

CENTRO UNIVERSITÁRIO ALVES FARIA - UNIALFA
MESTRADO EM DIREITO CONSTITUCIONAL ECONÔMICO

PAULO ROBERTO REZENDE BARROS

O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA ORDEM ECONÔMICA
CONSTITUCIONAL: UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE

ORIENTADOR: Túlio Augusto Tayano Afonso

GOIÂNIA-GO
2025

PAULO ROBERTO REZENDE BARROS

**O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA ORDEM ECONÔMICA
CONSTITUCIONAL: UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Direito Constitucional Econômico, linha de pesquisa Desenvolvimento Econômico e Princípios Constitucionais da Ordem Econômica, na instituição UNIALFA – Universidade Alves Faria, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Direito Constitucional Econômico.

Orientador: Professor Doutor Túlio Augusto Tayano Afonso

GOIÂNIA-GO

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na fonte: Biblioteca UNIALFA

B277p

Barros, Paulo Roberto Rezende.

O papel do hidrogênio verde no contexto da ordem econômica constitucional : uma questão de sustentabilidade. / Paulo Roberto Rezende Barros. – 2025.

97 f.: il. 30cm.

Orientador: Prof. Dr. Túlio Augusto Tayano Afonso.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Direito Constitucional Econômico, Centro Universitário Alves Faria (UNIALFA) – Goiânia, 2025.

1. Constituição econômica. 2. Hidrogênio verde. 3. Sustentabilidade. 4. Matriz energética brasileira. I. Afonso, Túlio Augusto Tayano. II. UNIALFA. III. Título.

CDU: 342.4:502.13

O PAPEL DO HIDROGÊNIO VERDE NO CONTEXTO DA ORDEM ECONÔMICA
CONSTITUCIONAL: UMA QUESTÃO DE SUSTENTABILIDADE

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Direito Constitucional Econômico e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado Acadêmico em Direito Constitucional Econômico (MADIR), da UNIALFA, em 2025.

Goiânia – Goiás, 29 de agosto de 2025.

Banca Examinadora:

Professor Doutor Felipe Nicolau Pimentel Alamino

Professora Doutora Ana Cláudia Pompeu Torezan Andreucci

Professor Doutor Túlio Augusto Tayano Afonso - Orientador

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Túlio Augusto Tayano Afonso, meu estimado orientador, cuja orientação precisa, rigor metodológico e perspicácia científica foram fundamentais para a concretização desta pesquisa. Sua confiança em meu desenvolvimento acadêmico transcendeu o papel convencional de orientação, configurando-se como verdadeiro alicerce deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Mestrado, cujos ensinamentos, desafiadores e esclarecedores, provocaram inquietações intelectuais necessárias à maturação do pensamento científico.

Aos colegas de jornada acadêmica, pelo compartilhamento de ideias e experiências. Os diálogos estabelecidos nos interstícios das atividades formais enriqueceram substancialmente minha trajetória e ampliaram meus horizontes investigativos.

“Estou feliz, contudo, ao ver que os utopianos têm a forma de constituição que desejaria a todos os povos. Eles pelo menos se deixaram guiar por princípios que conferiram à sua república a prosperidade e, além disso, tanto quanto possam as suposições humanas prever o futuro, uma garantia de perenidade.” (MORE, Thomas. Utopia. Traduzido por Ciro Mioranza. Editora Escala. Coleção Grandes Obras do Pensamento Universal. São Paulo: 2008; p. 111).

RESUMO

A presente dissertação, sob a ótica do Direito Constitucional Econômico, investiga o papel do hidrogênio verde no contexto da ordem econômica constitucional brasileira, examinando especificamente sua conformidade com o princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988. Mediante uma abordagem qualitativa combinada com o método hipotético-dedutivo, a pesquisa analisa aspectos técnicos, econômicos, jurídicos e ambientais do hidrogênio verde como tecnologia emergente para a transição energética. O estudo estrutura-se em três capítulos complementares: o primeiro contextualiza o hidrogênio verde, seu processo de obtenção por eletrólise da água e suas implicações geopolíticas; o segundo examina a Constituição Econômica e a sustentabilidade como princípio conformador da ordem econômica; e o terceiro analisa as mudanças climáticas, os acordos internacionais de mitigação e o potencial de ampliação das energias renováveis na matriz energética brasileira. A pesquisa confirma as duas hipóteses inicialmente propostas. Primeiramente, demonstra-se que o hidrogênio verde contribui significativamente para a redução de gases de efeito estufa, promovendo uma economia de baixo carbono, por ser produzido exclusivamente com eletricidade de fontes renováveis. Essa característica o torna particularmente valioso para a descarbonização de setores de difícil eletrificação, como indústrias pesadas e transporte de longa distância. Em segundo lugar, comprova-se que o hidrogênio verde possibilita a diversificação e ampliação da matriz energética brasileira, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. O Brasil, com suas vantagens competitivas em recursos renováveis, infraestrutura portuária estratégica e experiência em tecnologias energéticas sustentáveis, apresenta condições favoráveis para se tornar protagonista neste mercado emergente. A análise revela desafios significativos para implementação em larga escala, incluindo custos elevados, necessidade de investimentos em infraestrutura e ausência de marco regulatório específico. Não obstante, conclui-se que o hidrogênio verde atende ao princípio constitucional da sustentabilidade em suas dimensões ambiental, econômica, social e intergeracional, configurando-se como instrumento relevante para a concretização de um modelo de desenvolvimento que harmoniza crescimento econômico e preservação ambiental, conforme preconizado pela Constituição Federal de 1988.

