energia renovável, como uma fonte sustentável, é a disponibilidade energética justa e ampla para todas as gerações e que garante a preservação da Terra (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Uma vez que o uso de combustíveis fósseis são responsáveis pela emissão de dióxido de carbono e outros gases poluentes na atmosfera, a substituição das fontes convencionais pelas fontes de energia renovável contribui para alcançar as metas de sustentabilidade (Aleixandre-Tudó et al., 2019).

Além das energias renováveis contribuírem para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar as mudanças climáticas, reduzindo complicações ambientais e de saúde associados ao uso de combustíveis fósseis, tais tecnologias também fornecem segurança energética, desenvolvimento econômico e social, e acesso a energia. A implementação das renováveis pode resultar em uma menor dependência em importações e ampliar o portfólio de fornecimento de energia, reduzindo a vulnerabilidade energética à volatilidade do mercado. Além disso, as energias renováveis podem ampliar as oportunidades, a produção e a quantidade de emprego, impulsionando o crescimento econômico e a expansão energética. As tecnologias sustentáveis também podem contribuir para o acesso a energia de forma global, uma vez que as mesmas são mais competitivas em áreas rurais em termos de distribuição energética em comparação às fontes tradicionais, além de fornecer mini redes de geração de eletricidade (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016).

Entre as energias renováveis, têm-se a energia hidrelétrica, solar, eólica, geotérmica e a bioenergia. A energia hidrelétrica é uma fonte energética aproveitada da água, em que esta é usada para girar turbinas e, a partir desse movimento, prover eletricidade. Sua geração não emite gases de efeito estufa, sendo, portanto, denominada como uma fonte de energia limpa. A energia solar refere-se às tecnologias renováveis que extraem energia da irradiação solar e geram eletricidade pela energia fotovoltaica. A energia eólica faz uso da energia cinética do movimento do ar. Ela é considerada uma fonte renovável dominante no mundo entre as demais. Sua produção se dá pela instalação de turbinas eólicas no mar (*offshore*) e na terra (*onshore*), transformando a energia do vento em eletricidade. A bioenergia é um tipo de fonte energética que se origina de fontes biológicas, isto é, pela biomassa. Ela pode ser usada no setor de transporte, em geração de eletricidade e aquecimento. Esse tipo de fonte contribui para a meta de redução das emissões de GEE e apresenta grande potencial como um

combustível. A energia geotérmica é a fonte de energia obtida no interior da Terra. Nesta, o calor que gera energia é produzido de forma natural nos processos físicos internos do planeta (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016).

As tecnologias renováveis são consideradas fontes de energia limpas que minimizam os impactos ambientais. No entanto, o desenvolvimento e aplicação das energias renováveis dependem de vários fatores, como os instrumentos tecnológicos, a questão econômica (desencadeada pelos custos de produção), as limitações ambientais e a aceitação social (Aleixandre-Tudó et al., 2019). Além disso, o uso de fontes de energia renováveis depende das políticas e instrumentos de incentivo do país. Recomenda-se, inclusive, a formulação de políticas e discussões sobre as referidas tecnologias em todos os setores para introduzi-las e sustentá-las (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016).

As pesquisas sobre essas fontes renováveis foram iniciadas no final do século XX, quando a produção e comercialização de petróleo passou por choques (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Em seguida, as mudanças climáticas se tornaram uma das grandes preocupações globais (Aleixandre-Tudó et al., 2019). Nesse contexto, interações entre governos, organizações internacionais, agências intergovernamentais e atores do setor privado passaram a ser constituídas e, no século XXI, intensificadas para fazer a transição da matriz energética global (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Assim, as energias renováveis foram colocadas como uma medida essencial para o combate às mudanças climáticas, reduzindo as emissões de CO₂ (Aleixandre-Tudó et al., 2019). Desde então, as energias de baixa emissão vêm crescendo em escala crescente. Diferentemente do início dos anos 2000, as fontes de energia renováveis foram responsáveis por 22% da geração total de energia mundial em 2012 (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Em 2019, as energias renováveis representavam em torno de 16% da matriz energética mundial (FGV Energia, 2020).

1.2.2 Inserção das Renováveis no Regime do Clima

A comunidade científica afirma que é preciso reduzir as emissões de gases de efeito estufa para mitigar os efeitos nocivos das mudanças climáticas (IPCC, 2018 apud Uzundu, Lele, 2024). Para isso, se faz necessário substituir os combustíveis fósseis, intensivos em carbono, pelas energias renováveis, como fontes solar, hidrelétrica e eólica, por serem fontes de energia de baixa ou zero emissão. Frente à urgência climática, a energia renovável tem sido cada vez mais inserida na agenda política global para promover a transição energética (Uzundu; Lele, 2024).

As tecnologias de energia renovável a nível global seguem crescendo. Sua implementação em favor das metas de mitigação das emissões é estruturada pelas políticas nacionais e regionais, pelos acordos internacionais e pelas colaborações entre organizações internacionais e demais entidades, a fim de fornecer conhecimento, assistência técnica e financiamento para projetos de desenvolvimento e aplicação das referidas tecnologias (Uzondu; Lele, 2024).

Nesse sentido, o setor energético e, conseqüentemente, a sua governança, têm tido destaque. A Governança Global de Energia (GEG) refere-se às relações econômicas, políticas e sociais entre os atores internacionais relacionadas à cadeia energética (Van de Graaf; Colgan, 2016 apud Duarte, 2024). No entanto, a atuação internacional em energia é limitada. Isto porque o fornecimento de energia, como algo essencial da economia nacional, é tradicionalmente visto como uma responsabilidade soberana dos Estados (Hirschl, 2009). A governança energética é guiada, então, pelos interesses nacionais. Nesse cenário, as organizações internacionais, comumente vinculadas a processos de *soft law*, estabelecem acordos e compromissos voluntários com os Estados, constituindo uma participação global restrita e, até mesmo, ineficaz (Duarte, 2024).

Devido a essa autonomia do setor energético em termos de intervenção, a política das energias renováveis é fragmentada. Como resultado de uma governança fragmentada, tem-se a atuação, em várias escalas, de uma série de instituições internacionais nos processos relacionados às energias renováveis. “A governança das energias renováveis é, em muitos aspectos, um subconjunto da governação da energia e das alterações climáticas, e tem sido como seriamente subdesenvolvida a nível global” (Leal-Arcas; Minas 2016, p. 624, tradução própria⁷). Sua fragmentação, no entanto, tem sido relativamente reduzida pela cooperação entre organizações e processos internacionais.

Neste século, as energias renováveis cresceram rapidamente. Em 2023, por exemplo, a implementação das renováveis atingiram uma capacidade de 3870 GW, alcançando um novo recorde global (IRENA, 2024). Este cenário é fruto de ações políticas em modelo bottom-top que se globalizaram ao longo do tempo. As energias renováveis são governadas, então, por um sistema complexo de ações internacionais, nacionais e transnacionais constituídas neste século sob o auspício de negociações intergovernamentais formais sobre clima (Meckling, 2018).

⁷ No original: “renewable energy governance is in many ways a subset of energy and climate change governance, and has been described as ‘seriously underdeveloped’ at the global level”.

A geopolítica da segunda metade do século XX impulsionou a governança global de energia. Nesse período, os países produtores e consumidores de petróleo compreenderam que era necessário alinhar os pensamentos a partir de organizações colaborativas para defender seus interesses e reduzir os custos de transação. A partir do final do século, as problemáticas climáticas e a exigência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa desafiaram essa estrutura da governança energética centrada em questões de oferta e demanda da energia para um olhar voltado às implicações ambientais provenientes dos combustíveis fósseis. Com isso, ao longo do século XXI, o alinhamento entre a política energética e climática se caracterizou por avanços, com a integração crescente das energias renováveis motivada pela atuação e cooperação entre instituições como IRENA, AIE e ONU com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas no contexto do regime do clima (Heubaum; Harald, 2015).

Na década de 1970, sobretudo após as conferências sobre desenvolvimento sustentável em 1972, as políticas energéticas das nações desenvolvidas passaram a ser debatidas na Organização das Nações Unidas (ONU), o que resultou em documentos centrados nas questões de oferta e demanda do setor de energia, mas sem especificidades para a renováveis. Após a crise do petróleo na década de 1970, os países viram a necessidade de reduzir a dependência do petróleo e procurar por fontes alternativas. Sob esse jugo, em 1981, em Nairobi, convocada pela ONU, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Fontes Novas e Renováveis de Energia, considerando as energias renováveis como fontes de transição em um viés econômico. A partir dessa conferência, foi desenvolvido o Programa de Ação de Nairobi, o qual favoreceu questões ambientais, mas foi marcado por disputas de interesses políticos (Karlsson-Vinkhuyzen, 2010 apud Duarte, 2024)

Na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Eco-92), realizada em 1992, os países participantes acordaram a Agenda 21, a qual propõe ações voltadas para eficiência energética, redução de consumo e investimento em tecnologias sustentáveis, reforçando a ligação entre energia e conservação ambiental, mas sem abordar as fontes de energias renováveis de forma específica (Duarte, 2024). O tratado elaborado na ocasião, a UNFCCC, enfatiza as questões de desenvolvimento sustentável e tecnologias limpas, mas aborda de forma limitada a energia. O Protocolo de Quioto, assinado em 1997, estabelece metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas não menciona de forma única os combustíveis fósseis e faz referência poucas vezes a energia (Heubaum; Biermann, 2015; Duarte, 2024).

Porém, a UNFCCC, máximo representante do regime do clima internacional, desempenha papel importante no fomento às energias renováveis no mundo como uma forma

de mitigação das mudanças climáticas mesmo que não diretamente. A obrigação de redução das emissões de gases de efeito estufa sob o Protocolo de Quioto e a exigência do Acordo de Paris de envio das Contribuições Nacionalmente Determinantes (NDC) pelas partes não trazem de forma explícita a introdução de energias renováveis na matriz energética global, mas podem ter influenciado a incorporação das tecnologias renováveis na regulamentação climática (Leal-Arcas; Minas, 2016).

A convenção, sob o objetivo de mitigar as emissões de GEE, apoia diversos projetos de energia renovável, por meio de assistência tecnológica, pelo Mecanismo de Tecnologia, e financeira, pelo Mecanismo Financeiro aos Estados-Partes da Convenção. Exemplo disso é o apoio fornecido pelo Centro de Tecnologia Climática e Rede (CTCN) e o Fundo Verde para o Clima (GCF) para prestar assistência técnica aos países em desenvolvimento sobre tecnologias climáticas e financiar projetos de inovação (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Em 2000, foi estabelecido pela ONU os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), um conjunto de oito objetivos globais que inclui metas de desenvolvimento sustentável, justo e pacífico, especialmente no Sul Global. No entanto, entre seus objetivos, não havia metas relativas à energia. Somente em 2001, em uma reunião da Comissão das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável (CDS), é que a energia foi citada de forma ampla, considerando as dimensões econômica, ambiental e social. Em 2002, pouco tempo depois da CDS, se deu a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (WSSD) em Johannesburgo, promovida pela Organização das Nações Unidas (ONU). A WSSD, considerada “a institucionalização internacional da política de energia renovável”, estabeleceu o objetivo de expandir a quota de energias renováveis, com uma abordagem de metas e cronogramas (Meckling, 2019, p. 9, tradução própria⁸; Duarte, 2024).

Em 2004, para atender as designações da WSSD, foi criada uma plataforma interinstitucional, como um mecanismo multilateral, sob a égide da ONU. Essa, nomeada ONU Energia, busca promover, como uma rede especializada, a coerência e cooperação no sistema das Nações Unidas para o desenvolvimento de políticas energéticas eficazes, alinhadas aos objetivos do WSSD (Duarte, 2024). No mesmo ano, como tinha sido anunciado, na WSSD, pelo Chanceler da Alemanha, Gerhard Schroder, foi sediada a Conferência Internacional sobre Energia Renovável, na Alemanha, a qual resultou em um plano internacional de ação para avançar na transição energética mundial para energias sustentáveis (Meckling, 2019).

⁸ No original: “the international institutionalization of renewable energy policy”.

Em 2015, as INDC apresentadas pelos países ao Secretariado da UNFCCC, como primeiros planos climáticos das partes, trouxeram uma ênfase no modelo de promessa e revisão sobre a regulamentação nacional das energias renováveis. As INDC, como avaliado pelo relatório da UNFCCC, continham ações relacionadas ao investimento, infraestrutura, produção e tarifas para as energias renováveis. Como exemplo, nas contribuições apresentadas pela China inclui-se a promessa de aumentar para cerca de 20% a participação dos combustíveis não fósseis na geração de energia primária, enquanto que a Índia estabeleceu um objetivo de 40% da energia elétrica a partir de combustíveis não fósseis (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Já formalizado, o Acordo de Paris com as NDC fomenta a cooperação internacional para as energias renováveis em favor das metas climáticas, mas sem citar diretamente as questões energéticas (Leal-Arcas, Minas, 2016; Duarte, 2024). O acordo estabelece uma meta de temperatura global abaixo de 2°C e promove, comprometendo os países, a inovação e transferência tecnológica. O mesmo recorre ao Mecanismo Tecnológico e o Mecanismo Financeiro da UNFCCC para apoiar o incentivo, a aceleração e a viabilização da inovação tecnológica em prol da mitigação de emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento sustentável (Leal-Arcas, Minas, 2016). Tais mecanismos, como expresso pelo artigo 6º do Acordo de Paris, ficam sobre a orientação das Conferências das Partes (COPs) para fortalecer os dispositivos e fornecer diretrizes para diversas ações de redução das emissões (Acordo de Paris, 2015).

No entanto, o texto do acordo não expressa de forma específica as questões de energia. Em contrapartida, as Contribuições Nacionalmente Determinadas de cada país-membro trazem a necessidade de alterar a política energética nacional para favorecer a transição energética. O acordo, então, representa uma influência internacional positiva para as alterações da matriz energética global, fornecendo uma estrutura em que os países se comprometem a reduzir as emissões de gases poluentes e a melhorar a implementação de fontes de energia renovável, contribuindo para o combate às mudanças climáticas (Duarte, 2024; Uzundu; Lele, 2024).

Sem um regime centralizado, diversas organizações internacionais demonstram significativa importância para a introdução e o fomento às energias renováveis para combater as mudanças climáticas. Muitas instituições globais e parcerias multissetoriais, por meio de colaborações com os Estados, contribuem para a governança das energias renováveis (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Com a crise do petróleo em 1973, a Agência Internacional de Energia (AIE) foi originada em 1974 como uma organização própria na OCDE no intuito de coordenar as reações dos importadores de petróleo às interrupções no fornecimento da substância de forma eficaz (Leal-Arcas, Minas, 2016; Heubaum; Biermann, 2015). Apesar de não fazer parte do seu mandato, a agência passou a considerar, ao final do século XX, o impacto do ciclo da energia ao meio ambiente (Heubaum; Biermann, 2015). No cenário de ratificação da convenção climática, a AIE iniciou estudos de tecnologias energéticas alternativas, como as renováveis, para se ajustar e expandir sua atenção às alterações climáticas (Heubaum; Biermann, 2015)

A partir de 2007, a AIE passa a organizar eventos paralelos às conferências das partes (COP) para compartilhar informações técnicas às delegações e contribuir com as negociações climáticas (Heubaum; Biermann, 2015). Em 2012, a agência e o secretariado da UNFCCC assinaram um Memorando de Entendimento com o objetivo de afirmar “esforços mútuos para promover a energia limpa e combater as alterações climáticas” (AIE, 2012 apud Heubaum; Biermann, 2015⁹).

A agência tem desempenhado papel fundamental quanto às fontes de energia de menor emissão. A AIE produz diversos relatórios e estudos sobre as energias renováveis, eficiência energética, estatísticas de emissões e mudanças climáticas, além de produzir e expor uma gama de roteiros tecnológicos para a energia renovável. A AIE é referência para o planejamento energético entre vários países, promovendo, inclusive, a cooperação entre os membros e não membros da agência para as pesquisas, desenvolvimento e implementação das energias renováveis por meio do Programa de Colaboração Tecnológica da AIE (Leal-Arcas; Minas, 2016).

A AIE é referência no setor de energia de forma ampla. Nas energias renováveis, a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) ganha destaque, como primeira organização intergovernamental focada exclusivamente na área (Duarte, 2024; Heubaum; Biermann, 2015). Essa entrou em vigor em 2010 para promover “a adoção generalizada e o uso sustentável de todas as formas de energia renovável” (IRENA, 2024, tradução própria¹⁰). Com cinco anos de existência, a agência já contava com mais de 140 membros e 117 atividades ocorrendo em 90 países pelo mundo. A IRENA auxilia os estados-membros na adoção de energias renováveis, para alcançar uma economia de baixo carbono, por meio do fornecimento de dados e publicações, da colaboração em políticas e desenvolvimento de

⁹ No original: “mutual efforts to promote clean energy and combat climate change”.

¹⁰ No original: “the widespread adoption and sustainable use of all forms of renewable energy”.

mercado, além de oferecer um programa de financiamento concessional. Sua atuação relativamente jovem impacta por meio de colaborações em processos intergovernamentais existentes (Leal-Arcas, Minas, 2016).

Com a produção de informações de fácil acesso sobre os tipos de energias renováveis e suas possíveis rotas para os países e investidores, mais os programas e as contribuições financeiras, a IRENA está assumindo cada vez mais papel de liderança entre os atores internacionais para a transição energética global. A IRENA defende o desenvolvimento de energias renováveis lucrativas, que gerem ganhos econômicos, tendo em vista que o fator econômico atrelado aos combustíveis fósseis é o que, entre outras coisas, mais dificulta e atrasa a transição energética. Defende-se que as alterações climáticas e seus impactos catastróficos para a humanidade não são o suficiente para promover as energias renováveis e, portanto, é necessário associar estas aos objetivos econômicos (Leal-Arcas, Minas, 2016).

Em 2014, a IRENA produziu um roteiro global para implementar as energias renováveis com o objetivo de dobrar a participação de tais tecnologias no setor energético até 2030. Além disso, a agência afirma que mais de 6 milhões de novos empregos no setor de energias renováveis no mundo foram criados em 2013, com indicativos positivos para o futuro, especialmente em energia eólica e solar. Atualmente, a IRENA tem centrado seus trabalhos nos países em desenvolvimento, sobretudo em países da África e da Ásia, pois esses ainda se encontram em um estágio inicial em termos de infraestrutura e tecnologia, além de apresentarem um quadro urgente de poluição. Em Janeiro de 2015, a IRENA e o Fundo de Abu Dhabi para o Desenvolvimento anunciaram um financiamento de 57 milhões de dólares para projetos de energia renovável pelo mundo, disponibilizando o investimento ao abrigo do Mecanismo de Projecto (Leal-Arcas; Minas, 2016, p. 20).

Para além das organizações internacionais, as parcerias transnacionais em energias renováveis têm crescido e exercido papel importante na transição energética global. As parcerias entre as múltiplas partes interessadas surgiram no contexto da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável de 2002. As parcerias multissetoriais foram inseridas na WSSD para complementar os acordos intergovernamentais. Tais parcerias são definidas como colaborações multissetoriais entre governos nacionais, empresas e atores da sociedade civil para atender as especificidades do desenvolvimento nacional por meio de acordos transnacionais (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Uma das parcerias multissetoriais (MSP) que originou-se desse contexto é a Rede de Políticas de Energia Renovável para o século XXI (REN21), sendo esta uma coligação para promover um futuro energético sustentável, facilitando a transição energética global. A

REN21, sediada no PNUMA, tem como membros organizações internacionais, governos nacionais, associações industriais, ONGs, ciência e academia. A REN21 desenvolve materiais com dados atualizados sobre as energias renováveis, como relatórios anuais, e organiza fóruns e conferências sobre o tema (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Outra parceria multissetorial importante para esse percurso de inserção das renováveis entre os países é a Energia Sustentável para Todos (SE4ALL). Lançada pela ONU em 2011, a SE4ALL tem por objetivo duplicar a quota de energias renováveis no mix energético global até 2030 e acelerar a transição energética em países emergentes e em desenvolvimento a partir de colaborações com governos e outras parcerias mundiais (Leal-Arcas; Minas, 2016). Além disso, têm-se algumas parcerias que foram anunciadas na conferência sobre mudanças climáticas de Paris em 2015, como a Missão Inovação (MI) e a Breakthrough Energy Coalition, focadas em pesquisa, desenvolvimento e investimento em energias renováveis em países parceiros (Leal-Arcas; Minas, 2016).