Palavras-chave: Hidrogênio verde; Direito constitucional econômico; Constituição Econômica; Ordem econômica; Sustentabilidade; Desenvolvimento econômico; Descarbonização; Fontes energéticas.

ABSTRACT

This dissertation, from the perspective of Economic Constitutional Law, investigates the role of green hydrogen in the context of the Brazilian constitutional economic order, specifically examining its compliance with the sustainability principle established in Article 170, Section VI, of the Federal Constitution of 1988. Through a qualitative approach combined with the hypothetical-deductive method, the research analyzes technical, economic, legal and environmental aspects of green hydrogen as an emerging technology for energy transition. The study is structured in three complementary chapters: the first contextualizes green hydrogen, its production process through water electrolysis and its geopolitical implications; the second examines the Economic Constitution and sustainability as a guiding principle of the economic order; and the third analyzes climate change, international mitigation agreements and the potential for expanding renewable energy in the Brazilian energy matrix. The research confirms both initially proposed hypotheses. First, it demonstrates that green hydrogen significantly contributes to the reduction of greenhouse gases, promoting a low-carbon economy, as it is produced exclusively with electricity from renewable sources. This characteristic makes it particularly valuable for decarbonizing sectors that are difficult to electrify, such as heavy industries and long-distance transportation. Second, it proves that green hydrogen enables the diversification and expansion of the Brazilian energy matrix, reducing dependence on fossil fuels. Brazil, with its competitive advantages in renewable resources, strategic port infrastructure and experience in sustainable energy technologies, presents favorable conditions to become a protagonist in this emerging market. The analysis reveals significant challenges for large-scale implementation, including high costs, the need for infrastructure investments and the absence of a specific regulatory framework. Nevertheless, it concludes that green hydrogen meets the constitutional principle of sustainability in its environmental, economic, social and intergenerational dimensions, configuring itself as a relevant instrument for the implementation of a development model that harmonizes economic growth and environmental preservation, as advocated by the Federal Constitution of 1988.

Keywords: Green hydrogen; Economic constitutional law; Economic Constitution; Economic order; Sustainability; Economic development; Decarbonization; Energy sources.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CF/88	Constituição Federal de 1988
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatt
H ₂	Hidrogênio
H ₂ O	Água
H2V	Hidrogênio Verde
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
N ₂ O	Óxidos de Nitrogênio
NDC	Megawatt
O ₂	Oxigênio
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UE	União Europeia

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- | | |
|----------|--|
| Figura 1 | Ilustração do processo produtivo do Hidrogênio Verde – eletrólise |
| Figura 2 | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU – Agenda 2030 |
| Figura 3 | Gráfico da matriz energética global |
| Figura 4 | Gráfico da matriz energética nacional |
| Figura 5 | Gráfico de comparação do consumo energético nacional e global |
| Figura 6 | Gráfico de comparação do consumo de energia elétrica nacional e global |

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. O HIDROGÊNIO VERDE: CONTEXTUALIZAÇÃO.....	21
1.1. Aspectos conceituais e processo de obtenção do hidrogênio a partir da eletrólise da água.....	22
1.2. O hidrogênio verde no contexto da geopolítica: implicações jurídico-econômicas e sustentabilidade energética global.....	24
1.3 Inovação e tecnologia sustentável: desafios e perspectivas no contexto brasileiro.....	26
1.4. A economia do hidrogênio verde.....	27
1.5. Marco regulatório no Brasil.....	30
1.6. Iniciativas de produção de hidrogênio verde no Brasil e no cenário global.....	31
2. A CONSTITUIÇÃO ECONÔMICA E O PRINCÍPIO DA SUSTENTABILIDADE.....	34
2.1. Considerações sobre a teoria da Constituição Econômica.....	34
2.2. Sustentabilidade – aspectos conceituais.....	38
2.3. A relação entre o meio ambiente e o desenvolvimento econômico sustentável.....	40
2.4. A defesa do meio ambiente como princípio conformador da ordem econômica.....	42
2.5. Distinção entre regras e princípios e a aplicação do princípio da ponderação na Teoria dos Direitos Fundamentais.....	44
2.6. A sustentabilidade e o princípio da solidariedade intergeracional: fundamentos e perspectivas para a proteção dos direitos das futuras gerações.....	48
3. O HIDROGÊNIO VERDE E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESCARBONIZAÇÃO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	49
3.1. Protocolos Internacionais de Mitigação Climática: Protocolo de Quioto e Acordo de Paris.....	50
3. 2. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas: Agenda 2030 no Brasil.....	55
3.3. A COP30 e o protagonismo da Amazônia nas negociações climáticas multilaterais.....	59

3.4. Economia de baixo carbono: caminhos para a sustentabilidade ambiental.....	61
3.5. Metas de descarbonização: desafios e perspectivas para implementação no Brasil.....	63
3.6. Fontes energéticas: matriz energética brasileira.....	68
3.7. Transição e diversificação da matriz energética brasileira.....	71
3.8. Potencial de ampliação das energias renováveis.....	75
CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

INTRODUÇÃO

O cenário contemporâneo de mudanças climáticas globais e a imperativa necessidade de transição para uma economia de baixo carbono têm intensificado a busca por fontes de energia limpa e sustentáveis em escala mundial. As crescentes preocupações científicas acerca dos efeitos deletérios do aquecimento global, decorrentes predominantemente das emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), estabelecem um contexto de urgência para a implementação de estratégias de mitigação climática.