As energias renováveis têm sido promovidas em escala crescente, não só em prol das metas climáticas, mas também pelo progresso do desenvolvimento tecnológico e econômico, especialmente em economias intensivas em carbono, e combate a persistente pobreza energética. A adoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), as ações de bancos multilaterais e as novas organizações intergovernamentais dão destaque para esses objetivos (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Em 2015, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foram estabelecidos pela Assembleia Geral da ONU como elemento central da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Os ODS, assim como os ODM, são um conjunto de metas globais ambiciosas que visam o desenvolvimento justo e sustentável. Os ODS não estabelecem vinculação jurídica com os Estados, não sendo estes obrigados a cumprir as metas. Apesar disso, os objetivos podem influenciar as políticas e planejamentos dos países, além de guiar o sistema de desenvolvimento da ONU e de outras organizações atuantes na área (Leal-Arcas; Minas, 2016).

Ao contrário dos Objetivos do Milênio, os ODS incluem as questões de energia e alterações climáticas nas metas. O objetivo 7 do plano diz respeito à “Energia Limpa e Acessível”, o qual tenciona o acesso à energia eficiente e limpa de forma universal. Nos pontos 7.2 e 7.a do ODS 7, respectivamente, incentiva-se “aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global” e “facilitar o acesso a pesquisa e tecnologias de energia limpa, incluindo energias renováveis, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas”. A realização desses objetivos

depende da ação interna dos países e da cooperação internacional. (Nações Unidas, 2015; Leal-Arcas; Minas, 2016).

O ODS 7 desempenhou um momento importante para a governança de energia global, contribuindo para o destaque ao setor energético e, mais do que isso, a energia renovável no contexto internacional. A ONU, a exemplo, passou a incorporar com mais presença as questões de energia em seus eventos, como o Diálogo de Alto Nível em Energia (HLDE), realizado em 2021, que reuniu, entre outras autoridades estatais, Chefes de Estado, organizações internacionais, CEOs e outros atores para definir metas ambiciosas e dialogar a favor da transição energética, resultando em mais de 400 bilhões de dólares financiados por governos e pelo setor privado (Duarte, 2024; Nações Unidas, 2021).

Os bancos multilaterais de desenvolvimento, assim como bancos regionais, também têm apoiado as energias renováveis como fonte de financiamento e desenvolvedor de programas. Eles têm atuado como importantes intervenientes entre as partes interessadas em energia renovável, como o Banco Mundial que co-lidera a SE4ALL (Leal-Arcas; Minas, 2016). Entre 2017 e 2024, o Grupo Banco Mundial investiu diretamente mais de 16 bilhões de dólares em energias renováveis, direcionados, em maior parte, para infraestrutura de transmissão e distribuição de energia renovável e suporte para regulamentações e políticas (Banco Mundial, 2024).

Estas iniciativas demonstram a integração das prioridades climáticas, como a ampliação de fontes de energia com baixas emissões, na gestão do desenvolvimento. Como a energia renovável compõe um dos 17 ODS, os bancos multilaterais de desenvolvimento desempenham papel crucial para atingir as metas (Leal-Arcas; Minas, 2016). Tais financiamentos colaboram para a implementação das renováveis, que requer infraestrutura e mão de obra, encorajando a formulação e aplicação de políticas para a transição energética, necessária para a redução das emissões de gases de efeito estufa e efetividade do plano climático nacional.

As energias renováveis foram introduzidas nas agendas das negociações políticas multilaterais à medida que as alterações climáticas passaram a ser uma forte preocupação global. Como destaque, aponta-se os fóruns G7 e G20, os quais afirmam a necessidade de promover o desenvolvimento tecnológico para a descarbonização econômica através da implementação de energias renováveis. Este posicionamento comum, promovido pelas maiores economias mundiais, pode influenciar negociações entre muitos outros Estados (Leal-Arcas; Minas, 2016). Na cúpula de 2015, o G7 invocou a necessidade de descarbonizar a economia ainda neste século. Tal apelação foi seguida pelas negociações entre as 196 partes

da UNFCCC na COP pelo objetivo de alcançar um equilíbrio entre as emissões de gases de efeito estufa e a absorção por sumidouros naturais até a segunda metade deste século (Leal-Arcas; Minas, 2016). Observa-se a importância da liderança política exercida nesses contextos para a promoção das energias renováveis e, conseqüentemente, para alcançar as metas climáticas.

As colaborações entre interessados de diferentes setores fomentam a cooperação entre os sistemas das Nações Unidas e outros atores não tradicionais sobre desenvolvimento sustentável e energia limpa (Leal-Arcas; Minas, 2016). A atuação dessas organizações e colaborações contribuem para o acesso a tecnologias e instrumentos financeiros comumente associados como barreiras que impedem os países em desenvolvimento a adotarem as energias renováveis e, por consequência, atingir as metas de mitigação das mudanças climáticas (Uzondu, Lele, 2024).

Conclui-se, portanto, que as energias renováveis são essenciais para cumprir as metas climáticas globais. Para a evolução e integração de tais tecnologias, é fundamental os arranjos políticos. Estes se configuram pelos acordos internacionais e regionais, políticas nacionais e iniciativas colaborativas, os quais possibilitam mecanismos facilitadores e de suporte para a implementação das renováveis nos Estados, como incentivo financeiro, tecnológico e político. As mudanças climáticas se apresentam cada vez mais como uma preocupação internacional. Isto exige uma transição energética sustentável e justa estruturada por políticas eficazes e robustas no plano nacional com a colaboração de entidades e organizações internacionais (Uzondu, Lele, 2024).

1.3 Considerações parciais

Este capítulo possibilitou compreender a relevância das energias renováveis no contexto do regime do clima, destacando sua função central na mitigação das mudanças climáticas e na transição para um modelo energético sustentável. Foi possível observar que, ao longo das últimas décadas, houve um crescimento significativo no reconhecimento das renováveis como ferramentas estratégicas para reduzir as emissões de GEE, impulsionado por acordos internacionais, iniciativas cooperativas e políticas nacionais voltadas à descarbonização da economia.

A análise do regime do clima demonstrou que a incorporação das energias renováveis nas metas e estratégias climáticas é um processo gradual, caracterizado por desafios políticos, econômicos e tecnológicos. Logo, é preciso fortalecer as políticas e os investimentos que

incentivam as fontes limpas e eficientes no âmbito internacional e nacional com a participação de diversos atores para promover o desenvolvimento sustentável e contribuir com os objetivos climáticos.

Com essa contextualização internacional, é construída a base para compreender a participação estatal, especificamente a participação brasileira, no regime internacional do clima e a sua importância para a implementação das energias renováveis como um meio de combate às mudanças climáticas, destacando a política climática e energética nacional. A partir disso, será possível aprofundar para a inserção de uma tecnologia sustentável específica (o hidrogênio), considerando o planejamento energético e climático brasileiro. Sendo assim, teve-se nesse primeiro capítulo uma contextualização climática e, principalmente, a importância das energias renováveis em um cenário de alterações climáticas e impactos ambientais.

2 BRASIL E ENERGIAS RENOVÁVEIS

O Brasil, com sua vasta disponibilidade de recursos naturais e uma matriz energética predominantemente renovável, desempenha um papel importante na transição energética global. Este capítulo analisa como o país se insere nesse contexto, abordando tanto sua política climática quanto às ações voltadas para o desenvolvimento e incentivo às energias renováveis.

Primeiramente, será apresentado o perfil de emissões gerais do país para dar destaque ao papel significativo que o Brasil exerce na redução das emissões e para melhor compreender o desenvolvimento de sua política climática. Este desenvolvimento virá em seguida, evidenciando os compromissos assumidos no âmbito internacional e as diretrizes nacionais para mitigação das emissões de GEE.

A partir dessa contextualização climática nacional, a inserção das energias renováveis na matriz energética brasileira será apresentada. Para isso, será exposto o perfil de emissões do país especificamente no setor de energia para melhor compreender suas necessidades e estratégias de política energética. E então, virá as políticas e programas de fomento às renováveis, estabelecidas em um contexto de comprometimento com os objetivos climáticos. Essa trajetória de incentivo das renováveis foi responsável por instituir uma matriz energética com predominância das fontes sustentáveis, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa.

A análise do contexto brasileiro permite identificar as principais estratégias e desafios para impulsionar o setor de energias renováveis, levando em conta suas metas climáticas. Assim, é fornecido subsídios para a discussão sobre o papel do hidrogênio verde no desenvolvimento energético nacional.

2.1 Brasil e Política Climática

Esta seção examina a política climática do Brasil e suas estratégias para mitigar as mudanças climáticas. No 2.1.1, será exposto o perfil de emissões gerais do país. No 2.1.2, serão abordados os principais compromissos assumidos internacionalmente em uma construção da sua política climática no contexto do regime do clima, apresentando sua participação nas Conferências das Partes, bem como seus instrumentos regulatórios e políticos implementados. A análise permitirá compreender os desafios e avanços do Brasil em sua agenda climática e seu posicionamento ao longo dos anos, sobretudo quanto aos aspectos de

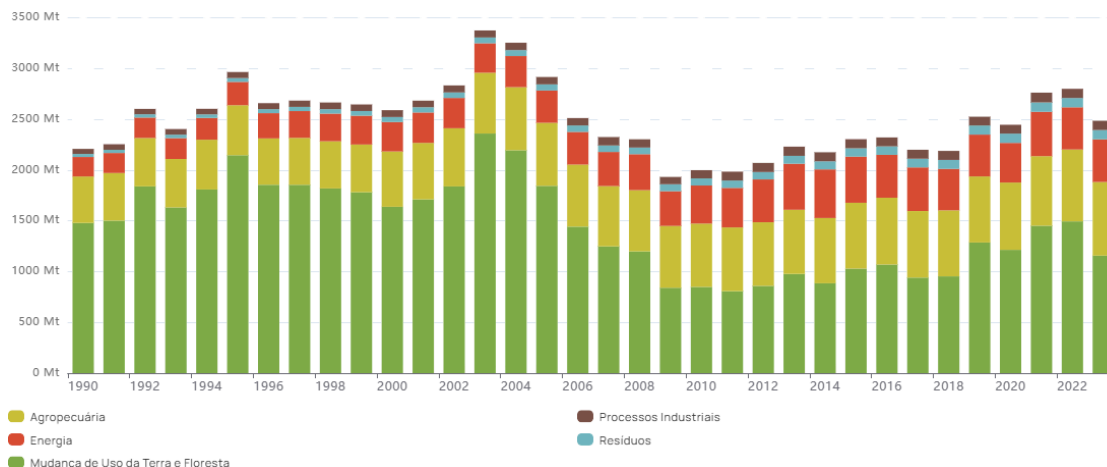
redução das emissões de gases poluentes, como o estabelecimento de metas e as ações de mitigação a serem adotadas.

O entendimento dessas diretrizes é essencial para avaliar o impacto das ações brasileiras no cenário global e nacional na consolidação de uma matriz energética mais sustentável a partir de um planejamento climático e energético coerentes e eficientes.

2.1.1 Perfil de Emissões do Brasil

Até 2021, o Brasil se posicionou como o 7º maior emissor de gases de efeito estufa no mundo, com uma participação de 3%, considerando todos seus setores (SEEG, 2024). Já em 2023, o país passou para a 6ª colocação (Parlamento Europeu, 2024). No mesmo ano, as emissões líquidas de CO₂ antrópicas do país foram quase 2.3 bilhões de toneladas (Gt), se destacando os setores de Mudança de Uso da Terra e Floresta, Agropecuária e Energia (SEEG, 2024) (Figura 1).

Figura 1 - Emissões Totais Líquidas do Brasil (1990-2023)



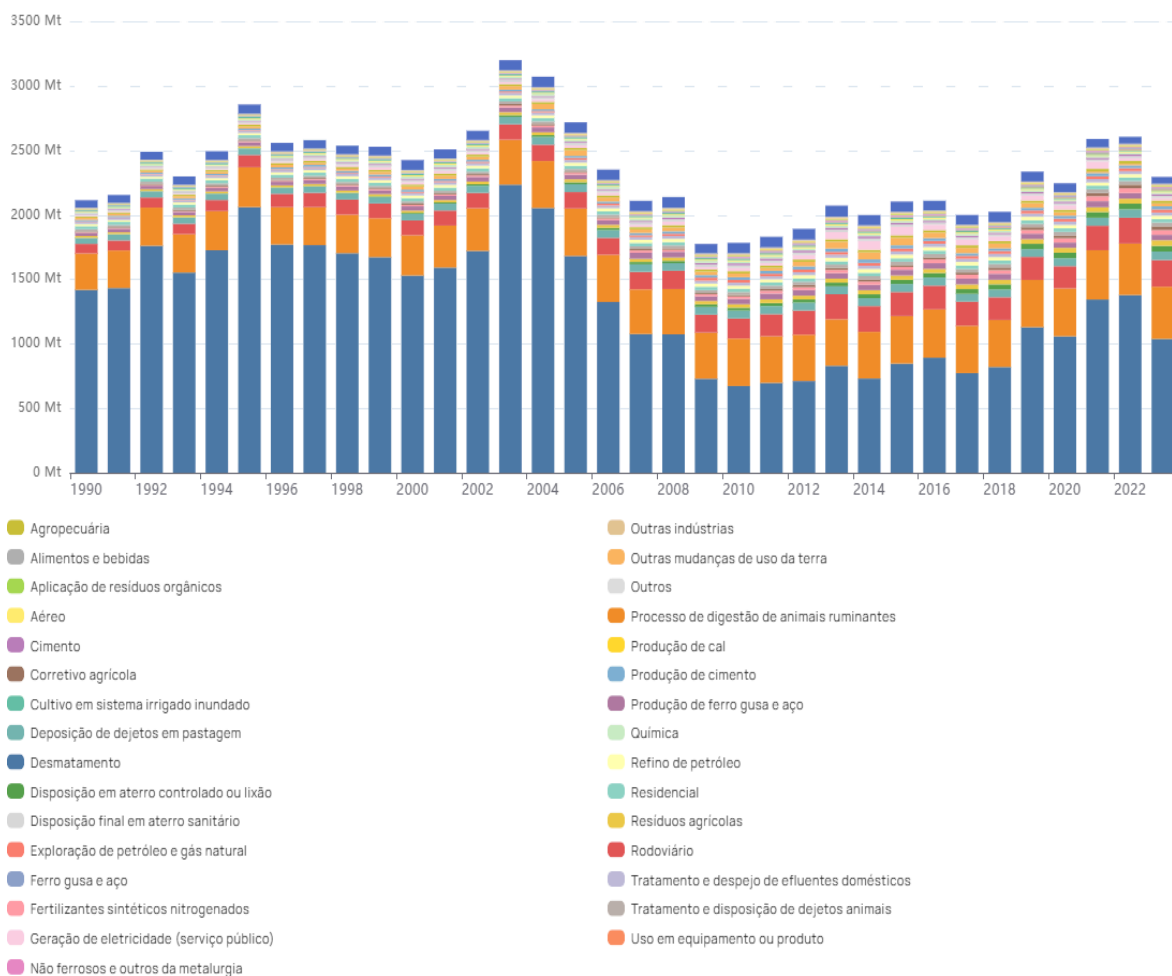
Fonte: SEEG, 2024.

O perfil de emissões do Brasil se diferencia do perfil global, tendo em vista que a maior parte de suas emissões advém do setor de Mudança de Uso da Terra e Floresta (LULUCF) e da Agropecuária, enquanto que no mundo o setor de energia é o maior responsável pelas emissões (SEEG, 2024; Therrie, 2024). Isso se dá por conta da composição da matriz energética brasileira tomada por energias de baixa emissão de carbono, com a predominância da fonte hidrelétrica no setor elétrico, a política nacional de biocombustíveis e a crescente participação das fontes eólicas e solar (Viola, 2010).

A distribuição de suas emissões é desproporcional quando avaliado a liberação de GEE por regiões, sendo considerada uma das mais desiguais do mundo. O norte do país foi a região que mais emitiu em 2023, com mais de 720 milhões de toneladas (Mt) de CO₂ líquidos liberados (SEEG, 2024). Os estados amazônicos, apesar de serem compostos por apenas 12% da população, são responsáveis por cerca de 40% das emissões, enquanto que o restante dos estados brasileiros são responsáveis por 60% das emissões e contêm 88% da população em média. As emissões das áreas amazônicas são uma das mais altas no mundo (Viola, 2010).

O setor de Mudança de Uso da Terra e Floresta é o que mais emite GEE desde 1990, quando as emissões passaram a ser medidas no país. Cerca de 4,8 bilhões de toneladas de carbono são emitidas no mundo todo a partir do desmatamento (EOS, 2024). As atividades nas florestas brasileiras, sobretudo na Amazônia, contribuem para esse número de emissões. Em 1994, 75% das emissões do país foram provenientes do desmatamento da Amazônia. Entre 1994 e 2007, teve-se uma redução de 20% das emissões por essa atividade (Viola, 2010). Contudo, o desmatamento de florestas passou a aumentar novamente em 2019, passando de 820 Mt de emissões em 2018 para mais de 1.12 Gt em 2019 e para cerca de 1.37 Gt em 2022 (SEEG, 2024) (Figura 2). Em 2023, o bioma da Amazônia emitiu mais de 911 Mt de CO₂ líquidos, principalmente devido às atividades de desflorestamento e queimadas (SEEG, 2024).

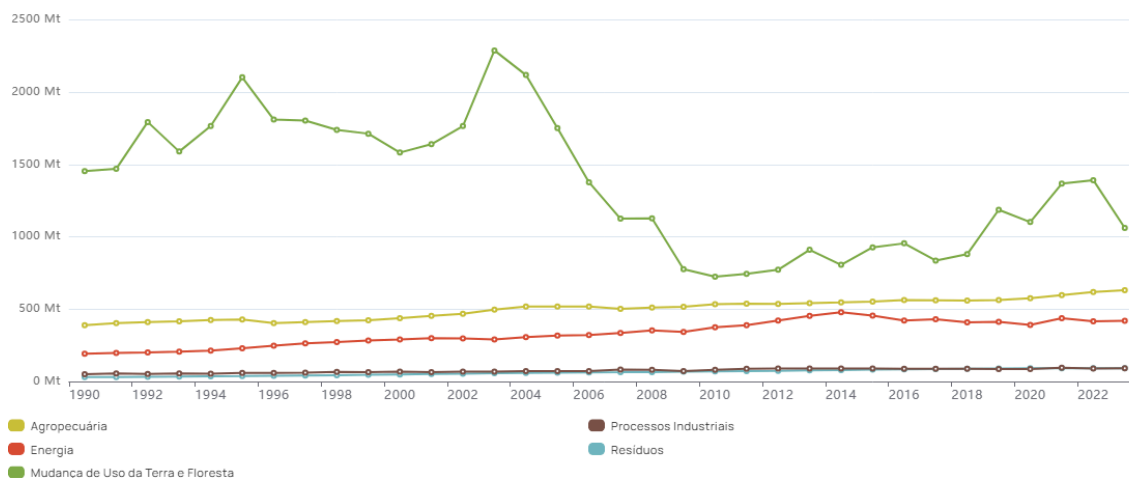
Figura 2 - Sub-categoria em Emissões Líquidas do Brasil (1990-2023)



Fonte: SEEG, 2024.