Os compromissos internacionais assumidos no âmbito do Acordo de Paris delineiam metas específicas de redução das emissões de GEE entre 40% e 70% até 2050, tendo como referência os níveis de 2010, com o objetivo de limitar o incremento da temperatura média global a 1,5°C acima dos patamares pré-industriais. Esse paradigma impõe desafios estruturais significativos aos modelos energéticos convencionais, demandando uma reestruturação sistêmica dos processos de produção, distribuição e consumo de energia, bem como a adoção de tecnologias inovadoras e sustentáveis que viabilizem a descarbonização da matriz energética global.

Nesse contexto de urgência climática e necessidade de transformação da matriz energética global, o hidrogênio verde emerge como uma tecnologia promissora para a descarbonização da economia, especialmente em setores de difícil eletrificação, como indústrias pesadas, transporte de longa distância e geração de calor industrial. Produzido a partir da eletrólise da água, utilizando exclusivamente eletricidade proveniente de fontes renováveis, o hidrogênio verde destaca-se como uma alternativa de baixo impacto ambiental, capaz de contribuir significativamente para o cumprimento dos compromissos internacionais de redução de emissões, estabelecidos em acordos como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris.

A relevância do hidrogênio verde transcende a dimensão puramente energética, alcançando aspectos econômicos, geopolíticos e jurídicos. No cenário internacional, observa-se um movimento crescente de países e blocos econômicos que têm desenvolvido estratégias específicas para o hidrogênio verde, reconhecendo seu potencial transformador. A União Europeia estabeleceu uma ambiciosa estratégia para o hidrogênio, visando instalar pelo menos 40 GW de eletrolisadores até 2030 e produzir até 10 milhões de toneladas de hidrogênio

renovável. Similarmente, países como Alemanha, Japão, Coreia do Sul, Austrália e Chile têm desenvolvido roteiros nacionais para o hidrogênio, evidenciando uma tendência global de reconhecimento da importância estratégica desta tecnologia.

No Brasil, a discussão sobre o hidrogênio verde ganha contornos particulares em função das características específicas do país. Com uma matriz energética já relativamente limpa, quando comparada à média mundial, o Brasil possui vantagens competitivas significativas para a produção de hidrogênio verde, incluindo abundância de recursos renováveis, infraestrutura portuária estratégica e experiência em tecnologias energéticas sustentáveis. Essas condições posicionam o país como um potencial protagonista no mercado global emergente, suscitando reflexões sobre as implicações jurídicas, econômicas e ambientais deste novo vetor energético no contexto nacional.

A presente dissertação insere-se nesse debate, investigando o papel do hidrogênio verde no contexto da ordem econômica constitucional brasileira, especificamente em relação ao princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988. O dispositivo constitucional em questão eleva a defesa do meio ambiente à condição de princípio conformador da ordem econômica, indicando a opção do constituinte por um modelo de desenvolvimento que harmonize crescimento econômico e preservação ambiental. A abordagem constitucional sobre a questão ambiental revela uma concepção avançada do desenvolvimento, que não se limita ao crescimento econômico quantitativo, mas incorpora dimensões qualitativas essenciais à dignidade humana e à preservação dos ecossistemas.

O art. 170, VI, da CF/88, ao estabelecer a defesa do meio ambiente como princípio da ordem econômica, “inclusive mediante tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação”, cria a base normativa para a implementação de políticas públicas que favoreçam tecnologias e processos produtivos de menor impacto ambiental. A previsão constitucional, interpretada sistematicamente com o art. 225, que consagra o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, fundamenta juridicamente a promoção de tecnologias sustentáveis, como o hidrogênio verde, tido como elemento de concretização do projeto constitucional de desenvolvimento sustentável.

A pesquisa parte do problema central: de que forma o hidrogênio verde atende ao princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988? A questão apresenta relevância teórica e prática significativa, uma

vez que a compreensão da relação entre o hidrogênio verde e o princípio constitucional da sustentabilidade pode orientar a formulação de políticas públicas, marcos regulatórios e decisões judiciais relacionadas a essa tecnologia emergente, contribuindo para o desenvolvimento da dogmática ambiental, no contexto da ordem constitucional econômica.

Para responder ao problema de pesquisa, foram formuladas duas hipóteses principais: (1) o hidrogênio verde contribui para a redução de gases de efeito estufa, promovendo uma economia de baixo carbono; e (2) o hidrogênio verde possibilita a diversificação e ampliação da matriz energética brasileira, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Essas hipóteses refletem dimensões complementares da contribuição do hidrogênio verde para a sustentabilidade, abrangendo tanto seu potencial de mitigação climática quanto seu papel na transição energética nacional.

A primeira hipótese relaciona-se diretamente com os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris, que estabelece a meta de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005. Considerando que o hidrogênio verde, quando utilizado como combustível ou vetor energético, gera apenas água como subproduto, sua adoção em substituição a combustíveis fósseis pode contribuir significativamente para a redução das emissões de GEE em diversos setores, incluindo indústria, transporte e geração de energia. A contribuição para a descarbonização da economia alinha-se ao princípio constitucional da defesa do meio ambiente, que implica, entre outros aspectos, a mitigação de impactos climáticos adversos.

A segunda hipótese, por sua vez, relaciona-se com a questão da segurança energética e da sustentabilidade da matriz energética brasileira. Embora o Brasil possua uma matriz energética comparativamente limpa, com expressiva participação de fontes renováveis (49,1% da Oferta Interna de Energia em 2023, segundo o Balanço Energético Nacional), o país ainda depende significativamente de combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes e na indústria. O desenvolvimento do hidrogênio verde como vetor energético pode contribuir para a redução desta dependência, diversificando a matriz energética nacional e aumentando sua resiliência frente a desafios futuros, como a escassez de recursos não renováveis e a necessidade de adaptação às mudanças climáticas.