Apesar do LULUCF ser o setor que mais emite no Brasil, outros setores se apresentam como uma preocupação, especialmente os setores de agropecuária e energia, os quais têm aumentado em número de emissões desde os anos 2000 (Figura 3). O setor de agropecuária passou de cerca de 437 milhões de toneladas de emissões de CO₂ equivalente em 2000 para cerca de 534 Mt em 2011 e para mais de 631 Mt em 2023. Já o setor de energia aumentou cerca de 289 Mt em 2000 para aproximadamente 389 Mt em 2011 e para mais de 420 Mt em 2023 (SEEG, 2024).

Figura 3 - Emissões Totais Líquidas do Brasil (1990-2023)



Fonte: SEEG, 2024.

Apesar do país ser abundante em energias renováveis, outras áreas ganham destaque na trajetória de emissões nacionais, especialmente devido às atividades de desflorestamento. Além disso, há o crescimento das emissões de outros setores, como o segmento energético. Este cenário reforça a necessidade de políticas e planejamentos eficazes para a mitigação das emissões de GEE no Brasil, considerando as particularidades de cada setor. A partir dos contextos vivenciados ao longo dos anos e de suas características próprias, o país passou a desenvolver sua política climática, mas ainda se faz necessário ampliar esta e avançar na implementação de medidas que promovam a redução das emissões.

2.1.2 A Política Climática Brasileira

Ao final do século XX, o Brasil passou a ter um posicionamento mais participativo dos acordos internacionais, internalizando tratados ambientais, como o Protocolo de Montreal e a Convenção sobre Diversidade Biológica. Nesse cenário, o Brasil sediou a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, no Rio de Janeiro, também conhecida como Cúpula da Terra e ECO-92. O Brasil solicitou sediar tal reunião com o objetivo de se desvincular de uma imagem negativa quanto ao meio ambiente, desencadeada pelo forte desmatamento da Amazônia vivenciado nos anos anteriores (Basso, 2018).

Na Conferência, o Brasil defendeu que a questão das mudanças climáticas é uma pauta relevante que deve ser abordada no meio internacional e que há a urgência de mitigar as emissões de carbono. No entanto, quanto às questões florestais e de desmatamento, o Brasil adotou uma postura defensiva e colocou como requisitos para apoiar o Protocolo de Quioto

que não deveria ser imposto aos países em desenvolvimento o compromisso vinculativo, uma vez que as emissões acumuladas e a mitigação das mesmas deveriam ser atribuídas conforme o critério de responsabilidade histórica, e que os compromissos assumidos não deveriam envolver as florestas para permanecer sob soberania nacional (Basso, 2018).

Para apoiar o regime, as instituições climáticas do país passaram por algumas mudanças, as quais serviram de base para as políticas e coordenações posteriores. Em 1999, foi criada a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC) para coordenar as ações brasileiras relativas às mudanças climáticas, no contexto da UNFCCC, entre os ministérios. Posteriormente, em 2000, foi inaugurado o Fórum Brasileiro sobre Mudança do Clima (FBMC) como um canal para reunir os representantes de vários setores, como governo, academia e empresas, e em vários níveis, como estadual e municipal, para debater e informar sobre os problemas relacionados às mudanças climáticas (Basso, 2018).

Reconhecendo a importância das alterações climáticas, o Brasil seguiu desenvolvendo suas políticas climáticas ao longo dos anos. Entre 2005 e 2009, o país realizou esforços para ampliar sua capacidade institucional, como desenvolvimento de mecanismos de monitoramento e fiscalização, e criar áreas de conservação pelos governos federal e estadual com o objetivo de reduzir o desmatamento da Amazônia. Com tais ações do governo, juntamente com o trabalho de organizações não governamentais e nacionais, o Brasil teve êxito em seu objetivo em comparação aos anos de 2001 a 2004. Teve-se uma queda média anual de 20.000 km² para 12.000 km² de área desmatada. Como resultado, o país reduziu cerca de 25% de suas emissões entre 2004 e 2009 (Viola, 2010).

Em 2007, foi criado o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima para monitorar e coordenar as ações e políticas públicas do Brasil quanto às mudanças climáticas. O comitê estabeleceu, em 2009, uma meta de diminuir a curva de crescimento das emissões do país entre 36,1% a 38,9% em 2020. Apesar de ser considerada uma meta da política climática nacional fraca, considerando os altos níveis de emissões à época, a ação demonstra o desenvolvimento dos trabalhos do governo em prol do combate às mudanças climáticas no contexto do regime, o que destoa do posicionamento anterior do país relutante em diminuir as emissões de GEE (Basso, 2018).

Em 2008, próximo da COP 14, o Plano Nacional para Mudanças Climáticas foi anunciado, o qual tinha como ponto central promover um discurso voltado para a proteção da Amazônia, propondo metas e um cronograma para implementar políticas de redução do desmatamento. O plano foi bem recepcionado pela comunidade internacional. No âmbito nacional, no entanto, não gerou um bom nível de satisfação pela comunidade climática, uma

vez que seu texto foi publicado nos últimos minutos, além de não trazer em seu planejamento uma unificação entre clima e energia ou algo parecido (Viola, 2010).

Nas reuniões para a COP 15 de Copenhague para estabelecer um acordo final, no mês de novembro, o Brasil, em um primeiro momento, anunciou uma parceria estratégica com a União Europeia, estabelecendo um posicionamento contra as posições conservadoras dos Estados Unidos e da China. Países liderados por estes dois últimos e a Dinamarca não aprovaram a proposta de que a redução das emissões fosse juridicamente vinculativa. Ao final do mesmo mês, o Brasil, juntamente com outros países em desenvolvimento, anunciou uma posição contra as metas de emissão obrigatórias, a entrega de sua política climática aos países desenvolvidos para apuração - a menos que fosse financiada por estes países - e às taxas climáticas às suas exportações. Retrocedeu, dessa forma, em seu compromisso e em sua parceria com a União Europeia estabelecidos no início do mês. Ao final das negociações, o Brasil afrouxou relativamente sua postura conservadora, se propondo a contribuir financeiramente com os países mais pobres, e aderiu ao Acordo de Copenhague em 2010 (Viola, 2010).

A partir de 2011, as emissões provenientes dos setores de energia e agricultura começaram a aumentar, tornando-se mais importante e necessário na formulação das políticas climáticas. No mesmo ano, em conjunto com outros membros da UNFCCC, o Brasil solicitou que as economias desenvolvidas se comprometessem com metas compulsórias de redução de emissões para um segundo período antes que as economias em desenvolvimento aceitassem metas obrigatórias (Basso, 2018).

Em 2012, o Brasil sediou a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20), onde pôde intensificar os debates sobre compromissos climáticos. Na Conferência, em uma abordagem ampla, o Brasil promoveu uma visão abrangente do conceito de economia verde, para focar no crescimento econômico e social dentro dos critérios de sustentabilidade, no lugar de priorizar as metas específicas de reduções das emissões de GEE, diferentemente da União Europeia que defendia uma abordagem mais rigorosa. O contexto deu força para aprofundar as discussões sobre as metas de redução das emissões. Na COP 18, ainda em 2012, o Brasil manteve sua posição de 2011 de não aceitar metas obrigatórias para países em desenvolvimento. Assim, na renovação do Protocolo de Quioto para um 2º período de compromisso, não foram exigidas metas para essas economias (Basso, 2018).

Em 2015, o Brasil apresentou ao Secretariado da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) sua Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (INDC), convertida em primeira NDC. Nela foi estabelecido o compromisso de

reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e em 43% até 2030 com relação aos níveis de 2005. No texto, foi expresso o objetivo de aumentar a participação das energias renováveis e contribuir para o processo de descarbonização da matriz energética global em vista de manter a temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais (Brasil, 2015).

Em sua INDC, foram definidas medidas adicionais por setores, mas de forma ampla. Especialmente quanto ao setor de energia, em um horizonte de 15 anos, as metas englobava aumentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética em 18%, e expandir a utilização das energias renováveis para 45% da matriz energética, sendo que almejava-se aumentar entre 28% e 33% das renováveis na matriz elétrica, aumentar para 23% a participação das renováveis na distribuição de eletricidade e alcançar 10% de eficiência no setor de eletricidade (Brasil, 2015).

No entanto, alguns dados evidenciam que tais metas não foram ousadas. Por anos, os biocombustíveis já participavam em 18% da matriz energética do país. Em 2016, tinha-se uma participação de 43,5% das energias renováveis na matriz energética e 13,7% na matriz elétrica, sendo que este setor elétrico vinha em escala crescente na utilização de renováveis. Os dados demonstram que o Brasil, em uma postura conservadora, tentou criar uma brecha para conseguir aumentar a quota de combustíveis fósseis na produção de energia, uma vez que o Brasil já se encontrava próximo aos números estabelecidos em sua INDC (Basso, 2018).

Em 2021, na Escócia, a COP 26 direcionou sua atenção para a promoção da economia verde e para a arrecadação de fundos para ajudar os países em desenvolvimento a implementarem seus objetivos de mitigação, além de instigar os países a ampliar suas metas climáticas, tornando-as mais ambiciosas. Nesse contexto, o Brasil assumiu o compromisso de por fim ao desmatamento ilegal até 2030, por meio de mecanismos de monitoramento e fiscalização, e de desenvolver políticas e ações de reflorestamento em seus ecossistemas florestais. Além disso, o país reforçou seu compromisso em ampliar a participação das energias renováveis na matriz energética e de reduzir as emissões de gases poluentes em 53% até 2030 (LCA Consultores; MTempo Capital, 2024).

Em novembro de 2024, durante a COP 29, realizada em Baku, o Brasil entregou a sua nova Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) ao secretário-executivo da UNFCCC (Brasil, 2024). A meta da segunda NDC brasileira consiste em alcançar uma redução entre 59% e 67% das emissões líquidas de GEE até 2035, tendo as emissões do ano de 2005 como referência. O compromisso está em conformidade com a redução de 1,51 a 1,71 GTCO₂ de acordo com o último Relatório de Inventário Nacional submetido à UNFCCC, e visa cobrir as

emissões de toda a economia, em todos os setores, para atender ao objetivo de limitar o aquecimento global em 1,5°C. O documento expressa que a política climática é prioridade federal nas decisões governamentais e define a responsabilidade do Estado em elaborar planos e metas a serem adotadas em todos os setores e níveis, em períodos de curto, médio e longo prazo, para enfrentar a emergência climática (Brasil, 2024).

A segunda NDC brasileira afirma contar com “a melhor ciência disponível” para contribuir com o objetivo global de limitar a temperatura média global a 1,5° acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que a alteração climática é uma questão complexa e que necessita de planos, soluções e medidas que considerem “o meio ambiente, a economia e a sociedade de forma interconectada e interdependente” (Brasil, 2024, p. 7). A nova NDC conta com o Plano Clima e, apoiando este, o Plano de Transformação Ecológica e a Política Nacional de Transição Energética para a implementação das metas estabelecidas. Estes mecanismos vêm sendo desenvolvidos para guiar e acelerar as ações climáticas e de transição da matriz energética do país (Brasil, 2024).

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima, conhecido como Plano Clima, implementará a NDC brasileira, conduzindo as políticas climáticas relacionadas à mitigação e adaptação e estruturando estratégias para cumprir os compromissos do Brasil com o Acordo de Paris. O Plano Clima tem como objetivo orientar, promover e monitorar ações coordenadas voltadas à transição para uma economia com emissões líquidas zero de gases de efeito estufa até 2050 e à adaptação dos sistemas humanos e naturais às mudanças climáticas, por meio de estratégias de curto, médio e longo prazo, à luz do desenvolvimento sustentável e da justiça climática. O Plano busca coordenar ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas alinhadas à agenda global de desenvolvimento sustentável, considerando as vertentes de desenvolvimento econômico, social e ambiental (Brasil, 2024).

O Plano Clima incluirá a “Estratégia Nacional de Adaptação”, com dezesseis planos setoriais, a “Estratégia Nacional de Mitigação”, com sete planos setoriais, e a “Estratégia Transversal”. Os planos setoriais serão compostos por planejamentos de ação e implementação de forma detalhada e participativa para cada setor a fim de alcançar a meta estabelecida pela NDC brasileira para 2035. No âmbito da adaptação, tem-se como objetivo ampliar a capacidade adaptativa, fortalecer a resiliência e diminuir a vulnerabilidade às mudanças climáticas de forma sustentável no contexto das metas climáticas definidas pelo Acordo de Paris. Na dimensão de mitigação, os objetivos são voltados para o aumento da participação de tecnologias limpas, renováveis e de baixo carbono na matriz energética

nacional em substituição aos combustíveis fósseis para contribuir com a redução dos gases de efeito estufa (Brasil, 2024).

O Pacto pela Transformação Ecológica (PTE), instituído em outubro de 2024, representa um compromisso de longo prazo para tomar um conjunto de ações e medidas voltadas aos objetivos de “(i) sustentabilidade ecológica; (ii) desenvolvimento econômico sustentável; (iii) justiça social, ambiental e climática; (iv) consideração dos direitos das crianças e das gerações futuras; e (v) resiliência a eventos climáticos extremos” (Brasil, 2024, p. 3). O pacto é composto pelos eixos de “Ordenamento do território”, “Transição Energética” e “Desenvolvimento sustentável com justiça social, ambiental e climática” (Brasil, 2024).

A partir desses três eixos, o governo brasileiro se compromete a produzir planos de adaptação climática com estratégias institucionais, em todos os níveis, para garantir a segurança da população diante dos eventos extremos climáticos, fomentando, inclusive, a celeridade jurídica em matérias ambientais e climáticas. Além disso, o governo assume o compromisso de promover a inovação tecnológica e o investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono e baixo impacto ambiental para descarbonizar a matriz energética e acelerar a transição energética, bem como incentivar a economia de baixo carbono para o desenvolvimento sustentável, a geração de empregos comprometidos com a proteção ambiental, incluindo a bioeconomia, além de promover a redução do desmatamento e a recuperação de áreas degradadas (Brasil, 2024).

2.2 Brasil e Renováveis

A transição energética brasileira está diretamente ligada à abundância de recursos renováveis disponíveis no país. Esta seção analisa a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional e as políticas que impulsionaram seu crescimento. Considerando a necessidade de mitigar as emissões de GEE, o Brasil tem adotado estratégias para fortalecer fontes como a energia hidrelétrica, eólica, solar e biomassa.

Inicialmente, no 2.2.1, será apresentado o perfil de emissões do Brasil no setor energético, mostrando a importância desse setor para a aplicação de políticas de redução de emissões de GEE. Em seguida, no 2.2.2, serão discutidas as principais políticas e programas governamentais voltados para a ampliação da participação das fontes de energia renováveis, bem como os desafios que persistem para a sua expansão sustentável. Isto permitirá compreender o papel das energias renováveis na estratégia climática do país, bem como as

dificuldades nacionais nesse setor, servindo como base para discussões posteriores sobre tecnologias emergentes, como o hidrogênio verde.

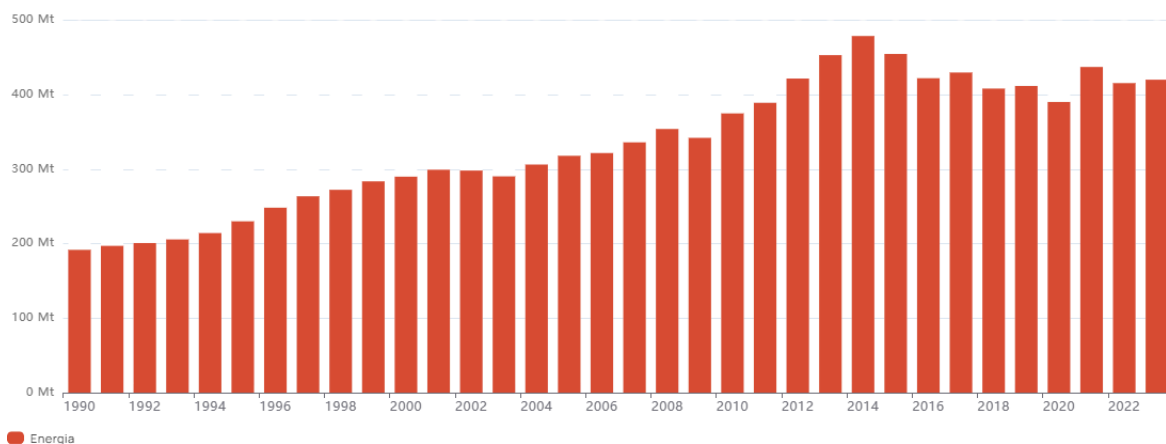
2.2.1 Emissões do Setor Energético no Brasil

No mundo, em 2022, a participação das energias renováveis foi de aproximadamente 14% de renováveis (EPE, 2024). No Brasil, a participação das fontes renováveis na matriz energética foi de 49,1% em 2023, com a seguinte composição: biomassa da cana (16,9%), hidráulica (12,1%), lenha e carvão vegetal (8,6%), eólica (2,6%), solar (1,7%) e outras renováveis (7,2%). Entre 2004 e 2023, a forte presença das renováveis se mostrou relativamente estável. Em 2004, a participação era de 43,5%, em 2014 era de 39,7% e em 2023 de 49,1%. Na matriz elétrica, pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), a participação das renováveis foi de 93% em 2023, com uma participação predominante da fonte hidráulica. No mesmo ano, a geração de energia eólica teve um aumento de 14 TWh e a energia solar fotovoltaica teve um crescimento de mais de 20 TWh (EPE, 2024).

Os dados demonstram uma matriz energética e, principalmente, elétrica abundante em renováveis. Com isso, o Brasil foi considerado o 3º maior gerador de energia renovável do mundo em 2023, atrás apenas da China e dos Estados Unidos (Casarin, 2022). Em utilização de eletricidade por fontes renováveis, no mesmo ano, o Brasil ficou em segunda posição, atrás apenas da Noruega (Be The Story, 2024). Ainda assim, de acordo com o World Resources Institute (2024), em 2022, o Brasil foi o 10º país maior emissor do mundo, quando analisadas as emissões de CO₂, sem incluir o setor de Mudança de Uso da Terra e Floresta.

Apesar de não ser o maior emissor de CO₂ no país, o setor de energia representa uma parcela significativa das emissões, com mais de 400 Mt em 2023, em uma escala crescente ao longo dos anos, como pode ser observado no gráfico abaixo (Figura 4). De acordo com dados do SEEG (2024), em 1990, as emissões totais do setor de energia brasileiro foram menos de 200 Mt, enquanto que em 2023 as emissões chegaram a pouco mais de 420 Mt.

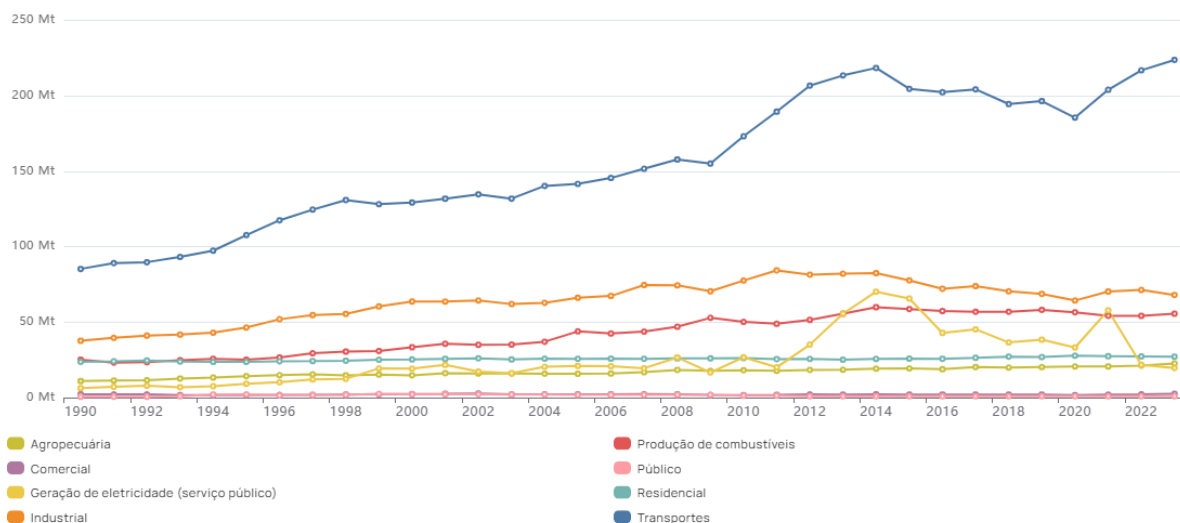
Figura 4 - Emissões Totais Líquidas no Setor de Energia (1990-2023)



Fonte: SEEG, 2024.

Entre as categorias emissoras do setor de energia, transportes, indústria e produção de combustíveis ganham destaque, com mais de 223 Mt, 67 Mt e 55 Mt de emissões em 2023 respectivamente. No mesmo ano, 64,8% do consumo de energia no país foram destinados ao transporte (33%) e ao setor industrial (31,8%) (EPE, 2024). Observa-se no gráfico a seguir um aumento expressivo da categoria Transportes, o que representa, entre outras variáveis (como o crescimento da frota de veículos), a persistente e crescente dependência que o Brasil tem em combustíveis fósseis (Figura 5). De acordo com a EPE (2024), o país teve um crescimento de 12,6% na produção de petróleo entre 2022 e 2023, e mais de 6,9% no consumo de petróleo nos transportes em 2023. De 50,9% da matriz energética de não renováveis total em 2023, 35,1% foi de petróleo e derivados e 9,6% de gás natural (EPE, 2024).

Figura 5 - Categoria Emissora no Setor de Energia (1990-2023)



Fonte: SEEG, 2024.

Apesar de um panorama positivo em termo de crescimento das renováveis no país, especialmente quando comparado a outros Estados, a dependência do Brasil em combustíveis fósseis e o aumento destes na participação energética brasileira intensifica o nível de emissões de CO₂ no país, contribuindo para a expansão dos gases de efeito estufa e, por consequência, para as alterações climáticas globais e demais impactos ambientais.

2.2.2 As Políticas para as Renováveis

No contexto do desenvolvimento do regime internacional do clima e, especialmente, da realização da Rio-92 no Brasil, o país passou a expandir sua política energética, introduzindo as fontes de energias renováveis em sua matriz, como a biomassa, a eólica e a solar, para diversificá-la e compô-la alinhada ao compromisso de mitigação das alterações climáticas proposto pela UNFCCC, bem como por seus aparatos. Em um primeiro momento, o Brasil desenvolveu algumas de suas tecnologias sustentáveis, sobretudo a biomassa e a hidrelétrica, por um viés econômico, a fim de reduzir sua dependência no petróleo. Com os princípios e comprometimentos climáticos, a sua busca pela pesquisa e inserção de renováveis se fortaleceu cada vez mais como uma política de transição energética, visando o combate às mudanças climáticas (Araújo, 2023).

Na década de 1970, o Brasil iniciou a utilização de etanol pelo programa estatal Proálcool, o qual tinha por objetivo incentivar a produção de álcool pela cana-de-açúcar e gerar um combustível alternativo para o setor de transporte diante da crise do petróleo de

1973 que resultou em preços elevados dos combustíveis, sendo algo prejudicial para o país, pois este importava 80% do seu petróleo (Abrão, 2023). Sendo assim, a indústria da cana-de-açúcar para a produção de etanol se originou por um viés econômico a partir de uma política de soberania energética, como uma forma de driblar o aumento dos preços dos combustíveis importados, reduzindo a dependência no petróleo por uma alternativa nacional (Basso, 2018).

No período, incentivos financeiros do governo e do setor privado foram direcionados para a produção e implementação do etanol, visto como um combustível próprio, para além da mistura da substância na gasolina. O cenário impulsionou a fabricação de veículos movidos apenas pelo etanol, chegando a mais de 80% dos veículos leves e 20% de toda a frota movidos pela substância em 1985 (Basso, 2018). No entanto, com uma queda nos preços internacionais do petróleo e uma crise fiscal, a partir da década de 1980, que impediu o financiamento das usinas de etanol e da produção da cana no Brasil, o programa Pró-Álcool chegou ao fim em 1990 (Abrão, 2023).

A partir de 1970, a predominância da fonte hidrelétrica no Brasil foi estabelecida com uma forte presença estatal no contexto de processo de industrialização do país, o qual necessitava um aumento expressivo da geração de eletricidade. Nesse cenário, foi criada a usina binacional de Itaipu. Seu tratado foi assinado em 1973 entre Brasil e Paraguai, dividindo e tornando a usina pertencente a ambos os países. Em 1974, foi criada a empresa Itaipu Binacional. A criação da usina é considerada um marco para o setor energético brasileiro e suas renováveis. Ela reforça o interesse brasileiro em fazer uso de fontes hídricas para a geração de eletricidade, sendo a maior parcela da matriz elétrica, que permanece até a atualidade. Ao final do século XX, a matriz elétrica brasileira era composta por 90% da fonte de geração hidrelétrica (Abrão, 2023).

Na década de 1990, o Brasil enfrentava pressões internacionais quanto às suas ações ambientais e climáticas. Como já apresentado, o cenário internacional vivenciava um aumento da preocupação com relação às alterações climáticas e seus impactos. Diante disso, e com a necessidade de diversificar a matriz energética interna (muito dependente da fonte hidrelétrica e no petróleo internacional), o governo brasileiro passa a lançar alguns programas importantes de promoção às fontes alternativas (Araújo, 2023).

Em 1994, foi lançado o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) para incentivar o desenvolvimento e a adoção de fontes de energias renováveis. A iniciativa teve por objetivo promover o desenvolvimento econômico e social sustentável por meio de energias limpas. O programa é considerado precursor no

fornecimento de eletricidade, por meio da energia fotovoltaica e dos sistemas de turbinas eólicas, em comunidades isoladas sem acesso à rede elétrica. Um ano depois, foi instituído o Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Crasesb), pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (Cepel), para ampliar os estudos e apoiar projetos voltados a energias renováveis no país, a fim de possibilitar um maior inserção de tais tecnologias na matriz energética e, conseqüentemente, contribuir para a redução das emissões de gases de efeitos estufa (Araújo, 2023).

Entre 2000 e 2002, o Brasil vivenciou uma grande crise hídrica com baixos níveis de reservatórios, o que gerou conseqüências negativas para o fornecimento de energia, considerando sua persistente dependência em fontes hídricas. Diante disso, o governo brasileiro elaborou medidas para a expansão da geração termelétrica, com a implementação de um parque termelétrico, assim como o incentivo à energia eólica e a geração de energia pela biomassa da cana-de-açúcar para auxiliar na lacuna deixada pela crise. Em 2001, diante da crise, foi criado o Programa Emergencial de Energia Eólica, o mesmo que Pro-eólica, pela Câmara Brasileira de Gestão da Crise Energética, para ampliar o setor de energia eólica com uma geração de 1050 MW. Este projeto deu base material para a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002 (Lima et al., 2020; Werner; Lazaro, 2023).

O PROINFA iniciou as políticas de incentivos ao desenvolvimento de energias renováveis, sendo elas a eólica, a biomassa e pequenas centrais hidrelétricas. Após a crise de energia elétrica de 2001 e no contexto de maiores exigências ambientais e climáticas, foram elaboradas e implementadas políticas públicas para diversificar e expandir as energias renováveis na matriz energética brasileira (Lima et al., 2020).

Em 2004, teve-se o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNB) pelo governo, com o objetivo de fomentar a produção do biodiesel com incentivos aos pequenos fabricantes e a criação de um arcabouço regulatório com normas nacionais para produção e comercialização da substância, de modo a estimular o desenvolvimento socioeconômico e regional (Lima et al., 2020).

A partir do mesmo ano, foram introduzidos mecanismos de leilões no setor elétrico para o desenvolvimento das tecnologias sustentáveis e expansão da oferta de energia elétrica. Nesse contexto, a Eletrobras, uma empresa estatal de energia elétrica, estabeleceu contratos para a instalação de 3.300 MW, com início da operação programada para 2008, com a garantia de compra dessa energia em até 20 anos a contar a partir do início da operação (Lima et al., 2020; Werner; Lazaro, 2023). Tais leilões, promovidos para garantir que as fontes de baixa

emissão pudessem competir em condições de igualdade com outras fontes geradoras, impulsionaram consideravelmente a participação das energias renováveis a partir de 2010 (Araújo, 2023).

Em 2011, 81,9% da produção elétrica do país veio das hidrelétricas (EPE, 2012). Entretanto, entre 2011 e 2015, o cenário foi outro, ocasionado por uma nova crise hídrica, com redução da geração de energia. Em 2012, o recurso termoelétrico teve seguimento, o que contribui para reduzir os riscos de “apagão”. Contudo, sua produção, em maioria, se dá pelo gás natural, contribuindo para as emissões de CO₂ para a atmosfera. Diante disso, reforçando a fragilidade que representa a dependência do Brasil na fonte hidrelétrica, o país buscou ampliar o mix de sua matriz elétrica (Lima et al., 2020).

Em 2013, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) lançou o fundo privado de R\$3 bilhões para impulsionar pesquisa e inovação em tecnologias sustentáveis, incluindo transmissão de energia, redes inteligentes, energias eólicas e solares, e eficiência energética. A partir de 2014, políticas públicas e investimentos para o avanço da fonte de energia eólica nas regiões Sul e Nordeste do país foram intensificadas, reduzindo os problemas ocasionados pelo uso do sistema hidrotérmico no SNI (Lima et al., 2020).

Na criação do PROINFA, a fonte de energia solar não havia sido citada no documento como uma vertente energética renovável para o Brasil. O impulso a essa tecnologia de forma significativa se deu em 2012 pela Resolução nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual foi revisada posteriormente, e que tinha como proposta estabelecer um quadro favorável de acesso à microgeração e minigeração, possibilitando a integração do sistema fotovoltaico à rede elétrica. Ao final de 2013, haviam 72 ligações de energia solar na rede, já em 2014, esse número chegou a mais de 100 instalações (Lima et al., 2020).

Entre 2014 e 2015, foram realizadas instalações de usinas fotovoltaicas pela Chamada Pública da Agência Nacional de Energia Elétrica para ampliar a geração de energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira. Em 2015, o Ministério de Minas e Energia (MME) criou o Programa de Geração Distribuída (ProGD) para ampliar as medidas direcionadas às instalações de energia renováveis, sobretudo a fonte de energia solar, pelos próprios consumidores (Lima et al., 2020).

Já em 2017, o governo brasileiro lançou a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que tem como finalidade “intensificar a produção de biocombustíveis com base em fatores de sustentabilidade ambiental, econômica e social”, com o objetivo de aumentar para 18%, até 2030, a participação da bioenergia na matriz energética brasileira, por meio de

incentivos aos produtores e pela abertura de mercado de créditos de carbono para redução das emissões de GEE, conhecidos como CBIO (Lima et al., 2020, p. 10, tradução própria¹¹).

Em agosto de 2024, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) aprovou a Política Nacional de Transição Energética (PNTE) para dar apoio ao Plano Nacional do Clima ao indicar as medidas necessárias para a transição energética nos setores econômicos pertinentes. Tais medidas abarcam as questões de regulação, financiamento, investimento e a dimensão social para promover a diversificação da matriz energética brasileira, fomentando os empregos de economia verde e a redução das emissões de CO₂ (Brasil, s.d.). A PNTE visa incentivar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, como as fontes de energia eólica e solar, a biomassa, os mecanismos de captura e estocagem de carbono e o hidrogênio de baixa emissão (Jornal da USP, 2024).

A PNTE estabelece como instrumentos de apoio o Plano Nacional de Transição Energética (Plante) e o Fórum Nacional de Transição Energética (Fonte). O Plante está previsto para atuar como um plano de ação, o qual visa incentivar os aspectos necessários para a expansão das energias renováveis em uma abordagem setorial e transversal. Já o Fonte se configura como um espaço para a interação entre governo, setor privado e sociedade civil para debater a transição energética, em busca de propostas e acordos mutuamente benéficos. A PNTE, apesar de representar um avanço na transição energética brasileira, carece de especificidades em termos de metas e cronograma, sendo ainda estruturada de forma muito ampla (Brasil, s.d.; Jornal da USP, 2024).

Mais recentemente, em 2025, foi sancionada a lei que institui o Programa de Aceleração da Transição Energética (Paten), o qual tem por objetivo fomentar o desenvolvimento e a aplicação das energias renováveis para contribuir com as metas de descarbonização da matriz energética brasileira. Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o programa cria mecanismos, como o Fundo Verde, para estimular as empresas a investirem em tecnologias sustentáveis no país, como combustíveis de baixa emissão. O Fundo Verde, administrado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), irá financiar projetos relacionados à transição energética de forma proporcional ao crédito que as empresas têm para receber da União. Além disso, as empresas que participarem do programa poderão renegociar suas dívidas de tributos federais (Machado, 2024; Brasil, 2025).

¹¹ No original: “intensify biofuel production based on environmental, economic and social sustainability factors”.

2.3 Considerações parciais

O fomento à transição energética global implica a participação e inserção dos Estados nesse processo. Neste quadro, observou-se que o Brasil apresenta uma matriz energética consideravelmente limpa. A fonte de energia hidrelétrica, os biocombustíveis e as fontes de energia eólica e solar ganham destaque entre as renováveis existentes no Brasil.

Nesse sentido, há o argumento de que a forte presença de renováveis em sua matriz energética coloca o Brasil na vanguarda da transição energética (Brasil, 2024). No entanto, apesar da importância e grande participação dessas fontes, mais da metade da matriz energética brasileira ainda é composta por fontes de energias não renováveis. Como visto, a produção e consumo de petróleo tem crescido no país.

Além disso, como observado, as emissões brasileiras de gases de efeito estufa provenientes do setor energético vêm aumentando desde o início das negociações climáticas internacionais (Basso, 2018; Observatório do Clima, 2024). Logo, apesar de não ser o setor que mais emite GEE, o uso de combustíveis fósseis no setor de energia é um dos principais responsáveis pelas emissões no país (EPE, 2021). Diante disso, urge a necessidade de tomar medidas e buscar possibilidades que contribuam para avançar na transição energética brasileira, a qual se faz imprescindível para mitigar as mudanças climáticas e seus efeitos nocivos à vida na Terra, alcançando as metas climáticas nacionais de forma efetiva.

Este capítulo demonstrou a relevância das energias renováveis na matriz energética brasileira e sua importância para os compromissos climáticos do país. Foram analisadas as diretrizes da política climática nacional, bem como as iniciativas voltadas para a ampliação das fontes renováveis, responsáveis por ampliar o nível de sustentabilidade energética no país. No entanto, apesar dos avanços, existem problemáticas persistentes.

A compreensão da trajetória e das políticas nacionais em energias renováveis, a partir de uma agenda climática nacional, permitirá abordar a inserção do hidrogênio verde no planejamento energético brasileiro e como essa tecnologia se posiciona com relação à política climática brasileira.

3 O HIDROGÊNIO NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO DO BRASIL E SUA CONTRIBUIÇÃO CLIMÁTICA

Este capítulo aborda a inserção do hidrogênio de baixa emissão no planejamento energético nacional. A partir do que foi discutido nos capítulos anteriores, será examinado o papel dessa tecnologia para o Brasil, na tentativa de compreender se e como essa tecnologia se insere na política de mitigação das mudanças climáticas.

Primeiramente, o capítulo irá desenvolver sobre o que é o hidrogênio verde, sua produção e classificação, bem como abordar aspectos importantes para melhor compreendê-lo. O capítulo segue então para uma exposição sobre as ações políticas do Brasil sobre o hidrogênio de baixa emissão de carbono. Busca-se explorar o desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão no país, trazendo as políticas e planos de incentivo a essa tecnologia, bem como os atuais investimentos e projetos voltados para a sua produção. Além disso, com maior foco em responder a pergunta central deste trabalho, será analisado como a questão climática aparece nos planos, políticas e planejamentos sobre o hidrogênio de baixa emissão, assim como este aparece na política climática e energética do país.

3.1 O Hidrogênio Verde

O aquecimento climático global e os problemas ambientais são, em grande parte, desencadeados pelo uso de combustíveis fósseis para a geração de energia, processo esse que emite gases de efeito estufa, agravante para as alterações climáticas. No ímpeto de combater as mudanças climáticas e os desafios decorrentes desse fenômeno, o mundo tem procurado por alternativas sustentáveis para produzir energia, e o hidrogênio surge de forma promissora para contribuir para essa transição energética.

O hidrogênio foi descoberto em 1671 pelo químico e físico Robert Boyle em um experimento com ácido sulfúrico e ferro, o qual gerou o gás descrito por ele como “solução inflamável de ferro”. Em 1766, Henry Cavendish, em um experimento com mercúrio, identificou o gás como um elemento diferente e, pensando que o mesmo vinha do metal, o descreveu como “ar inflamável de metais”. Até que em 1783, o químico Antoine Lavoisier descobriu a composição molecular da água e nomeou o referido gás de hidrogênio, sendo que “*hidro*” significa “água” e “*genes*” significa “formação” em grego (Abdin et al., 2020).

O hidrogênio é um elemento químico abundante na terra, inodoro e incolor, de pequena massa, leve e com alta quantidade de energia concentrada por massa. Apesar de sua

abundância, é difícil localizá-lo em sua forma pura (H_2), ou seja, o mesmo se encontra, na maior parte das vezes, em conjunto a algum outro elemento (Azevedo, [s.d.]). Justamente por essa característica, ele é considerado um vetor de energia, mas não uma fonte de energia primária, isto é, o hidrogênio, produzido com o uso de alguma fonte original de energia, armazena e transporta energia para ser usada posteriormente (Santos Jr., 2004).

3.1.1 Produção e classificação

Tal elemento é produzido industrialmente em um processo de separação molecular, em substâncias que apresentam o H_2 em sua composição, com o uso de energia. Na atual produção de hidrogênio, os combustíveis fósseis atuam como a principal fonte de energia, sendo que o gás natural representa 75%, o carvão corresponde a 23% e a eletricidade, o óleo e, em pequena parte, a biomassa, representa cerca de 2% da produção global de hidrogênio (EPE, 2022).

Pode-se realizar essa separação molecular a partir de diversas matérias primas. Na produção a partir da água, por exemplo, realiza-se o processo de eletrólise, decompondo as moléculas de água (H_2O) em oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2), por meio de eletrolisadores (Matos; Bitencourt, 2023). Como recurso hídrico, pode-se utilizar a água do mar, considerando sua abundância, e águas residuais tratadas, favorecendo a reutilização e garantindo um processo sustentável (Cetrel, 2019). Fazendo uso de energias renováveis como fonte energética do processo, é obtido então o hidrogênio verde, considerado o meio mais limpo por não emitir diretamente dióxido de carbono na atmosfera.