Metodologicamente, a investigação adota uma abordagem qualitativa combinada com o método hipotético-dedutivo, utilizando técnicas de pesquisa bibliográfica e documental para examinar a literatura especializada, os marcos

regulatórios e documentos oficiais relacionados ao tema. A abordagem metodológica mostra-se adequada à natureza interdisciplinar do objeto de estudo, que envolve conhecimentos de direito constitucional, direito ambiental, economia, engenharia e ciências ambientais. A pesquisa bibliográfica abrange obras de referência nestas diversas áreas, buscando uma compreensão integrada do fenômeno estudado. O método hipotético-dedutivo, desenvolvido por Karl Popper, caracteriza-se pela formulação de hipóteses que são posteriormente submetidas a testes visando sua corroboração ou falseamento. No contexto da pesquisa, as hipóteses formuladas sobre a relação entre o hidrogênio verde e o princípio constitucional da sustentabilidade são analisadas à luz dos dados coletados na pesquisa bibliográfica e documental, buscando-se verificar se há elementos suficientes para sua corroboração. Essa abordagem permite uma investigação rigorosa e sistemática do problema de pesquisa, fundamentada em evidências científicas e em uma análise crítica da literatura especializada.

A pesquisa documental, por sua vez, envolve a análise de documentos oficiais, como relatórios técnicos, legislação nacional e internacional, planos e programas governamentais, e estudos produzidos por organizações internacionais e agências especializadas. Os documentos fornecem dados atualizados e informações oficiais sobre o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil e no mundo, bem como sobre as políticas públicas e marcos regulatórios relacionados à tecnologia.

A combinação da pesquisa bibliográfica com a documental permite uma análise abrangente e atualizada do objeto de estudo, capturando tanto as reflexões teóricas quanto os desenvolvimentos práticos.

A estrutura da dissertação reflete a complexidade e a multidisciplinaridade do tema, sendo organizada em três capítulos principais que dialogam entre si, construindo progressivamente a argumentação que fundamenta as respostas ao problema de pesquisa. Essa organização permite uma análise aprofundada de cada aspecto relevante do tema, ao mesmo tempo em que mantém a coesão e a coerência do trabalho como um todo.

O primeiro capítulo, intitulado "O hidrogênio verde: contextualização", aborda os aspectos conceituais e contextuais desta tecnologia, explorando seu processo de obtenção por eletrólise da água, suas implicações geopolíticas e econômicas, bem como os desafios e perspectivas para sua implementação no cenário brasileiro. O capítulo inicia com uma análise da urgência da transição energética no contexto das mudanças climáticas, posicionando o hidrogênio verde como uma tecnologia promissora para a descarbonização da economia global. Em seguida, são

apresentados os aspectos técnicos do hidrogênio verde, incluindo suas propriedades físico-químicas, métodos de produção e classificações conforme a fonte energética utilizada. Destaca-se a particularidade do hidrogênio verde, obtido exclusivamente por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade renovável, em contraposição a outras formas de produção de hidrogênio que utilizam combustíveis fósseis como insumo. A distinção é fundamental para compreender a contribuição específica do hidrogênio verde para a sustentabilidade ambiental. O capítulo aborda ainda o hidrogênio verde no contexto da geopolítica, analisando suas implicações jurídico-econômicas e o potencial de reconfiguração das relações internacionais associadas à energia. São examinados também os desafios e perspectivas para a implementação do hidrogênio verde em larga escala, incluindo questões de custos, eficiência energética, infraestrutura e regulação. O capítulo analisa ainda a economia do hidrogênio verde, explorando seu potencial como vetor de desenvolvimento econômico sustentável, e o marco regulatório em desenvolvimento no Brasil, com ênfase nos Projetos de Lei nº 725/2022, 1878/2022 e 2308/23. Por fim, são apresentadas iniciativas nacionais e internacionais relacionadas ao hidrogênio verde, destacando experiências relevantes que podem orientar o desenvolvimento da tecnologia no Brasil.

O segundo capítulo, "A Constituição Econômica e a sustentabilidade", examina a incorporação de princípios econômicos no texto constitucional brasileiro, o conceito de sustentabilidade e sua operacionalização no ordenamento jurídico, e a defesa do meio ambiente como princípio conformador da ordem econômica. O capítulo inicia com uma análise histórica da constitucionalização da economia, desde as primeiras constituições liberais até a Constituição Federal de 1988, destacando a evolução da abordagem constitucional às questões econômicas e ambientais. Em seguida, são explorados os aspectos conceituais da sustentabilidade, desde suas origens no Relatório Brundtland até sua compreensão contemporânea como princípio constitucional de eficácia direta e imediata. São analisadas as múltiplas dimensões da sustentabilidade, incluindo os aspectos ambientais, sociais, econômicos e intergeracionais, bem como sua implementação prática no ordenamento jurídico brasileiro, através de legislações como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) e a Lei da Biodiversidade (Lei nº 13.123/2015). O capítulo aborda ainda a relação entre meio ambiente e desenvolvimento econômico sustentável, analisando a interdependência entre sistemas econômicos e ecológicos, e os instrumentos jurídicos que buscam harmonizar estas dimensões, como o

licenciamento ambiental, o ICMS ecológico e os pagamentos por serviços ambientais. A jurisprudência dos tribunais superiores sobre o tema também é examinada, com destaque para decisões que reconhecem a complementaridade entre proteção ambiental e desenvolvimento econômico. Por fim, o capítulo aprofunda a análise da defesa do meio ambiente como princípio conformador da ordem econômica, tal como estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal. São examinadas as implicações normativas deste dispositivo constitucional, sua força vinculante para os agentes econômicos públicos e privados, e sua função de orientar a interpretação e aplicação das normas infralegais relacionadas à atividade econômica. Essa análise fornece o fundamento teórico para a compreensão do hidrogênio verde como elemento de concretização do princípio constitucional da sustentabilidade.