Para além do hidrogênio verde, existem outras categorias deste elemento conforme o processo escolhido para produzi-lo, ou seja, a fonte de energia utilizada no processo, associado aos níveis de emissão de CO_2 . Como a ECE (2022) define, o hidrogênio é caracterizado, comumente, pelas seguintes cores:

Figura 6 - Cores do Hidrogênio

	Hidrogênio Preto	Hidrogênio Cinza	Hidrogênio Azul	Hidrogênio Turquesa	Hidrogênio Amarelo	Hidrogênio Rosa	Hidrogênio Verde
Processo	Gaseificação	SMR	SMR ou gaseificação com captura de carbono (85-95%)	Pirólise	Ciclos termoquímicos	Eletrólise	Eletrólise
Fonte	Carvão	Metano	Metano ou carvão	Metano	Energia nuclear	Energia nuclear	Energia renovável

Fonte: Adaptado de ECE (2022, p.5)

- “Hidrogênio preto” ou “hidrogênio marrom”: hidrogênio produzido a partir da gaseificação de carvão.
- “Hidrogênio cinza”: sendo o tipo que representa a maior parte da produção de hidrogênio atualmente, se refere à produção do elemento H₂ por meio de fontes fósseis, como gás natural, ou por eletrólise com fontes não renováveis, assim emitindo dióxido de carbono para a atmosfera sem haver um sistema de captura e armazenamento de carbono.
- “Hidrogênio azul” ou “hidrogênio turquesa”: considerado uma etapa transitória para o hidrogênio verde, essa categoria é referente à produção de hidrogênio com o uso de fontes fósseis, mas que há um sistema de captura, utilização e armazenamento (CCUS) do dióxido de carbono emitido durante o processo.
- “Hidrogênio amarelo” ou “hidrogênio rosa”: refere-se ao hidrogênio obtido de usinas nucleares, que pode ser categorizado como amarelo, se a produção advir de ciclos termoquímicos, ou rosa, se produzido por decomposição eletrolítica a partir da eletricidade das usinas nucleares.
- “Hidrogênio verde”: é referente ao hidrogênio adquirido pelo processo de eletrólise da água a partir de fontes de energia renováveis, incluindo a biomassa, sem emissões de dióxido de carbono (ECE, 2022).

Apesar dessa classificação de cores para o hidrogênio, comum no meio internacional, as categorias e suas definições consideradas pelos países podem variar. Não somente em planos políticos e acordos privados, mas também nas literaturas produzidas sobre o tema, encontram-se distintas terminologias. Para fazer referência ao hidrogênio verde, são utilizados

variados termos, como “hidrogênio de baixa emissão”, “hidrogênio limpo”, “hidrogênio renovável”, e outros, o que dificulta a distinção entre os processos de produção do hidrogênio e sua relação com os níveis de emissão (Ajanovic, 2022; Chiappini, 2023).

A Agência Internacional de Energia contesta o uso da categorização por cores e outros termos imprecisos para indicar os níveis de emissões, pois os mesmos não têm sido adotados durante os processos de investimentos para a produção do elemento (Brasil, 2023). Diante disso, a AIE, a fim de não gerar confusões, sugere que sejam utilizados critérios fundamentados na intensidade das emissões ao longo do ciclo de vida da produção do hidrogênio (Chiappini, 2023).

No caso do Brasil, considerando a recomendação da AIE, o Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) faz uso do termo “hidrogênio de baixa emissão”, definido como “o hidrogênio produzido com base em uma variedade de processos, tecnologias e fontes de energia com baixa emissão de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, ou com adoção de tecnologias de remoção de carbono (CCS)” (Brasil, 2023, p. 19). Tal conceito engloba como fontes de energias utilizadas na produção, não só as energias renováveis solar e eólica, mas também a biomassa, biocombustíveis, combustíveis fósseis com CCUS, energia nuclear e outras fontes de baixa emissão (Brasil, 2023).

3.1.2 Armazenamento e transporte

O armazenamento e transporte do hidrogênio requer um forte investimento em infraestruturas e tecnologias, o que encarece o processo e, conseqüentemente, o produto. O hidrogênio em estado gasoso demanda um sistema de alta pressão devido a sua baixa densidade, sendo postos em tanques cilíndricos pressurizados após o método de compressão. Já em estado líquido, se faz necessário um sistema com baixíssimas temperaturas, sendo armazenado, então, em reservatórios criogênicos, bom para o armazenamento do hidrogênio em grandes quantidades (Barbosa, 2020). No entanto, a retenção desse gás em estado gasoso e líquido apresenta custos operacionais elevados e apresenta riscos de vazamento (Puga; Asencios, 2023).

Para o armazenamento em estado sólido, o hidrogênio pode ser absorvido em estrutura metálicas pelo uso químico de hidretos metálicos, sendo esta forma considerada a mais eficiente em termos econômicos, de segurança e manejo, já que não precisa de baixíssimas temperaturas e altas pressões (Barbosa, 2020; Puga; Asencios, 2023; UFRJ, 2018). O hidrogênio também pode ser convertido em amônia, considerando sua composição química de

3 átomos de hidrogênio e 1 átomo de nitrogênio, e depois reconvertido em hidrogênio (AHK, 2020).

Para transportá-lo, a depender da quantidade de hidrogênio e distância, pode-se utilizar dutovias, navios ou caminhões especializados. Contudo, o transporte de hidrogênio apresenta dificuldades econômicas e ambientais, como os altos custos e as emissões de carbonos provenientes dos veículos. Além disso, existem riscos de corrosão do material e vazamento no processo de armazenamento e transporte, apresentando perigo, como de explosões e asfixia, às pessoas envolvidas no processo e ao local de operação como um todo (Puga; Asencios, 2023).

O hidrogênio, além de ser inodoro e incolor, o que dificulta sua identificação, é inflamável e considerado um dos mais suscetíveis a explosões quando comparado a outros combustíveis. É válido ressaltar, no entanto, que existem estudos e experimentos para tornar o processo mais seguro, com tecnologias de contenção, em caso de acidentes, e de prevenção para diminuir os riscos (Puga; Asencios, 2023).

Nesse sentido, observa-se que é preciso um alto desenvolvimento tecnológico e aproveitamento de infraestruturas existentes para tornar o processo de armazenamento e transporte mais acessível, seguro e sustentável. Deve ser ponderado nos planejamentos de investimento e implementação dessa tecnologia estratégias que melhor correspondem à quantidade de hidrogênio produzidos, a distância de transporte, e os impactos ambientais e sociais desse processo nos locais de produção, transporte e consumo.

3.2 Hidrogênio e Brasil

Conforme discutido anteriormente, a nomenclatura do hidrogênio como uma tecnologia sustentável varia de acordo com os critérios políticos adotados. A categorização por cor é muito comum no meio internacional e na literatura, no entanto não é a única. No caso do Brasil, seguindo as recomendações da Agência Internacional de Energia, sua política usa a nomenclatura “hidrogênio de baixa emissão de carbono” ou simplesmente “hidrogênio de baixa emissão”, abarcando diversas rotas tecnológicas para produção do hidrogênio, como a biomassa e até os combustíveis fósseis com uso de CCUS. Diante disso, a partir da presente seção, será usado o termo adotado pelo Brasil, uma vez que será trabalhada sua política de hidrogênio.

A inserção do hidrogênio de baixa emissão de carbono no contexto energético brasileiro tem ganhado destaque como alternativa viável para a descarbonização de diversos

setores. Esta seção explora os projetos de produção sustentável do hidrogênio, as perspectivas de uso dessa tecnologia, assim como a atual produção do hidrogênio no Brasil por fontes fósseis. Além disso, no 3.2.2, serão apresentadas as iniciativas nacionais voltadas para o desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão de carbono, os setores econômicos que podem se beneficiar de sua adoção e as políticas que visam impulsionar sua produção.

A análise permitirá entender o que é promovido na política do hidrogênio de baixa emissão de carbono pelo país e dar apoio, posteriormente, para compreender a sua ligação com a agenda climática de forma mais aprofundada.

3.2.1 O Desenvolvimento do Hidrogênio no Brasil

Caracterizado por um clima predominantemente quente e uma alta diversidade geográfica, o território brasileiro é favorável para a produção de energias renováveis, como as advindas de fontes hidráulica, solar e eólica, e demais projetos energéticos que utilizam desses fatores naturais. Diante disso, considerando um grande potencial de geração de eletricidade por fontes renováveis, diversos projetos de hidrogênio verde (H2V), ou seja, de produção do hidrogênio pelo uso da eletricidade renovável, foram anunciados no país desde 2021 (EPE, sd.).

Existem mais de 60 projetos no Brasil, os quais se encontram em escala experimental ou de P&D, totalizando mais de 70 bilhões de dólares de investimentos anunciados no país, entre 2021 e julho de 2024, com 43 GW de capacidade de eletrólise anunciada (Panik, 2024). Os dados evidenciam o interesse do Brasil no hidrogênio por eletricidade renovável como uma das rotas tecnológicas para a adoção do hidrogênio de baixa emissão de carbono, com crescentes investimentos externos e internos atraídos pelo seu forte setor de energias renováveis, em especial pela expansão das fontes eólica e solar.

Nesse cenário, algumas regiões brasileiras ganham destaque para o futuro da produção do hidrogênio de baixa emissão no país. A região nordeste tem assumido um protagonismo como polo de produção do hidrogênio devido a sua alta produção de energia eólica e solar em comparação às demais regiões e por ter portos bem posicionados geograficamente para a relação comercial com a Europa, onde se localiza os principais mercados dessa tecnologia sustentável (Oliveira, 2022). Segundo a ABEEólica (2023), entre todas as regiões do Brasil, o Nordeste representou, em 2023, 92% da geração total do sistema de fonte eólica, enquanto que o Sul e o Norte representaram 6,1% e 1,9% respectivamente. Com relação à energia solar, o número de instalações locais na região Nordeste aumentou em 95% em 2022 (Impacta

Nordeste, 2023).

Grandes investimentos e projetos têm sido alocados nos estados do Rio Grande do Norte, Bahia, Piauí, Pernambuco e Ceará, sendo este último o estado que concentra o maior número de projetos de hidrogênio verde anunciados no Brasil. Considerando as condições geográficas favoráveis, tanto no sentido de produção de renováveis quanto ao potencial de exportação, muitos projetos estão destinados aos portos do Pecém, no Ceará, Suape, em Pernambuco, e Açu, no Rio de Janeiro (Oliveira, 2022).

No Ceará, no Complexo do Pecém, teve-se a criação do primeiro HUB de hidrogênio verde do Brasil em 2021 pelo governo do estado. O Porto do Pecém foi o escolhido como o destino para importantes projetos da tecnologia com o objetivo de produzir, armazenar, distribuir e exportar a substância. Nesse contexto, o governo do Ceará já assinou mais de 20 memorandos de entendimento com empresas, como a White Martins e a Forstescue (Cruz, 2024). A instalação desses projetos no Porto visa exportar o H₂V para o mundo, mas também distribuir nas cadeias de valor, considerando as indústrias próximas à região que podem utilizar o hidrogênio (BW, 2021). Como descrito no Plano de Engajamento das Partes Interessadas (PEPI), o HUB de Hidrogênio Verde tem por objetivo “construir infraestrutura compartilhada no complexo do Pecém para viabilizar a produção do H₂V, promovendo o crescimento econômico e reduzindo as emissões de GEE” (Complexo do Pecém, 2024, p. 6).

No Porto de Suape, existem projetos apresentados pela empresa Qair para a produção de hidrogênio de baixa emissão. É previsto pela empresa a produção do hidrogênio verde pela eletrólise da água, a partir da eletricidade de fontes renováveis, obtida por uma usina de dessalinização da água do mar (Alcântara, 2023). Em 2024, o governo de Pernambuco e a empresa Arhyze assinaram um memorando de entendimento para produzir o hidrogênio verde, o e-metanol e a amônia verde, a partir de um investimento de cerca de 3 bilhões de reais por parte da empresa no Porto de Suape, com uma previsão de início da primeira fase em 2028 (Porto do Suape, 2024).

O Porto do Açu pretende avançar para a produção do hidrogênio verde. Almeja-se utilizar o hidrogênio produzido neste porto na produção de amoníaco, sendo este um elemento importante para o setor de fertilizantes. Estima-se, inclusive, uma produção de 250.000 toneladas de amoníaco por ano (Alcântara, 2023). Mais de dois milhões de áreas deverão ser destinados a projetos de hidrogênio verde para a produção de e-matanol e combustível sustentável de aviação. Além disso, os projetos objetivam a contribuição para produção de aço verde e, entre outros, produtos químicos (Chiappini, 2024; Codin, 2021).

É esperado que, com a boa distribuição de usinas geradoras de energia renovável no

território brasileiro e com uma perspectiva de crescimento das fontes eólica e solar, o hidrogênio por essa rota será capaz de atender a uma demanda futura do mercado nacional, especialmente em centros econômicos e parques industriais a partir de uma produção do hidrogênio de forma semi-centralizada. A produção do hidrogênio verde também representa uma oportunidade econômica, tendo em vista as boas condições geográficas do país, com projetos pelo Nordeste, para a exportação da substância para países europeus (GIZ, 2021).

Para além da geração de hidrogênio por fontes eólicas e solar, com a variedade de recursos energéticos no país, a biomassa se apresenta como uma alternativa para produzir o hidrogênio de baixa emissão e que é considerada pelo Brasil. A partir da biomassa é possível produzir biogás e biometano e estes podem ser usados, por meio do processo de reforma a vapor, para gerar o hidrogênio, categorizado como hidrogênio azul pelo sistema de cores, mas que entra como uma das rotas tecnológicas do hidrogênio de baixa emissão pelo Brasil. Tal processo pode ser mais caro do que pelo uso de eletricidade eólica e solar, inclusive pelo acesso limitado à biomassa. No caso do Brasil, entretanto, tem-se uma alta produção de resíduos agropecuários devido ao forte setor do agronegócio. Nesse sentido, o uso da biomassa na geração de hidrogênio no país é considerado complementar ao potencial de produção do hidrogênio a partir das renováveis (Oliveira, 2022; Chiappini, 2023).

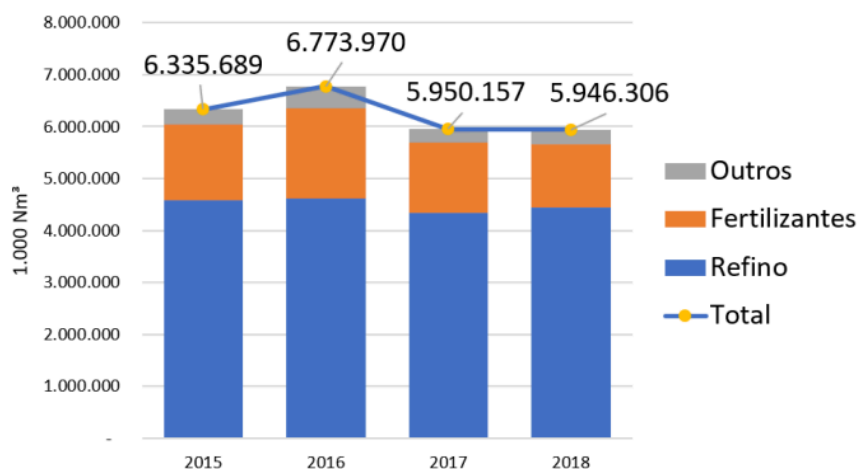
Contudo, a rota de produção do hidrogênio a partir da biomassa traz questões com relação ao nível de sustentabilidade dessa alternativa, uma vez que o Uso da Terra e Agricultura é justamente o setor que mais emite CO₂ no Brasil e, assim, a biomassa poderia estar associada ao desmatamento, reduzindo o nível de sustentabilidade do hidrogênio. A situação aumenta a pressão para o país alcançar a meta de zerar o desmatamento ilegal até 2030. O uso de CCUS, o sistema *blockchain*, isto é, rastrear as emissões de toda a cadeia de produção até o uso final, e a adoção de certificação são vistos como algumas alternativas para garantir a sustentabilidade do hidrogênio a partir da biomassa (Chiappini, 2023)

Como outra rota, existem pesquisas e projetos em desenvolvimento no Brasil para a produção de hidrogênio a partir do etanol, uma vez que este produto possui uma fórmula “hidrogenada” (C₂H₆O), a fim de substituir os combustíveis fósseis no setor automotivo pelo uso do hidrogênio de baixa emissão. O setor de etanol, consolidado no país, favorece a produção de hidrogênio com o uso de células a combustíveis (*fuel cell*) para a eletrificação da frota (Oliveira, 2022; Cruz, 2023).

Em 2015, o Brasil foi o primeiro país da América Latina a ter três ônibus híbridos movidos a pilha a combustível, bem como uma estação de produção, armazenamento e abastecimento de hidrogênio, no sistema de transporte coletivo urbano, a partir de uma

iniciativa entre membros nacionais e internacionais. O projeto não teve continuidade, pois o contrato de financiamento chegou ao fim (GIZ, 2021). Em 2022, a Raízen, Shell Brasil, Hytron, USP e Senai CETIQT firmaram um acordo para desenvolver plantas de hidrogênio renovável utilizando etanol para produzir 5kg/h de hidrogênio e, posteriormente, 44,5kg/h com uma planta 10 vezes maior. O projeto também prevê a instalação de uma estação de abastecimento no campus da USP, em São Paulo, para que um dos ônibus da Cidade Universitária deixe de usar diesel e passe a usar hidrogênio gerado pelo etanol e motores com células a combustível (Raízen, 2022).

Contudo, a atual produção de hidrogênio no país, alocada principalmente em zonas litorâneas próximas à malha de gasodutos do país, se dá pela reforma de gás natural, com alto teor de carbono, se configurando como hidrogênio cinza. Sua produção é voltada principalmente para empresas de fertilizantes e refinarias no Brasil (Figura, GIZ, 2023). Nessas áreas, a Petrobras ganha destaque no país como maior produtora, sendo responsável por cerca de 95% da produção de hidrogênio, e consumidora, utilizando em unidades de refino para a produção do óleo diesel e de outros combustíveis. Os outros 5% de produção do hidrogênio são realizados em maioria por empresas de gases industriais, com destaque para a Linde, representada pela White Martins no país, a Air Liquide e a Air Products, para o fornecimento do elemento como insumo para o setor de indústria (Oliveira, 2022). Foi avaliado que o Brasil tem o potencial de produzir 1,8 bilhões de toneladas de hidrogênio por ano, enquanto que a atual geração do hidrogênio no país, predominantemente voltada para o setor de refino, possui uma capacidade disponível de 200 mil toneladas, que poderia ser adaptada para a produção com uso de CCUS (MME, 2023).

Figura 7 - Produção anual de H2 no Brasil.

Fonte: captura de tela do documento GIZ, 2021.

No que diz respeito aos produtos e processos que utilizam o hidrogênio cinza no Brasil ganha-se destaque os setores petroquímico, para refino de combustíveis, siderúrgico e metalúrgico, de alimentos, para hidrogenação de produtos, de vidros planos, de geração de energia, para refrigeração de turbinas, além do setor de transporte, que abrange veículos leves, como carros, e pesados, como ônibus, aviões e navios. Onde será o uso final do hidrogênio de baixa emissão de carbono produzido no Brasil dependerá da rota tecnológica assumida. No caso da produção de hidrogênio a partir de energias renováveis, sobretudo solar e eólica, visa-se a exportação da substância ao mercado de outros países, especialmente o mercado europeu. Já pelo uso de biomassa e etanol, objetiva-se o uso interno, especialmente no transporte pesado, como caminhões, aviões e navios, setores estes de difícil descarbonização, e o transporte de veículos leves (Oliveira, 2022).

O Brasil visa realizar uma transição para o hidrogênio de baixa emissão, iniciando com a utilização de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) na produção de hidrogênio por fontes de combustíveis fósseis, para posteriormente, com a redução dos custos da produção de hidrogênio, fazer uso de energias renováveis, produzindo hidrogênio de forma mais sustentável (Oliveira, 2022).

3.2.2 As Políticas e Regulamentações para o Hidrogênio no Brasil

Em 1998, o MCTI implementou o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) como um dos primeiros passos na inserção brasileira na temática de

Energia do Hidrogênio. Em 2002, o MCTI criou o Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCAC), que posteriormente, em 2005, veio a se chamar de Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio (ProH2). Este programa teve por objetivo fomentar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico por meio de incentivos e parcerias entre o setor privado e as instituições de pesquisa (MME, 2021).

Em 2003, para ampliar o debate e a pesquisas em hidrogênio e células à combustível, o Brasil passou a ser membro do *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy*. Em 2005, o Ministério de Minas e Energia publicou o Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil, estabelecendo várias metas para os 20 anos seguintes e destacando as rotas tecnológicas para a produção do hidrogênio e a utilização do gás no processo até o predomínio do hidrogênio verde. Cinco anos depois, o CGEE publicou o “Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025”, incentivando o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil e ressaltando a necessidade da participação de Ministérios, agências governamentais e instituições de pesquisa (MME, 2021).

Em 2012, o MCTI fez uma apresentação no Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC) que mostrou a desaceleração de pesquisa e investimento nesse setor após a descoberta do pré-sal em 2006, se distanciando dos incentivos do início dos anos 2000. Diante disso, em 2017, a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) foi criada e coordenada pelo MCTI, MME, MEC, ANEEL, ANP e Eletrobrás, a fim de organizar as ações e os incentivos no setor de hidrogênio. Em 2018, o hidrogênio e a sua importância para o setor de energia e combustíveis foram abordados no Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis (MME, 2021).

Já em 2020, o hidrogênio novamente foi destacado por sua alta capacidade e nível tecnológico de descarbonização da matriz energética no Plano Nacional de Energia 2050. No plano, foi desenvolvido a necessidade de políticas regulatórias para toda a cadeia do hidrogênio e o desenvolvimento de um roteiro de tecnologias. Diante disso, em 2021, a EPE lançou as Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio com uma análise completa sobre o hidrogênio, considerando mercado, rotas tecnológicas e o papel do mesmo na transição energética (MME, 2021).

Em 2021, o país co-liderou o Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia e apresentou um pacto energético sobre hidrogênio, entre os demais compromissos voluntários voltados para a realização do Objetivo de Desenvolvimento sustentável 7, o qual tinha como objetivo incentivar a produção e aplicação do hidrogênio no país a partir de “i)

políticas de pesquisa, desenvolvimento e inovação; ii) capacitação e treinamento; e iii) criação de uma plataforma para consolidação e disseminação de informações sobre hidrogênio no País” (MME, 2021).

No mesmo ano, foi publicado o estudo Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro – Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde pelo Ministério de Minas e Energia, produzido no âmbito da parceria energética Brasil-Alemanha, o qual ofereceu um visão geral da indústria e das principais instituições e profissionais acadêmicos que atuam no Brasil em hidrogênio, assim como uma análise das tecnologias-chave de aplicação de hidrogênio e Power-toX (MME, 2021).

Em um contexto de diversos seminários e workshops sobre o hidrogênio no Brasil, o CNPE publicou a resolução CNPE nº2/2021, relativo aos recursos e desenvolvimento do hidrogênio, e a resolução CNPE nº 6, sobre a aprovação para a formulação das diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), com efeitos favoráveis para o desenvolvimento do hidrogênio no país a partir de três pilares importantes distribuídos em políticas públicas, tecnologia e mercado (MME, 2021). Sua estrutura de governança é composta pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Comitê Gestor do PNH2 (Coges-PNH2) e por cinco câmaras temáticas (MME, 2023). O programa estabeleceu como objetivos:

I - O interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do País em bases economicamente competitivas;

II - A inclusão do hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação, conforme Resolução CNPE nº 2, de 10 de fevereiro de 2021, aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética;

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

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

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

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

VII - A diversidade de aplicações do hidrogênio na economia;

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

IX - A liderança do Brasil no tema "Transição Energética" no Diálogo de Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia (MME, 2021, p. 13).

Entre os princípios definidos no Programa Nacional de Hidrogênio, tem-se a busca por alinhar o desenvolvimento do hidrogênio à descarbonização da economia, de modo a corresponder a ambição de atingir neutralidade de carbono líquida até 2050. Além disso, o programa é estruturado em seis eixos, sendo eles: fortalecimento das bases tecnológicas; capacitação e recursos humanos; planejamento energético; arcabouço legal-regulatório; crescimento do mercado e competitividade; e cooperação internacional. Especialmente no eixo 3 de planejamento energético, é considerado os impactos socioambientais da expansão do hidrogênio e o alinhamento de sua cadeia às outras políticas, planos e programas, principalmente relacionados às mudanças climáticas, como a Política Nacional de Mudanças Climáticas (MME, 2021).

Em 2023, foi publicado o Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) pelo Ministério de Minas e Energia, definindo algumas ações para o desenvolvimento da economia do hidrogênio de baixa emissão no Brasil. O comitê gestor do PNH2 estabeleceu 3 prioridades: definir o marco legal-regulatório nacional; intensificar investimentos em PD&I, com foco na redução de custos; e ampliar acesso a financiamento. Diante disso, o plano trienal propôs ações distribuídas para cada câmara temática, indicando, para cada ação, os atores envolvidos, o prazo e o indicador de resultado. Em planejamento energético, por exemplo, uma das ações propostas foi a de “avaliar impactos socioambientais e sobre recursos hídricos decorrentes da produção, transporte, armazenamento, conversão e uso de hidrogênio e seus derivados” com a realização de estudos durante cada ano do ciclo (MME, 2023).

Desde 2022, o governo brasileiro tem promovido a regulamentação do setor de hidrogênio para incentivar em aspectos fiscais e financeiros as empresas e os novos projetos de desenvolvimento da tecnologia, uma vez que esses instrumentos tornam o setor mais atrativo para investimentos e pesquisas.

Em 2022 foi publicado o Decreto nº 11.075 para estabelecer o mercado regulado de carbono no Brasil, visando exportar créditos de carbono, principalmente para países e empresas que necessitam compensar suas emissões para alcançarem suas metas e compromissos de neutralidade de carbono (Lima, 2023). Além disso, no mesmo ano, foi criado o Projeto de Lei nº 725, o qual propõe inserir o hidrogênio na matriz energética brasileira e estabelece critérios para incentivar o uso do hidrogênio sustentável. Algumas de suas metas é de adicionar um percentual de hidrogênio nos gasodutos nacionais de 5% e 10% até 2032 e 2050 respectivamente, sendo que 60% do hidrogênio deve ser hidrogênio de baixa emissão (Senado Federal, 2023). Também foi apresentado o projeto de lei nº 1878/2022, que

visa regular a produção e uso do hidrogênio verde para usos energéticos, e que aborda sobre as responsabilidades institucionais relacionadas a essas fontes, no contexto da Política Energética Nacional, com o propósito de fomentar o crescimento desse vetor energético (Lima, 2023).

A Lei Ordinária 14948/2024 (Projeto de Lei 2308/23), sancionada em 2024, institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, estabelecendo incentivos fiscais e financeiros para a produção do hidrogênio e inserção desta tecnologia na Política Energética Nacional. Para ser considerado hidrogênio de baixa emissão, a lei define que o combustível ou produto deve ter uma emissão de GEE menor ou igual a $7\text{kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ conforme o ciclo de vida (Observatório do Clima, 2024). Na lei é definida a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono que tem como um dos princípios a descarbonização da matriz energética do país. Objetiva-se promover a transição energética e o desenvolvimento sustentável com a expansão do hidrogênio e o uso do mesmo nos produtos do mercado interno e externo, e assim mitigar as emissões de gases poluentes (Câmara dos Deputados, 2024).

Como um dos principais instrumentos, a lei 14948/2024 estabelece o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão (Rehidro) para fomentar o desenvolvimento tecnológico e industrial do hidrogênio de baixa emissão. Nesse quadro, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável por regular, autorizar e fiscalizar a produção do elemento, desempenhando importante papel nas normas relacionadas aos processos do hidrogênio de baixa emissão (Câmara dos Deputados, 2024).

Logo após a criação do Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão, foi aprovado o projeto de lei que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) que visa adotar incentivos para o uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono nos setores industriais de difícil descarbonização, como os de fertilizantes, siderúrgico, químico, cimento e petroquímico, além de promover o uso no transporte pesado. O programa prevê concessão de incentivos fiscais na comercialização do hidrogênio de baixa emissão, em que os créditos são limitados a determinados valores globais para cada ano-calendário, com uma previsão de 1,7 bilhão em 2028 até chegar em 5 bilhões em 2032 (Governo Federal, 2024).

3.3 Política de Hidrogênio Brasileira e Mudanças Climáticas

A relação entre a política de hidrogênio brasileira e as mudanças climáticas tem se fortalecido diante da necessidade de reduzir emissões e promover uma matriz energética mais sustentável. Esta seção examina como o hidrogênio de baixa emissão de carbono é incorporado nas diretrizes e estratégias governamentais, destacando sua relevância para os compromissos climáticos nacionais e internacionais.

Neste tópico será abordada a interseção entre agenda climática e as estratégias para o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil. Serão analisados os principais pontos das políticas e programas que estruturam essa relação. Em seguida, será feita uma reflexão sobre as discussões apresentadas ao longo do estudo, avaliando a política de hidrogênio do Brasil à luz dos compromissos climáticos. A partir de um entendimento mais amplo de planejamento energético e política climática, busca-se consolidar a compreensão da política de hidrogênio brasileira no contexto das mudanças climáticas.

3.3.1 Hidrogênio e Política Climática

O Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do Programa Nacional de Hidrogênio associa a necessidade de descarbonização profunda da economia para atingir as metas do Acordo de Paris à expectativa de expansão do hidrogênio no mundo. Isto é, a projeção de crescimento do hidrogênio surge em detrimento da urgência em reduzir as emissões de carbono. O plano ressalta que para chegar à meta de neutralidade líquida de carbono até 2050 se faz necessário a diversificação da matriz energética a partir de instrumentos e tecnologias inovadoras. Neste cenário, o texto aponta o hidrogênio de baixa emissão de carbono como uma solução potencial para o Brasil, tanto para a exportação, quanto para as rotas e as possíveis aplicações internas (MME, 2023).

No contexto interno, o plano aponta para a aplicação do hidrogênio de baixa emissão em refinarias e no setor de indústria química, como na produção de amônia. Também se considera o hidrogênio de baixa emissão como uma oportunidade para diminuir a intensidade de emissão de carbono proveniente da produção de fertilizantes, que atualmente é altamente dependente dos combustíveis fósseis como matéria-prima para a sua produção. Além disso, também aponta para essa tecnologia na produção de combustíveis, como metanol e hidrocarbonetos líquidos como uma alternativa para o setor de aviação e de navegação, provendo sua descarbonização no contexto de transição energética (MME, 2023).

Como mencionado anteriormente, o setor de indústria, por exemplo, foi responsável por mais de 67 Mt de emissões de carbono em 2023, devido ao uso expressivo dos combustíveis fósseis como fonte de energia (SEEG, 2024). Diante disso, o plano trienal enfatiza a possibilidade de substituição do hidrogênio produzido com o uso de combustíveis fósseis para o hidrogênio de baixa emissão no setor industrial como uma vertente positiva para reduzir as emissões de GEE (MME, 2023).

Para além dessa perspectiva de trazer novas rotas de produção e de uso do hidrogênio para o país, o plano destaca uma visão estratégica do país de adaptação da atual produção e utilização do hidrogênio, em maioria por combustíveis fósseis, para fazer uso da tecnologia de captura, uso e armazenamento de carbono (CCUS) na operação. Assim, as atuais instituições que produzem hidrogênio por combustíveis fósseis poderiam fazer uma transição para uma produção mais sustentável (MME, 2023).

É exposto no plano trienal que o PNH2 é centrado no fomento ao desenvolvimento das rotas tecnológicas de produção do hidrogênio de baixa emissão de carbono, considerando as metas e compromissos de combate às mudanças climáticas estabelecidos pelo país e novas tendências internacionais. Diante disso, o programa propõe uma meta de percentual mínimo da redução das emissões em relação ao hidrogênio igual ou acima de 50%, passando para 60% e, posteriormente, para 70%, em que deve abranger a própria planta e a eletricidade e combustíveis adquiridos pela planta. Com o percentual mínimo inicial de 50%, o plano adota uma estratégia gradual das metas de redução da emissão do setor para não gerar custos excessivos, o que poderia complicar a expansão e consolidação do mercado. Apesar disso, o plano incentiva que os projetos alcancem um percentual de redução das emissões acima de 70% (MME, 2023).

No que diz respeito aos atuais projetos de hubs de hidrogênio no país, o plano destaca o grande potencial de produção de hidrogênio de baixa emissão nos complexos portuários como uma estratégia voltada para a exportação em um médio prazo, posicionando o Brasil como um “destaque nas projeções internacionais” ao oferecer os menores custos associados do mundo, principalmente devido ao potencial de geração de energia eólica onshore na Região Nordeste do país (MME, 2023, p. 14). Ainda assim, o PNH2 tem como uma das ambições consolidar hubs de hidrogênio de baixa emissão no Brasil até 2035 em uma expectativa de demanda interna. Para essa ambição, é recomendado no plano trienal que seja construído um programa voltado para o avanço de hubs (Programa Pró-Hubs Brasil) pelo Ministério de Minas e Energia, no contexto da Política Nacional de Transição Energética, com o objetivo de consolidar a relação entre produção de energia e as infraestruturas de apoio para

impulsionar os esforços nacionais para reduzir as emissões de carbono em setores de difícil descarbonização (MME, 2023).

Importante lembrar que o plano trienal propõe diversas ações para cada câmara temática do PNH2. Uma das câmaras temáticas do PNH2 é o Planejamento Energético que tem por objetivo “aprimorar a representação e a modelagem da cadeia energética do hidrogênio de baixa emissão de carbono no processo de planejamento energético oficial brasileiro”, a partir de estudos que considerem as questões socioeconômica, energética e ambiental em sua cadeia de oferta, logística conversão e consumo do hidrogênio e seus derivados (MME, 2023, p. 28). Especificamente em seu componente 4 sobre impactos ambientais, em uma das propostas de ação, é recomendado avaliar os impactos socioambientais, considerando os poluentes atmosféricos, e o “potencial de redução das emissões de CO₂eq nas diferentes aplicações do hidrogênio” (MME, 2023, p. 62)

Já na câmara temática de Neointustrialização, Mercado e Competitividade, entre seus objetivos específicos, tem-se a meta de rastrear a cadeia de valor do hidrogênio no Brasil para identificar as demandas pela aplicação do hidrogênio e de apoiar a elaboração da estratégia nacional de hidrogênio de baixa emissão como uma opção energética sustentável para aumentar a competitividade do país e “cumprir com os compromissos do Acordo de Paris” (MME, 2023, p. 31).

Entre as 65 propostas de ações do Plano de Trabalho Trienal, 32 encontram-se em execução (Observatório do Clima, 2024). Entre estas, as que se relacionam diretamente com uma das três prioridades do PNH se encontram em fase mais avançada de implementação (MME, 2023). No caso da prioridade de definir marco legal-regulatório nacional do hidrogênio de baixa emissão, vimos a entrada em vigor da Lei Ordinária 14948/2024. Em seus artigos IV, VII, XVI e XVII é mencionado o objetivo de incentivar a transição energética com o uso do hidrogênio de baixa emissão em variados setores da economia nacional para mitigar as emissões de GEE “e de poluentes nos consumos energético e industrial”, visando o cumprimento das metas do Acordo de Paris no âmbito da UNFCCC e demais acordos internacionais sobre a questão, inclusive com a promoção da cooperação nacional e internacional (Câmara do Deputados, 2024).

Quanto ao Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), um de seus princípios é o de alinhamento “às ambições de descarbonização da economia”, em que as rotas de hidrogênio promovidas e desenvolvidas contribuam “para alcançar a neutralidade de carbono líquido até 2050 (MME, 2021, p. 13). Entre seus 6 eixos, no eixo de Planejamento Energético, o programa fomenta a incorporação do hidrogênio nas pesquisas do planejamento energético do

país, levando em consideração a oferta e demanda, bem como os impactos ambientais. Também é definido que a política de hidrogênio de baixa emissão deve estar alinhada às demais políticas e planos, em especial os relacionados às mudanças climáticas, como a Política Nacional de Mudanças Climáticas e também a Política Energética Nacional (MEE, 2021).

Os compromissos climáticos estabelecidas no contexto do regime do clima aparecem no planos e políticas sobre hidrogênio do país de forma embutida nos objetivos de descarbonização da matriz energética nacional e internacional, pela inserção do hidrogênio de baixa emissão no planejamento energético, especialmente considerando o objetivo de neutralidade de carbono até 2050 e o Acordo de Paris. Por essa busca de alinhamento entre a política de hidrogênio e as questões climáticas, também é importante observar o papel do hidrogênio de baixa emissão nas políticas climáticas e energéticas do país.

Entre os planos setoriais no âmbito da estratégia de mitigação do Plano Clima do Brasil, especialmente no setor energético, é explicitado que o país irá priorizar “o desenvolvimento de mercados de hidrogênio de baixa emissão de carbono como uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis”, e aponta o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2) como um dos instrumentos importantes no setor energético para a mitigação de emissões (Brasil, 2024, p. 15). No setor de transportes da estratégia de mitigação é definido que “além da eletrificação e dos biocombustíveis, o hidrogênio deverá ser usado como alternativa no setor de transportes até 2035, exigindo investimento em infraestrutura específica” (Brasil, 2024, p.16). No Pacto pela Transformação Ecológica, como um dos planos base da Política Climática do Brasil, em seu eixo de transição energética, a regulamentação do hidrogênio de baixa emissão é uma das questões prioritárias (Brasil, 2024).

No Plano Nacional de Energia 2050, o hidrogênio de baixa emissão entra como uma tecnologia disruptiva a ser integrada no planejamento energético brasileiro. O PNE 2050 recomenda que os tomadores de decisões no setor de energia estimulem as oportunidades oferecidas pelo uso do hidrogênio para reduzir as emissões de CO₂ em diversos setores, como transportes, indústria química, residencial e geração de matérias-primas limpas para indústrias específicas, como o setor de siderurgia, além de outros. Portanto, o PNE 2050 aponta que o hidrogênio de baixa emissão pode contribuir para a descarbonização de setores que são difíceis de abater as emissões (MME, 2020).

O hidrogênio de baixa emissão aparece nos planos, políticas e leis como uma tecnologia de possível descarbonização da economia, se relacionando à meta climática como

uma ferramenta para reduzir as emissões de CO₂, contribuindo para a transição energética e, conseqüentemente, para alcançar a mitigação das mudanças climáticas e o objetivo de limitar a temperatura global previsto no Acordo de Paris.

3.3.2 Análise

Entre as diversas energias renováveis que se têm atualmente, o hidrogênio surge como uma tecnologia proeminente no cenário internacional para contribuir na redução da dependência nos combustíveis fósseis e, por conseguinte, das emissões de gases poluentes, desde que seja produzido a partir de fontes de energias renováveis ou de baixa emissão (Noussan et al., 2021). Com essa perspectiva, diversas políticas e planos de implementação dessa tecnologia têm sido desenvolvidos no mundo, considerando questões de infraestrutura, produção, transporte, uso e comercialização.

O Brasil é um dos países que têm apresentado interesse no hidrogênio como uma tecnologia energética sustentável. Conforme exposto, diversos projetos de hidrogênio estão sendo desenvolvidos no país, bem como planos, políticas e regulamentação. Nestes, as questões de descarbonização aparecem de forma significativa. Tais documentos indicam que o hidrogênio de baixa emissão pode ser uma tecnologia promissora para reduzir as emissões de carbono em diversos setores do país e contribuir com seus compromissos climáticos (MME, 2021; MME, 2023; Câmara dos Deputados, 2024).

Nesse sentido, evidencia-se uma pretensão de alinhar o hidrogênio de baixa emissão como uma tecnologia que contribuirá para as metas do Acordo de Paris. Este, como já mencionado, definiu uma meta de manter o aquecimento global a menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e a ambição de limitar a temperatura média em 1,5° com uma abordagem em que os países devem desenvolver seus planos climáticos e suas próprias metas, recaindo sobre cada país a responsabilidade de criar e aplicar uma estratégia para alcançar os objetivos de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e combater as mudanças climáticas (Kuyper; Schroeder; Linnér, 2018).