O terceiro capítulo, "Mudanças climáticas e aquecimento global: causas e dinâmicas", investiga as alterações climáticas antropogênicas, os acordos internacionais de mitigação climática, os desafios da descarbonização e o potencial de ampliação das energias renováveis na matriz energética brasileira.

O capítulo inicia com uma análise das causas e dinâmicas das mudanças climáticas, destacando o papel das emissões de gases de efeito estufa no aquecimento global. São examinados os impactos ambientais, econômicos e sociais das alterações climáticas, com ênfase na vulnerabilidade diferenciada de populações e ecossistemas. Em seguida, são analisados os principais protocolos internacionais de mitigação climática, notadamente o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris. São exploradas as diferenças entre estes acordos, suas estruturas normativas, mecanismos de implementação e impactos na política climática brasileira. O capítulo aborda ainda o conceito de economia de baixo carbono, analisando os caminhos para a sustentabilidade ambiental através da redução de emissões de GEE e da transição para fontes energéticas renováveis. São examinadas também as metas de descarbonização, com foco nos desafios e perspectivas para sua implementação no Brasil. São analisados os instrumentos jurídicos e econômicos disponíveis para promover a transição para uma economia de baixo carbono, incluindo mecanismos de comando e controle, instrumentos econômicos como mercados de carbono, e incentivos fiscais para tecnologias limpas. Os desafios técnicos, econômicos e institucionais para a descarbonização da economia brasileira são discutidos, bem como as oportunidades associadas ao processo.

O capítulo explora, ainda, a matriz energética brasileira, analisando sua composição atual, evolução histórica e particularidades no contexto internacional. São destacadas as vantagens competitivas do Brasil em relação às energias renováveis e os desafios para a transição e diversificação da matriz energética nacional. Por fim, é analisado o potencial de ampliação das energias renováveis no Brasil, com ênfase nas oportunidades e desafios para o desenvolvimento de um sistema energético mais sustentável.

Esse terceiro capítulo dialoga diretamente com as hipóteses formuladas, analisando como o hidrogênio verde pode contribuir para a redução de emissões de GEE e para a diversificação da matriz energética nacional, estabelecendo assim a base empírica para a verificação das hipóteses de pesquisa.

1. O HIDROGÊNIO VERDE: CONTEXTUALIZAÇÃO

A matriz energética mundial, historicamente fundamentada na utilização de combustíveis fósseis, enfrenta atualmente desafios significativos relacionados aos impactos ambientais e às mudanças climáticas. Nesse contexto, a transição energética¹ poderá contar com o hidrogênio, que será produzido cada vez mais em maior quantidade e com técnicas sustentáveis.

Este capítulo busca analisar o hidrogênio verde como uma tecnologia sustentável para a transição energética, explorando seus aspectos conceituais, técnicos e contextuais, destacando os principais desafios e perspectivas para sua implementação em larga escala.

O hidrogênio será abundante e sustentável - até 2050, dois terços dele serão produzidos a partir de fontes renováveis, com um potencial de produção equivalente a cerca de vinte vezes o consumo mundial de energia (ENEL, 2022).

Esse cenário demanda uma urgente transição para alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis, capazes de promover a descarbonização da economia e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

Entre as diversas alternativas energéticas que emergem como potenciais soluções para este desafio, o hidrogênio verde tem se destacado como uma opção promissora. Obtido por meio da eletrólise da água, alimentada por fontes de energia renovável, ele representa uma tecnologia com potencial para transformar significativamente o paradigma energético atual, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a promoção de uma economia mais sustentável (IRENA, 2022).

A Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2022) aponta que, à medida que mais países adotam estratégias profundas de descarbonização, o hidrogênio verde tende a ocupar um papel central na transição energética, sendo considerado um fator essencial no tocante à energia limpa. Em um cenário de aquecimento global limitado a 1,5°C, projeta-se que a utilização da energia do hidrogênio poderá se caracterizar como uma potencial tecnologia para o cumprimento das metas de redução de gases de efeito estufa (GEE)².

O hidrogênio é o elemento mais leve e abundante do universo. Entretanto, na Terra, o hidrogênio raramente é encontrado em sua forma livre na natureza

¹Por questão metodológica, a abordagem sobre a transição energética, uma das hipóteses da pesquisa, será aprofundada no capítulo 3.

²Por questão metodológica, a abordagem sobre a redução de gases de efeito estufa, outra hipótese da pesquisa, será aprofundada no capítulo 3.

devido à alta velocidade com que suas moléculas tendem a escapar da gravidade terrestre, apresentando propriedades físico-químicas singulares que o tornam particularmente interessante como vetor energético (ATKINS *et al*, 2018, p. 649).

Entre estas propriedades, destaca-se seu elevado conteúdo energético por unidade de massa, aproximadamente três vezes superior ao da gasolina (Paiva, 2022, p. 23). Adicionalmente, sua combustão é considerada limpa, pois gera apenas água como subproduto, o que representa uma vantagem significativa em relação aos combustíveis fósseis, cujo processo de combustão libera dióxido de carbono e outros poluentes atmosféricos (FREITAS, 2022, p. 12).

Como vetor energético, o hidrogênio apresenta diversas aplicações potenciais. Pode ser utilizado como combustível para geração de eletricidade, em motores de combustão interna, ou como matéria-prima em processos industriais. Além disso, o hidrogênio pode funcionar como meio de armazenamento de energia, acumulando o excedente produzido por fontes renováveis, como a solar e a eólica, para uso posterior quando a produção dessas fontes for insuficiente para atender à demanda (PUCRS, 2022).

Atualmente, mais de 96% do hidrogênio consumido mundialmente é produzido a partir de combustíveis fósseis, resultando em elevados índices de emissões de CO₂ anualmente (Veiga, 2022, p. 7).

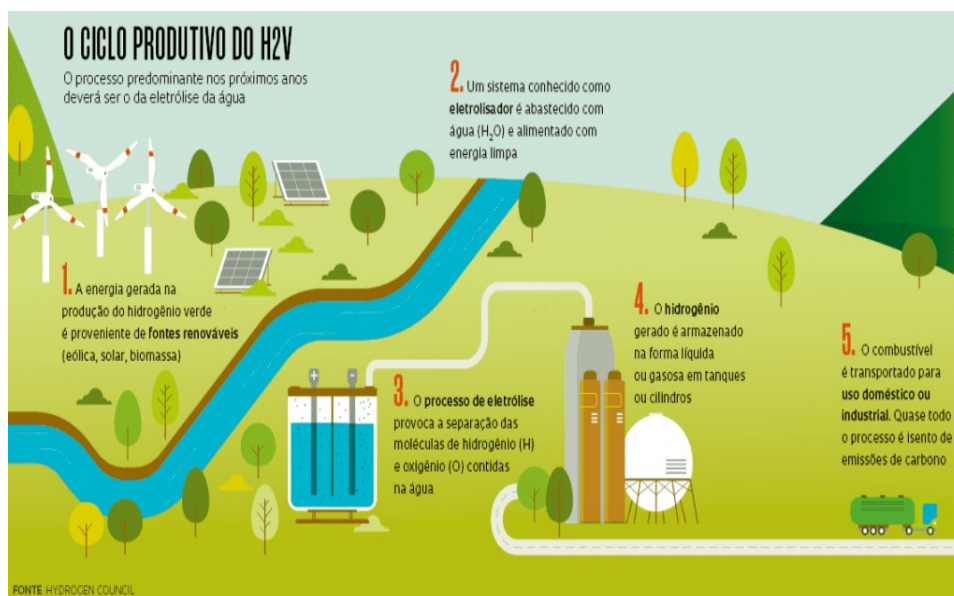
Nesse contexto, visando diferenciar as diversas formas de obtenção do hidrogênio, foram estabelecidas classificações baseadas em cores, que refletem as fontes energéticas e os processos utilizados. As principais classificações incluem: (i) Hidrogênio Marrom: produzido a partir do carvão mineral; (ii) Hidrogênio Cinza: obtido de combustíveis fósseis, principalmente gás natural; (iii) Hidrogênio Azul: derivado de fontes fósseis, principalmente gás natural, mas com implementação de tecnologias que realiza a captura e o armazenamento de carbono, reduzindo as emissões de dióxido de carbono; e (iv) Hidrogênio Verde: produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica, hidráulica e geotérmica (ETENE, 2021).

Entre estas classificações, o hidrogênio verde destaca-se como a única opção considerada de carbono zero, representando uma alternativa promissora para a descarbonização da matriz energética global (IRENA, 2020).

1.1. Aspectos conceituais e processo de obtenção do hidrogênio a partir da eletrólise da água

O hidrogênio verde pode ser definido como aquele obtido por meio da eletrólise da água, utilizando exclusivamente eletricidade proveniente de fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar. Esse processo resulta em liberação de água, em forma de calor, sem emissões de carbono, tornando-o uma opção sustentável para a substituição dos combustíveis fósseis e para a descarbonização de setores de difícil eletrificação (EPE, 2024).

Eis a representação do processo produtivo (Figura 1):



A eletrólise da água, processo central na obtenção do hidrogênio verde, consiste na quebra das moléculas de água (H₂O) em hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) por meio da aplicação de corrente elétrica. Trata-se de uma reação eletroquímica não espontânea, que ocorre em dispositivos denominados eletrolisadores (IRENA, 2020)³.

Termodinamicamente, a dissociação da água é um processo que requer o fornecimento de energia externa para ocorrer. É necessário aplicar um potencial elétrico para promover a reação (ATKINS *et al*, 2018, p. 545).

O custo para a obtenção do hidrogênio, por meio da energia limpa, depende principalmente do custo da eletricidade renovável e do investimento nos eletrolisadores.

³Por uma questão de recorte metodológico, as características físico-químicas do hidrogênio e os aspectos técnicos para a sua obtenção, a partir da eletrólise da água, por tangenciar outras áreas da ciência, serão abordados de forma superficial, objetivando apenas contribuir para a compreensão do tema, na correlação existente entre a sustentabilidade e a ordem econômica constitucional.

Com a contínua redução dos custos das energias renováveis e o aumento da escala de produção dos eletrolisadores, espera-se que o hidrogênio verde se torne mais competitivo.

É importante mencionar que o hidrogênio verde emerge como um agente de mudança para se alcançar a neutralidade climática, cujo objetivo é reduzir as emissões de GEE à níveis iguais ou menores que a absorção desses gases pela natureza, sem comprometer o crescimento industrial e o desenvolvimento social (IRENA, 2022).