Nesse cenário, conforme a definição de política climática setorial por Nascimento et al. (2020) abordada neste trabalho, identifica-se uma política climática setorial na NDC brasileira (Brasil, 2024) preocupada em formular estudos e aplicar objetivos e ações em cada setor, o que pode trazer uma abrangência maior para todas as áreas da economia que são vetores de emissões. Especialmente quanto ao hidrogênio de baixa emissão, há um estímulo para a aplicação dessa tecnologia em setores como indústria e transporte considerando as

respectivas particularidades, o que condiz com essa política climática setorial. A partir dessa atenção própria para cada área, ações podem ser tomadas de forma específica, garantindo uma cobertura maior de mitigação.

Contudo, as metas e ações da política climática brasileira estão previstas em alguns planos base que ainda estão em elaboração ou em seus primeiros passos, como o Plano Clima, o Plano de Transformação Ecológica e a Política Nacional de Transição Energética. Com isso, a inserção e o posicionamento do hidrogênio de baixa emissão de carbono nesses planos climáticos, apesar de ser do interesse brasileiro, como disposto em sua NDC, ainda não foram apresentados ou ainda não contém informações detalhadas. No que diz respeito às próprias políticas e planos do hidrogênio de baixa emissão, como a Política Nacional de Hidrogênio (PNH2) e seu Plano de Trabalho Trienal, as ações a respeito do hidrogênio como uma tecnologia alinhada às metas climáticas são ainda superficiais e pouco detalhadas. Fala-se de um planejamento do hidrogênio para ser desenvolvido e aplicado em determinados setores para promover a descarbonização destes, mas ainda não há um detalhamento e um grau de complexidade sobre como isso será feito e em que nível isso poderá contribuir para as metas climáticas.

O hidrogênio de baixa emissão é colocado pela política brasileira como uma ferramenta tecnológica de descarbonização de setores difíceis de abater emissões, em uma perspectiva de expandir as tecnologias renováveis para melhor corresponder às necessidades de cada setor, ampliando o leque de soluções (MME, 2023). O cenário remete a um posicionamento tradicional brasileiro de diversificação da sua matriz energética, considerado como algo necessário para alcançar as metas de redução de emissões. Como apresentado anteriormente, o Brasil adotou, ao longo dos anos, um planejamento energético voltado para a inserção de múltiplas tecnologias energéticas e expansão das renováveis, como a hidrelétrica, a eólica, a solar e os biocombustíveis, em uma política energética que valoriza o mix de fontes, como alternativa aos combustíveis fósseis, dando maior destaque para o critério de sustentabilidade e integração da questão ambiental.

No contexto do regime do clima, constatou-se a importância da energia renovável, sendo a alternativa mais eficaz para substituir os combustíveis fósseis - os maiores responsáveis pelas emissões globais - e mitigar as mudanças climáticas (Owusu; Asumadu-Sarkodie, 2016). Isto porque, como definido por Alexandre-Tudó et al. (2019), a fonte de energia renovável é um recurso sustentável com baixo impacto ambiental e reduzida geração de resíduos, sendo algo essencial para alcançar os objetivos climáticos. Porém, é importante lembrar que o desenvolvimento de fontes renováveis ou fontes de energia

alternativas necessita de alguns fatores, como questões tecnológicas, econômicas, políticas, sociais e ambientais (Aleixandre-Tudó et al., 2019). Diante disso, a inserção de fontes alternativas de energia necessita de um robusto planejamento energético que considere todas essas variáveis.

No caso do hidrogênio como uma alternativa sustentável, existem múltiplas dificuldades e fatores que devem ser considerados. Como já mencionado, toda a logística da cadeia de desenvolvimento do hidrogênio, desde a sua produção, transporte e aplicação, requer uma infraestrutura altamente tecnológica e complexa, o que encarece o processo e o produto final, independente da rota de produção adotada. Além de apresentarem riscos para o meio ambiente e aos profissionais envolvidos, uma vez que se trata de uma tecnologia altamente inflamável. Diante disso, para o Brasil implementar o hidrogênio de baixa emissão, o país terá que elaborar uma estratégia complexa e específica para o contexto brasileiro, especialmente quando considerado o seu interesse de usá-lo como um instrumento de descarbonização (entrevistado 1).

Nesse sentido, apesar de o país ser abundante em fontes de energias renováveis, o que contribui para o potencial de produção do hidrogênio pelo Brasil, o país terá que avançar em termos de infraestrutura, recursos tecnológicos e financeiros para o desenvolvimento da cadeia do hidrogênio de baixa emissão. Diante disso, esse potencial brasileiro demanda captação de financiamentos. Parte desse financiamento têm sido adquirido pelas parcerias com empresas exteriores e outros países para impulsionar o avanço dessa tecnologia, de acordo com o que vimos em tópicos anteriores.

Como relatado, o governo brasileiro aproveita o posicionamento geograficamente favorável de seus complexos portuários, especialmente os localizados na região Nordeste, para tornar a exportação uma das frentes assumidas por sua estratégia política de promoção do hidrogênio de baixa emissão. Muitos dos projetos e investimentos anunciados nesses portos foram estabelecidos com empresas internacionais. Conforme discutido, o Porto do Pecém, no Ceará, que abarca a maior quantidade de projetos de hidrogênio de baixa emissão no país, utilizando fontes eólica e solar, tem o objetivo de exportar a substância (Oliveira, 2022).

Considerando que a exportação é uma das estratégias da política de hidrogênio do Brasil, que há um financiamento externo (promovidos pelas parcerias) e que os projetos de hidrogênio em desenvolvimento de maior destaque estão justamente nos complexos portuários - vistos estrategicamente para atender à demanda externa -, é possível depreender que, pelo menos em um primeiro momento, os projetos mais avançados de desenvolvimento do hidrogênio de baixa emissão estão centrados em uma perspectiva econômica e voltados ao

mercado externo, contribuindo para o posicionamento brasileiro no mercado internacional de hidrogênio e, conseqüentemente, para a transição energética dos outros países (entrevistado 1). Sendo assim, o interesse e as possibilidades de uso doméstico com o objetivo de contribuir para a descarbonização da matriz energética brasileira e, conseqüentemente, com o cumprimento das metas de combate às mudanças climáticas ainda podem estar em segundo plano.

Nesse contexto de mercado do hidrogênio, a nomenclatura e categorização apresenta-se como mais um fator que é considerado na política de hidrogênio brasileira. Apesar da recomendação da AIE, para muitos outros países o hidrogênio é categorizado pelo sistema de cores e, portanto, o hidrogênio verde é o que assume importância em seus projetos. Já para o Brasil, o hidrogênio sustentável deve ter como critério a intensidade de emissões em cada rota tecnológica, nomeado de hidrogênio de baixa emissão (MME, 2023). Esse desalinhamento internacional quanto à categoria do hidrogênio pode dificultar tornar o hidrogênio brasileiro mais competitivo no mercado internacional, uma vez que alguns países têm preferência pelo hidrogênio produzido apenas por eólica e solar, por exemplo, de acordo com a classificação por cores (entrevistado 1). Assim, parte da estratégia brasileira caracterizada por um viés econômico e de exportação pode se tornar menos eficiente e enfrentar desafios.

Conforme mencionado, o Brasil tem uma estratégia de evolução nos níveis de sustentabilidade das tecnologias utilizadas para desenvolver o hidrogênio, passando da produção por combustíveis fósseis combinados com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) até chegar ao uso prioritário de energias renováveis como fontes de eletricidade, especialmente as fontes eólica e solar. A partir dessa perspectiva e considerando que o país ainda produz hidrogênio por meio de fontes fósseis, a estratégia de fazer uso de CCUS se apresenta como a rota mais próxima de ser implementada na política de hidrogênio de baixa emissão do Brasil. Apesar de representar um primeiro passo, no atual contexto climático crítico que exige ações imediatas, essa estratégia pode prolongar o uso de fontes de energia fósseis e postergar o cumprimento das metas globais sobre o clima.

Apesar das dificuldades e dos pontos a serem questionados, o país deu início à sua política de hidrogênio e afirma ter o objetivo de usá-la como instrumento para sua transição energética. O relato de inserção das renováveis no Brasil, no contexto das crescentes preocupações climáticas internacionais, apresentado anteriormente, demonstra a trajetória lenta que as políticas e a implementação de fontes sustentáveis tiveram - e ainda tem - no país,

sobretudo no que diz respeito às energias eólica e solar, que demandam alta inovação tecnológica, subsídios, regulamentação e outros fatores de planejamento.

Atualmente, apesar de uma participação limitada, essas tecnologias contribuem para uma matriz energética “limpa”, reconhecida internacionalmente, e para o cumprimento dos objetivos climáticos brasileiros. O hidrogênio de baixa emissão no Brasil pode seguir um caminho semelhante (entrevistado 1). O país incentiva sua produção e tem a perspectiva de adotá-la como uma tecnologia de baixa emissão em seu planejamento energético, visando reduzir as emissões em determinados setores da economia, no processo de transição energética, e contribuir para as metas de mitigação das alterações climáticas. Contudo, observa-se um processo lento e longo para a ampliação dos fatores tecnológico, financeiro e político, bem como para o avanço dos planos e políticas voltadas ao hidrogênio - tanto aqueles específicos, quanto os inseridos na política energética e climática do país como um todo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou analisar a inserção do hidrogênio de baixa emissão de carbono no planejamento energético brasileiro, investigando como essa tecnologia se apresenta no contexto climático.

A pesquisa apresentou a inserção das energias renováveis no regime internacional do clima para contribuir com as metas de mitigação das alterações climáticas, uma vez que estes recursos são caracterizados por um baixo ou nenhum nível de emissão de gases de efeitos estufa e pouco impacto ambiental. Para a implementação das mesmas, se faz necessário o comprometimento e a atuação dos Estados, juntamente com outros atores internacionais, a partir de uma política climática ambiciosa e de um planejamento energético eficiente para atender aos objetivos climáticos do Acordo de Paris e de descarbonização da matriz energética. Nesse quadro, foi possível observar que o hidrogênio tem sido estimulado como um vetor de energia que, quando produzido de forma sustentável, pode ser usado em substituição aos combustíveis fósseis, contribuindo com o portfólio de tecnologias renováveis desenvolvidas em prol da transição energética mundial.

No contexto brasileiro, verificou-se que a matriz energética já apresenta uma alta participação de fontes renováveis, mas que ainda há lacunas para de fato se concretizar como “limpa”. A política brasileira aponta para o hidrogênio de baixa emissão como uma alternativa para contribuir com o processo de tornar a matriz energética do país mais sustentável e descarbonizar os setores da economia, especialmente os setores difíceis de abater emissões. Logo, evidencia-se um interesse brasileiro de desenvolver o hidrogênio de baixa emissão como uma de suas tecnologias energéticas que contribuam para alcançar os objetivos de sua política climática.

No entanto, seu papel neste processo ainda não está muito bem detalhado em seu planejamento energético em termos de conformidade com a política climática nacional. Além disso, há desafios para a implementação doméstica do hidrogênio de baixa emissão de carbono, como infraestrutura, custos e incentivos governamentais. Sendo assim, sua ampla adoção como um instrumento de combate às mudanças climáticas, sendo uma tecnologia recente, ainda depende de avanços políticos, tecnológicos e regulatórios que tornem essa alternativa competitiva frente a outras opções energéticas.

Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão do papel do hidrogênio de baixa emissão de carbono no planejamento energético e climático do Brasil, mas também aponta a necessidade de pesquisas futuras que aprofundem questões específicas, como

impactos socioeconômicos, desenvolvimento de novas tecnologias de produção e armazenamento, competitividade internacional e a efetividade dessa fonte energética no contexto nacional. A continuidade dessas investigações será essencial para que o Brasil possa consolidar suas posições no mercado global de hidrogênio e avançar em direção a um modelo energético mais sustentável e alinhado com seus compromissos climáticos.

REFERÊNCIAS

- ABDÏN, Zainul; ZAFARANLOO, Ali; RAFIEE, Ahmad; MÉRIDA, Walter; LIPÍNSKI, Wojciech; KHALILPOUR, Kaveh R. Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, p. 109620, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109620. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308275>>. Acesso em: outubro de 2024.
- ABRÃO, Rafael Almeida Ferreira. A geopolítica das energias renováveis: o Brasil em meio ao cenário de transição energética. Monções: *Revista de Relações Internacionais da UFGD*, Dourados, v. 11, n. 22, 2023. DOI: <https://doi.org/10.30612/rmufgd.v11i22.14541>. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/moncoes/article/view/14541>. Acesso em: fevereiro de 2025.
- ACORDO DE PARIS. *Acordo de Paris*. 2015. Gov.br. Disponível em: <https://svs.aids.gov.br/daent/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/ods/publicacoes/acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: dezembro de 2024.
- AHK. Um transporte mais limpo e acessível: A transformação de hidrogênio em amônia e vice-versa. AHK Rio de Janeiro, 26 nov. 2020. Disponível em: <https://brasilien.rio.ahk.de/pt/news/news-details/um-transporte-mais-limpo-e-acesivel-a-transformacao-de-hidrogenio-em-amonia-e-vice-versa>. Acesso em: novembro de 2024.
- AJANOVIC, A.; SAYER, M.; HAAS, R. The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>. Acesso em: novembro de 2024.
- ALCÂNTARA, Thiago Rodrigues. *Estratégias, desenvolvimento e perspectivas do hidrogênio verde no Brasil*. 2024. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78106>>. Acesso em: janeiro de 2025.
- ALEIXANDRE-TUDÓ, José Luis; CASTELLÓ-COGOLLOS, Lourdes; ALEIXANDRE, José Luis; ALEIXANDRE-BENAVENT, Rafael. Renewable energies: Worldwide trends in research, funding and international collaboration. *Renewable Energy*, v. 139, p. 268-278, ago. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2019.02.079. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119302332?via%3Dihub>>. Acesso em: dezembro de 2024.
- ARAÚJO, Daniel Féo Castro de. A dinâmica das energias renováveis na matriz energética brasileira no século XXI. *Revista Cerrados (Unimontes)*, Montes Claros, v. 21, n. 01, p. 399-429, 2023. DOI: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202316>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5769/576976196019/576976196019.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS (ABEEólica). (2023). *Boletim Anual 2023 – Onshore & Offshore*. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf. Acesso em: janeiro de 2025.
- AWERBUCH, Shimon. *Portfolio-based electricity generation planning: policy implications for renewables and energy security*. *Estratégias de mitigação e adaptação para mudanças globais*, v. 11, p. 693–710, 2006. DOI: 10.1007/s11027-006-4754-4. Disponível em: <

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-006-4754-4> >. Acesso em: novembro de 2024.

BANCO MUNDIAL. *Energia – Visão Geral*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview#:~:text=Between%20FY17%20and%20FY24%2C%20the_electricity%20to%2017%20million%2>. Acesso em: dezembro de 2024.

BARBOSA, Harley Alves. *Processos de produção e estocagem de hidrogênio: uma revisão da literatura*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/38768/1/ProcessosdeProducao_Barbosa_2020.pdf. Acesso em: novembro de 2024.

BASSO, Larissa De Santis. *Domestic determinants of international cooperation: an analysis of the intricate relationship between energy politics and climate change mitigation*. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Instituto de Relações Internacionais, Brasília, 2018. Disponível em: <http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/32689>. Acesso em: novembro de 2024.

BE THE STORY. Os dez países mais limpos: quem lidera nas energias renováveis. 4 nov. 2024. Disponível em: <https://www.be-the-story.com/pt/ambiente/os-paises-mais-limpos-quem-lidera-nas-energias-renovaveis/>. Acesso em: janeiro de 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Política Nacional de Transição Energética. [Brasília]: MEE, s.d. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/dte/cgate/pnte>. Acesso em: fevereiro de 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa de Aceleração da Transição Energética foi sancionado nesta quarta-feira. 22 jan. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/programa-de-aceleracao-da-transicao-energetica-foi-sancionado-nesta-quarta-feira>. Acesso em: fevereiro de 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Brasil entrega à ONU nova NDC alinhada ao Acordo de Paris. 13 nov. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris>. Acesso em: janeiro de 2025.

BRASIL. NDC do Brasil – Contribuição Nacionalmente Determinada ao Acordo de Paris. Brasília: Ministério das Relações Exteriores, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/copy_of_FinalNDCversaoemportugues.pdf. Acesso em: fevereiro de 2025.

BW - BIOSPHERE WORLD. HUB de Hidrogênio Verde - Ceará. 2021. Disponível em: <<https://movimentobw.org.br/palestra/sobre/hub-de-hidrogenio-verde-ceara>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. (2024). *Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024: Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, dispõe sobre a Política Nacional do*

Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, e institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono. Disponível em:

<<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-veto-17254-0-pl.html>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

CASARIN, Ricardo. Brasil é terceiro colocado no ranking mundial de geração renovável. Portal Solar, 27 mar. 2023. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/brasil-e-terceiro-colocado-no-ranking-mundial-de-geracao-renovavel>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CETREL. Como o sucesso do Hidrogênio Verde depende do correto abastecimento de água limpa? 2019. Disponível em:

<<https://www.cetrel.com.br/como-o-sucesso-do-hidrogenio-verde-depende-do-correto-abastecimento-de-agua-limpa/>>. Acesso em: outubro de 2024.

CHENG, Wenting; LEE, Sora. How Green Are the National Hydrogen Strategies? *Sustainability*, v. 14, n. 3, p. 1930, 8 fev. 2022. Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1930>>. Acesso em: novembro de 2024.

CHIAPPINI, G.. *Açu reserva mais dois milhões de metros quadrados para projetos de hidrogênio verde.* Eixos. Publicado em 5 de dezembro de 2024. Disponível em:

<<https://eixos.com.br/hidrogenio/acu-reserva-mais-dois-milhoes-de-metros-quadrados-para-projetos-de-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CHIAPPINI, G. *O lobby do Brasil pelo hidrogênio de biomassa.* Eixos. Publicado em 14 de agosto de 2023. Disponível em:

<<https://eixos.com.br/hidrogenio/o-lobby-do-brasil-pelo-hidrogenio-de-biomassa/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CODIN. (2021). *Construção de usina de hidrogênio verde no Porto do Açu, no Rio de Janeiro.* Publicado em 19 de março de 2021. Disponível em:

<<https://www.codin.rj.gov.br/post/constru%C3%A7%C3%A3o-de-usina-de-hidrog%C3%AAnio-verde-no-porto-do-a%C3%A7u-no-rio-de-janeiro>>. Acesso em: janeiro de 2025.

COMPLEXO DO PECÉM. (2024). *Plano de Engajamento das Partes Interessadas (PEPI) – HUB de Hidrogênio Verde – Pecém/Ceará.* Disponível em:

<<https://www.complexodopecem.com.br/wp-content/uploads/2024/09/Planejamento-de-Engajamento-das-Partes-Interessadas-PEPI.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CORMIO, C.; DICORATO, M.; MINOIA, A.; TROVATO, M. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 7, p. 99-130, 2003.

CRUZ, D Mac. (2023). *Hidrogênio a partir do etanol deve chegar ao mercado já em 2023.* Fenasucro & Agrocana. Disponível em:

<<https://www.fenasucro.com.br/pt-br/blog/bioenergia/hidrogenio-a-partir-do-etanol-deve-chegar-ao-mercado-ja-em-2023.html>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CRUZ, J. (2024). *Com grande potencial em energias renováveis, o Ceará está se tornando a Casa do Hidrogênio Verde.* Governo do Estado do Ceará, Casa Civil. Publicado em 1º de janeiro de 2024. Disponível em:

<<https://www.ceara.gov.br/2024/01/01/com-grande-potencial-em-energias-renovaveis-o-ceara-esta-se-tornando-a-casa-do-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

CUT. (2024). *Relatório técnico: Transição energética - Diagnóstico situacional do trabalho nas regiões Norte e Nordeste do Brasil*. Publicado em agosto de 2024. Disponível em: <https://transicaojusta.cut.org.br/wp-content/uploads/2024/12/20241218-Relatorio-tecnico_Transicao-energetica_Diagnostico-situacional-do-trabalho_Norte-e-Nordeste.pdf>. Acesso em: janeiro de 2025.