1.2. O hidrogênio verde no contexto da geopolítica: implicações jurídico-econômicas e sustentabilidade energética global

A ascensão do hidrogênio verde como componente central da matriz energética global promete reconfigurar substantivamente as relações geopolíticas tradicionalmente estabelecidas pelo comércio de petróleo e gás natural. Diferentemente da geografia concentrada dos recursos fósseis, o potencial técnico para produção de hidrogênio verde excede significativamente a demanda global estimada, possibilitando uma distribuição mais equitativa do poder geopolítico associado à energia (IRENA, 2022).

Essa transformação apresenta implicações jurídico-constitucionais relevantes, principalmente no que tange à soberania energética dos Estados. Países que historicamente figuraram como importadores de energia, a exemplo de Chile, Marrocos e Namíbia, poderão emergir como exportadores de hidrogênio verde, alterando suas posições na hierarquia energética internacional. A mudança exigirá adaptações nos marcos regulatórios nacionais e internacionais para acomodar este novo paradigma energético (IRENA, 2022).

Há indicação de que aproximadamente o hidrogênio produzido poderá ser comercializado internacionalmente até 2050, superando a proporção atual do comércio de gás natural. A projeção sugere o estabelecimento de novas rotas comerciais e relações bilaterais distintas daquelas edificadas sobre o comércio de hidrocarbonetos durante o século XX. O estudo aponta ainda que, diferentemente do mercado de combustíveis fósseis, é improvável que o comércio de hidrogênio venha a ser dominado por grupos oligopolistas ou cartelizados, o que pode contribuir para uma governança energética global mais democrática e inclusiva (IRENA, 2022).

A análise prospectiva indica que a década de 2020 será caracterizada por uma corrida à liderança tecnológica no setor de hidrogênio verde, com expectativa

de que a demanda por esta fonte energética cresça significativamente a partir de meados da década de 2030. Nesse horizonte temporal, projeta-se que o hidrogênio verde se tornará competitivo em termos de custo em relação ao hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis, especialmente em países como China, Brasil e Índia (IRENA, 2022).

Um indicativo desta tendência foi observado durante os picos de preços do gás natural na Europa em 2021, quando o hidrogênio verde momentaneamente atingiu patamares de preço competitivos em relação às alternativas fósseis. O episódio ilustra como a volatilidade dos preços dos combustíveis convencionais pode acelerar a transição para fontes alternativas, demandando adaptações nos marcos regulatórios para absorver estas flutuações de mercado.

No âmbito do direito econômico, os países com amplo potencial renovável encontram-se estrategicamente posicionados para atrair indústrias de uso energético intensivo, fenômeno que pode ser denominado "industrialização verde". A participação na cadeia de valor do hidrogênio - desde a fabricação de equipamentos como eletrolisadores e células de combustível até a produção e distribuição do vetor energético - representa uma oportunidade significativa de desenvolvimento industrial sustentável (IRENA, 2022).

China, Japão e Europa já desenvolveram vantagens competitivas iniciais na fabricação de equipamentos para a economia do hidrogênio, porém, a inovação tecnológica continuará a remodelar o cenário competitivo global. Esse aspecto ressalta a importância de políticas públicas voltadas para ciência, tecnologia e inovação, bem como marcos jurídicos que promovam a transferência de tecnologia e cooperação internacional, especialmente para países em desenvolvimento (IRENA, 2022).

A modelagem do arcabouço normativo internacional para o mercado de hidrogênio verde apresenta-se como elemento decisivo para determinar se esta transição resultará em competição geopolítica acirrada ou em uma nova era de cooperação internacional aprimorada. Necessário ressaltar que o apoio aos países em desenvolvimento para implementação de tecnologias de hidrogênio verde é fundamental para evitar o alargamento da disparidade na descarbonização global e promover igualdade e inclusão (IRENA, 2022).

Esse cenário coloca em evidência a necessidade de instrumentos jurídicos internacionais que promovam a transferência de tecnologia, capacitação técnica e financiamento adequado para que países em desenvolvimento possam participar

ativamente da economia do hidrogênio verde. Do contrário, corre-se o risco de reproduzir ou mesmo ampliar as assimetrias existentes no sistema energético atual.

A construção de cadeias de suprimento locais, indústrias verdes e geração de empregos em países ricos em recursos renováveis figura como estratégia central para garantir que a transição para o hidrogênio verde ocorra de maneira socialmente justa e economicamente inclusiva. A abordagem alinha-se aos princípios de responsabilidades comuns, porém, diferenciadas e respectivas capacidades, consagrados no direito ambiental internacional.

1.3. Inovação e tecnologia sustentável: desafios e perspectivas no contexto brasileiro

Apesar de seu potencial promissor, o desenvolvimento do hidrogênio verde em larga escala enfrenta diversos desafios técnicos, econômicos e regulatórios. Entre os principais obstáculos, destacam-se os custos de produção, que ainda é significativamente mais elevado que o do hidrogênio derivado de combustíveis fósseis (IEPUC/RJ, 2019). O sistema de produção de hidrogênio verde por eletrólise da água demanda altos investimentos, principalmente na aquisição e operação dos eletrolisadores.

A eficiência energética, por sua vez, representa um outro obstáculo, onde o processo de eletrólise envolve perdas energéticas significativas, resultando em uma eficiência global relativamente baixa quando comparada a outras tecnologias energéticas. Melhorias na eficiência dos eletrolisadores e na integração com sistemas de energia renovável são necessárias para aumentar a viabilidade econômica (IEPUC/RJ, 2019).

A infraestrutura também encontra óbices, uma vez que a produção, armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio requerem infraestruturas específicas que, em grande parte, ainda não existem ou são inadequadas. A adaptação da infraestrutura existente e o desenvolvimento de novas instalações representam investimentos substanciais (IEPUC/RJ, 2019).