DUARTE, Jéssica. *Dimensões da justiça energética na governança global de energia: uma análise a partir do ODS 7*. 2024. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/283564>>. Acesso em: dezembro de 2024.

ECE. . Enabling a hydrogen ecosystem: A comprehensive and science-based terminology, classification and taxonomy for hydrogen. UN (United Nations) ECE/ENERGY/2022/8. Economic and Social Council Distr.: General, 13 jul. 2022. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE_ENERGY_2022_8e.pdf>. Acesso em: novembro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2012: ano base 2011. Brasília, 2012. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-131/topico-103/Relat%C3%B3rio%20Final%202012.pdf>>. Acesso em: dezembro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2024: relatório síntese – ano base 2023. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf>. Acesso em: dezembro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Hidrogênio cinza*. Nota Técnica. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>>. Acesso em: outubro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Hidrogênio no Brasil: potencial técnico de produção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil. [sl]: EPE, [sd]. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/arcgisportal/apps/storymaps/stories/68332aaa3fc64524a656583e1367daa3>>. Acesso em: janeiro de 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Matriz Energética e Elétrica. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: janeiro de 2025.

EOS. *Desmatamento e Gases de Efeito Estufa: Como Regular*. Última atualização em: 19 set. 2024. Disponível em: <<https://eos.com/pt/blog/desmatamento-e-efeito-estufa/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

FGV Energia. Matriz Energética Brasileira. *BP Statistical Review 2020*. FGV Energia, 2020. Disponível em: <<https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>>. Acesso em: dezembro de 2020.

FIGUEIREDO, Adelaide Maria; FIGUEIREDO, Fernanda Otília. Teoria da amostragem: apontamentos teóricos e exercícios. Complementos da estatística PDMA. 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/103088>>. Acesso em: outubro de 2024.

FÖLSTER, Stefan; NYSTRÖM, Johan. Climate policy to defeat the green paradox. *AMBIO*, v. 39, p. 223–235, 2010. DOI: 10.1007/s13280-010-0030-7. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-010-0030-7>>. Acesso em: novembro de 2024.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf>. Acesso em: outubro de 2024.

GIZ. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2021). *Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde*. Comissão bilateral de parcerias energéticas. Disponível em: <<https://energypartnership.com.br/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

Governo Federal. (2024). *Governo institui Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono*. Disponível em: <<https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/09/governo-institui-programa-de-desenvolvimento-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono>>. Acesso em: fevereiro, 2025.

GREENE, Lindsey A. United Nations Framework Convention on Climate Change. *Environmental Health Perspectives*, v. 108, n. 8, p. A356-A357, ago. 2000. DOI: 10.1289/ehp.108-a353. Disponível em: <<https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.108-a353>>. Acesso em: dezembro de 2024.

HASSAN, Qusay; ALGBURI, Sameer; SAMEEN, Aws Zuhair; SALMAN, Hayder M.; JASZCZUR, Marek. Hidrogênio verde: um caminho para um futuro energético sustentável. *Revista Internacional de Energia de Hidrogênio*, v. 50, parte B, p. 310-333, 2 jan. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923045056>>. Acesso em: novembro de 2024.

HEALE, R.; FORBES, D. Understanding triangulation in research. *Evidence-Based Nursing*, v. 16, n. 4, p. 98, 2013. DOI: 10.1136/eb-2013-101494.

HEUBAUM, Harald; Biermann, Frank. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency, *Energy Policy*, Volume 87, 2015, Pages 229-239, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.09.009>. Acesso em: dezembro de 2024.

HIREMATH, R. B.; SHIKHA, S.; RAVINDRANATH, N. H. Decentralized energy planning; modeling and application—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, p. 729-752, 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000894>>. Acesso em: novembro de 2024.

HUGHES, Llewelyn; URPELAINEN, Johannes. Interests, institutions, and climate policy: Explaining the choice of policy instruments for the energy sector. *Environmental Science & Policy*, v. 54, p. 52-63, 2015. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901115300174>>. Acesso em: novembro de 2024.

IMPACTA NORDESTE. (2023). *Energia solar: como a região Nordeste se tornou líder em sua produção*. Publicado em 23 de maio de 2023. Disponível em: <<https://impactanordeste.com.br/energia-solar-como-a-regiao-nordeste-se-tornou-lider-em-sua-producao/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Crescimento recorde em energias renováveis, mas o progresso precisa ser equitativo. *Press Releases*, Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos, 27 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Mar/Record-Growth-in-Renewables-but-Progress-Needs-to-be-Equitable-PT>>. Acesso em: novembro de 2024.

IRENA. Visão e missão. [sd]. Disponível em: <<https://www.irena.org/About/Vision-and-mission>>. Acesso em: dezembro de 2024.

JACCARD, Mark. Mobilizing producers toward environmental sustainability: the prospects for market-oriented regulations. In: TONER, G. (Ed.). *Building Canadian Capacity: Sustainable Production and the Knowledge Economy*. Vancouver: UBC Press, 2006.

JORNAL DA USP. "Série Energia": A Política Nacional de Transição Energética tem pontos positivos e negativos. 13 set. 2024. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-a-politica-nacional-de-transicao-energetica-tem-pontos-positivos-e-negativos/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

KARLSSON-VINKHUYZEN, S. I. The United Nations and global energy governance: past challenges, future choices. *Global Change, Peace & Security*, v. 22, n. 2, p. 175–195, jun. 2010.

KRIEGLER, Elmar; EDMONDS, Jae; HALLEGATTE, Stéphane; EBI, Kristie L.; KRAM, Tom; RIAHI, Keywan; WINKLER, Harald; VAN VUUREN, Detlef P. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions. *Climatic Change*, v. 122, p. 401–414, 2014. DOI: 10.1007/s10584-013-0971-5. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-013-0971-5>>. Acesso em: novembro de 2024.

KUYPER, Jonathan; SCHROEDER, Heike; LINNÉR, Björn-Ola. The evolution of the UNFCCC. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 43, p. 343-368, out. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030119>>. Acesso em: dezembro de 2024.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india/view>. Acesso em: outubro de 2024.

LCA CONSULTORES; MTEMPO CAPITAL. *Trajetórias tecnológicas mais eficientes para a descarbonização da mobilidade*. Abril 2024. Disponível em: <https://mbcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/04/2024_04_10_Relatorio_MBCBrasil_LCA_MTempo-3.pdf>. Acesso em: janeiro de 2025.

LEHTILÄ, A.; PIRILÄ, P. Reducing energy related emissions: Using an energy systems optimization model to support policy planning in Finland. *Energy Policy*, v. 24, n. 9, p. 805-819, 1996. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301421596000663>>.

LIMA, M. A.; MENDES, L. F. R.; MOTHÉ, G. A.; LINHARES, F. G.; CASTRO, M. P. P. de; SILVA, M. G. da; STHEL, M. S. Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. *Environmental Development*, v. 33, p. 100504, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100504>. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211464520300191?via%3Dihub>>.

Acesso em: fevereiro de 2025.

LIMA, Vivianne Ortega de . Hidrogênio verde como fonte de energia: visão geral sobre iniciativas regulatórias no Brasil . 2023. 80f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, Bagé, 2023.

Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/rii/9147>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

LLANO-PAZ, Fernando de; CALVO-SILVOSA, Anxo; IGLESIAS ANTELO, Susana; SOARES, Isabel. Energy planning and modern portfolio theory: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 77, p. 636-651, set. 2017. DOI: [10.1016/j.rser.2017.04.045](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.045).

Acesso em: novembro de 2024.

MACHADO, Nayara. Fundo garantidor para transição energética: Paten vai a sanção com estímulo à transição do carvão. 18 dez. 2024. Disponível em:

<<https://eixos.com.br/politica/paten-e-aprovado-e-vai-a-sancao-com-estimulo-a-transicao-do-carvao/>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

MATOS, Janara de Camargo; BITENCOURT, Guilherme Ferreira. Os investimentos em hidrogênio verde no mundo e o papel do Brasil nesta cadeia produtiva. *Revista Processando o Saber*, v. 16, n. 3, p. 75-91, 2023. Disponível em:

<<https://www.fatecpg.edu.br/revista/index.php/ps/article/view/298>>. Acesso em: outubro de 2024.

MECKLING, J. (2019). Governing renewables: Policy feedback in a global energy transition. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 37(2), 317-338.

<https://doi.org/10.1177/2399654418777765>. Acesso em: dezembro de 2024.

METZ, B.; DAVIDSON, O. R. *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). (2023). *Plano de Trabalho Trienal do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)*. Disponível em:

<<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpnh2.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). PNE 2050 - Plano Nacional de Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. 13 nov. 2020. Disponível em:

<<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA(MME). (2021). *Propostas e diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)*. Disponível em:

<<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf>>. Acesso em: fevereiro de 2025.

NAÇÕES UNIDAS. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Disponível

em:<<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1ve>>. Acesso em: dezembro de 2024.

NAÇÕES UNIDAS. *7 destaques das ações climáticas que antecederam a COP26*. 7 fora. 2021. Disponível em:

<<https://brasil.un.org/pt-br/150468-7-destaques-das-a%C3%A7%C3%B5es-clim%C3%A1ticas-que-antecederam-cop26>>. Acesso em: dezembro de 2024.

NASCIMENTO, L.; KURAMOCHI, T.; IACOBUTA, G.; DEN ELZEN, M.; FEKETE, H.; WEISHAUPT, M.; HÖHNE, N. Twenty years of climate policy: G20 coverage and gaps. *Climate Policy*, v. 22, n. 2, p. 158–174, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1993776>. Acesso em: novembro de 2024.

NOUSSAN, Michel; RAIMONDI, Pier Paolo; SCITA, Rossana; HAFNER, Manfred. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, v. 13, n. 1, p. 298, 2021. Disponível em:

<<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/298>>. Acesso em: novembro de 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. (2025). *Futuro da energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil*. Atualizado em 22 de janeiro de 2025. Disponível em:

<https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2025/01/OC_Futuro-da-Energia_DIGITAL_SIMPLES.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2025.

OLIVEIRA, Alexandra M.; BESWICK, Rebecca R.; YAN, Yushan. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 33, p. 100701, set. 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339821000332>>. Acesso em: novembro de 2024.

OLIVEIRA, R. C. de. (2022). *Panorama do hidrogênio no Brasil*. Texto para Discussão nº 2787. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Disponível em:

<<https://www.econstor.eu/handle/10419/269155>>. Acesso em: janeiro de 2025.

OWUSU, Phebe Asantewaa; ASUMADU-SARKODIE, Samuel; DUBEY, Shashi (Rev. Editor). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.l.], p. 1167990, 2016. DOI:

[10.1080/23311916.2016.1167990](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2016.1167990). Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2016.1167990#abstract>>. Acesso em: dezembro de 2024.

PANIK, M. S. (2024). *Setor do Hidrogênio Verde no Brasil e Desenvolvimento do Mercado*. Apresentação realizada em 04 de julho de 2024. Disponível em:

<<https://h2lac.org/wp-content/uploads/2024/07/Apresentacao-Women-in-Green-Hydrogen-03.07.24-Monica-Saraiva.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2025.

PANWAR, N. L.; KAUSHIK, S. C.; KOTHARI, Surendra. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 3, p. 1513-1524, abr. 2011. DOI: [10.1016/j.rser.2010.11.037](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110004065?via%3Dihub>>. Acesso em: dezembro de 2024.

PARLAMENTO EUROPEU. *Emissões de gases com efeito de estufa por país e setor (Infografia)*. Publicação: 7 mar. 2018. Última atualização: 2 dez. 2024. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20180301STO98928/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa-por-pais-e-setor-infografia>>. Acesso em: janeiro de 2025.

PINTO, Vânia Carvalho. Métodos de pesquisa em relações internacionais. São Paulo: *Contexto*, 2023.

PORTO DE SUAPE. (2024). *Complexo de Suape assina memorando de entendimento com empresa francesa para desenvolver projeto industrial de R\$ 2 bilhões*. Publicado em 18 de junho de 2024. Disponível em: <https://www.suape.pe.gov.br/pt/noticias/1855-complexo-de-suape-assina-memorando-de-entendimento-com-empresa-francesa-para-desenvolver-projeto-industrial-de-r-2-bilhoes>>. Acesso em: janeiro de 2025.

PRASAD, Ravita D.; BANSAL, RC; RATURI, Atul. Multi-faceted energy planning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 38, p. 686-699, fora. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.021>. Acesso em: novembro de 2024.

PUGA, Mariana dos Santos; ASENSIOS, Yvan Jesus Olortiga. Avanços e limitações da produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 10, n. 2, p. 74–93, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n2.p74-93>>. Acesso em: novembro de 2024.

LEAL-ARCAS, Rafael; MINAS, Stephen. The Micro Level: Insights from Specific Policy Areas: Mapping the International and European Governance of Renewable Energy, *Yearbook of European Law*, Volume 35, Issue 1, December 2016, Pages 621–666, <https://doi.org/10.1093/yel/yew022>. Acesso em: dezembro de 2024.

RAÍZEN (2022). *Shell, Raízen, Hytron, USP e SENAI formam parceria para conversão de etanol em hidrogênio renovável*. Publicado em 1º de setembro de 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/shell-raizen-hytron-usp-e-senai-formam-parceria-para-conversao-de-etanol-em-hidrogenio-renovavel>>. Acesso em: janeiro de 2025.

REN21. *Relatório de status global de energias renováveis 2013*. Paris: Secretariado REN21, 2013.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. *Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. [2015]. Disponível em: <http://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2025.

ROELFSEMA, M., VAN SOEST, H.L., HARMSSEN, M. et al. Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. *Nat Commun* 11, 2096 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15414-6>. Acesso em: novembro de 2024.

RODES, Ekaterina; AXSEN, Jonn; JACCARD, Mark. Exploring citizen support for different types of climate policy. *Ecological Economics*, v. 137, p. 56-69, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800916302348>>. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.02.027>>. Acesso em: novembro de 2024.

SANTOS JR., Antonio Carlos Fonseca. *Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em Itaipu*. 2004. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87403>>. Acesso em: outubro de 2024.

SCHRATTENHOLZER, L. Algumas questões em política e planejamento energético. *Relatório de pesquisa do IIASA (reimpressão)*. Luxemburgo: IIASA, 2005. (RP-05-001). Reimpresso da *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, 2004. Disponível em: <<https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/7835/>>. Acesso em: novembro de 2024.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2021, 10 anos SEEG*. 2024. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2025.

SEEG. Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, Observatório do Clima. *Emissões totais*. 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/>>. Acesso em: janeiro de 2025.

SENADO FEDERAL. (2023). *Projeto de Lei nº 725, de 2022: Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável*. Relator: Senador Cid Gomes. Disponível em: <[https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413#:~:text=Projeto%20de%20Lei%20n%C2%B0%20725%2C%20de%202022&text=Ementa%3A%20Disciplina%20a%20inser%C3%A7%C3%A3o%20do.ao%20uso%20do%20hidrog%C3%AAnio%20sustent%C3%A1vel](https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413#:~:text=Projeto%20de%20Lei%20n%C2%B0%20725%2C%20de%202022&text=Ementa%3A%20Disciplina%20a%20inser%C3%A7%C3%A3o%20do.ao%20uso%20do%20hidrog%C3%AAnio%20sustent%C3%A1vel.)>. Acesso em: fevereiro de 2023.

SQUADRITO, Gaetano; MAGGIO, Gaetano; NICITA, Agatino. The green hydrogen revolution. *Renewable Energy*, v. 216, p. 119041, nov. 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123009552>>. Acesso em: novembro de 2024.

THERY, Raphaële; ZARATE, Pascale. Energy planning: a multi-level and multicriteria decision making structure proposal. *Central European Journal of Operations Research*, v. 17, p. 265–274, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10100-009-0091-5>>.

THERRIE, Bárbara. *Quais setores econômicos mais impactam o aquecimento global?*. 12 ago. 2024. Ecoa UOL. Disponível em: <[https://www.uol.com.br/ecoa/faq/quais-sao-setores-economicos-que-mais-impactam-o-aquecimento-global.htm#:~:text=No%20mundo%2C%20o%20setor%20de,ingl%C3%AAs\)%20coo%2022%25%3B%20transportes](https://www.uol.com.br/ecoa/faq/quais-sao-setores-economicos-que-mais-impactam-o-aquecimento-global.htm#:~:text=No%20mundo%2C%20o%20setor%20de,ingl%C3%AAs)%20coo%2022%25%3B%20transportes)>. Acesso em: janeiro de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ). Estudo aponta a forma de armazenamento de hidrogênio mais eficiente. 2024. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/estudo-aponta-a-forma-de-armazenamento-de-hidrogenio>>

[-mais-eficiente/#:~:text=Como%20melhor%20forma%20de%20armazenamento,em%20baix%C3%ADssima%20temperatura%20para%20operar>](#). Acesso em: novembro de 2024.

UZONDU, Nwankwo Charles; LELE, Dominic Dummene. Impacto multifacetado da energia renovável na obtenção de metas climáticas globais: inovações tecnológicas, estruturas de políticas e colaborações internacionais. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, v. 6, n. 7, 23 jul. 2024. DOI: 10.51594/ijarss.v6i7.1338. Acesso em: dezembro de 2024.

VAN DE GRAAF, T.; COLGAN, J. Global energy governance: A review and research agenda. *Palgrave Communications*, v. 2, n. 1, p. 1-12, 2016. DOI: 10.1057/palcomms.2015.47. Acesso em: 22 abr. 2024.

VELAZQUEZ ABAD, Anthony; DODDS, Paul E. Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges. *Energy Policy*, v. 138, p. 111300, mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520300586>. Acesso em: novembro de 2024.

VERA, Ivan; LANGLOIS, Lucille. Indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável. *Energia*, v. 32, n. 6, pág. 875-882, junho de 2007. DOI: 10.1016/j.energy.2006.08.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206002337>. Acesso em: novembro de 2024.

VIOLA, Eduardo. *Global climate policy and Brazil: 2005-2010 [A política climática global e o Brasil: 2005-2010]*. Revista Tempo do Mundo: Artigos. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2010. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6352>. Acesso em: janeiro de 2025.

WERNER, Deborah; LAZARO, Lira Luz Benites. The policy dimension of energy transition: The Brazilian case in promoting renewable energies (2000–2022). *Energy Policy*, v. 175, p. 113480, abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113480>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421523000654>. Acesso em: fevereiro de 2025.

WRI BRASIL. Os países que mais emitiram gases de efeito estufa. 17 jun. 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: janeiro de 2025.

**APÊNDICE A - ROTEIRO DE PERGUNTAS DA ENTREVISTA
SEMIESTRUTURADA**

- 1) Como você observa que Brasil e hidrogênio de baixa emissão vem sendo apresentado em fóruns, reuniões de alto nível, parcerias, documentos, etc.?
- 2) Como o MRE apresenta o hidrogênio de baixa emissão e o que é promovido a respeito dessa tecnologia?
- 3) Há um maior fomento dessa tecnologia para o uso externo, isto é, para a exportação?
- 4) Você tem uma perspectiva de uso interno das novas rotas do hidrogênio de baixa emissão, considerando o que é promovido na política brasileira?
- 5) Qual a aproximação dessa política do hidrogênio de baixa emissão com a política climática do Brasil?
- 6) Há uma similaridade entre a trajetória de inserção de outras energias renováveis, como solar e eólica, e o hidrogênio?
- 7) Quais os possíveis desafios de desenvolvimento dessa tecnologia no país e para a integração da mesma ao planejamento energético nacional?
- 8) Qual o interesse do Brasil no fomento ao hidrogênio de baixa emissão na sua perspectiva?