Além disso, a ausência de um marco regulatório específico para o hidrogênio verde, incluindo definições claras, padrões de qualidade, certificações e mecanismos de incentivo, constitui uma barreira significativa para seu desenvolvimento no Brasil. A produção de hidrogênio verde em escala industrial ainda é limitada, sendo necessário um aumento substancial da capacidade instalada de eletrolisadores para atender à crescente demanda projetada (IEPUC/RJ, 2019).

No entanto, diversas tendências e desenvolvimentos recentes sugerem perspectivas positivas para a superação destes desafios. As adições de capacidade de eletrolisadores aumentaram significativamente. Esse aumento de escala, combinado com avanços tecnológicos e redução dos custos das energias renováveis, tende a tornar o hidrogênio verde progressivamente mais competitivo (IRENA, 2022).

A crescente pressão internacional por políticas climáticas mais ambiciosas e a busca por alternativas aos combustíveis fósseis têm estimulado investimentos significativos em pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias em relação ao hidrogênio verde. Empresas do setor energético, tradicionalmente focadas em combustíveis fósseis têm diversificado seus portfólios com investimentos em projetos de hidrogênio verde (SMINK, 2021).

No contexto brasileiro, as excelentes condições para produção de energias renováveis, combinadas com a crescente demanda internacional por soluções de baixo carbono, abrem oportunidades para o país se posicionar como um exportador global de hidrogênio verde. Para aproveitar este potencial, contudo, será necessário desenvolver políticas públicas específicas, incentivos fiscais e um arcabouço regulatório adequado, além de promover parcerias entre instituições de pesquisa, empresas e governo.

No Brasil, as condições naturais favoráveis, combinadas com a experiência em energias renováveis, posicionam o país como um potencial protagonista neste mercado emergente. Entretanto, a consolidação do hidrogênio verde como um componente central da matriz energética global ainda requer a superação de desafios significativos relacionados a custos, eficiência, infraestrutura e regulação.

O contínuo avanço tecnológico, o aumento da escala de produção e o desenvolvimento de políticas públicas adequadas serão determinantes para viabilizar sua implementação em larga escala.

Em um cenário onde a urgência da crise climática demanda soluções energéticas inovadoras e sustentáveis, o hidrogênio verde representa não apenas uma alternativa tecnológica promissora, mas também uma oportunidade estratégica para reconfigurar o sistema energético global em bases mais sustentáveis e equitativas. A evolução de sua trajetória nas próximas décadas será, inevitavelmente, um elemento crucial na definição dos rumos da transição energética global.

1.4. A economia do hidrogênio verde

O mercado global de hidrogênio tem apresentado crescimento consistente nos últimos anos. Conforme dados da IEA Global Hydrogen Review 2022, em 2021 a demanda alcançou 94 milhões de toneladas, superando os níveis pré-pandêmicos de 91 Mt registrados em 2019. Este volume representa aproximadamente 2,5% do consumo energético global final. Embora os usos industriais tradicionais continuem predominantes, observou-se um aumento significativo nas novas aplicações, que chegaram a cerca de 40 mil toneladas, representando um crescimento de 60% comparado a 2020 (WHITE HOUSE, 2023).

Em 2015, durante a COP 21 em Paris, 195 nações estabeleceram um acordo climático histórico para diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e combater as mudanças climáticas, reforçando o desenvolvimento sustentável. Segundo a IRENA, aproximadamente dois terços das emissões globais estão associadas ao setor energético, tornando a descarbonização da matriz energética um elemento central na transição energética (CASTRO et al., 2023).

Para conter o aquecimento global, foram implementadas diversas estratégias políticas, destacando-se o Acordo de Paris, que estabeleceu o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Neste contexto, cada nação estabeleceu metas específicas para redução de emissões, com revisões periódicas para intensificar os compromissos (Liobikienė; Butkus, 2017).

O Brasil assumiu o compromisso de reduzir suas emissões de GEE em 37% até 2025 e em 43% até 2030, considerando os níveis de 2005 como referência (Organização das Nações Unidas, 2005). A Lei nº 13.576/2017, que instituiu o RenovaBio como parte da Política Energética Nacional, representa um avanço significativo para o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris (FARES, 2019).

Durante a COP27, realizada em novembro de 2022, foram definidos cinco temas principais e 25 ações colaborativas para apresentação na COP28, incluindo o hidrogênio de baixo carbono como elemento acelerador da descarbonização necessária para atingir as metas do Acordo de Paris (Fundação Getúlio Vargas, 2023).

No contexto europeu, os países da União Europeia (UE-27) enfrentam desafios significativos relacionados à redução do consumo energético. As Metas 20/20/20 estabelecem objetivos de redução de emissões e consumo energético, além do aumento no uso de fontes renováveis e melhoria da eficiência energética. A

implementação de energias renováveis na UE tem apresentado crescimento expressivo, refletindo o compromisso com metas ambiciosas neste setor (LIOBIKIENĖ; BUTKUS, 2017).

Ademais, o conflito entre Rússia e Ucrânia tem motivado diversas nações a acelerar seus programas de transição energética, particularmente os investimentos em hidrogênio renovável. A União Europeia implementou o programa REPowerEU, visando reduzir rapidamente a dependência de combustíveis fósseis russos e acelerar a transição energética (MARTINS, 2023).

Entretanto, conforme Castro et al. (2023), a simples utilização de fontes renováveis como solar e eólica para geração energética não é suficiente, considerando fatores como intermitência e equilíbrio entre oferta e demanda. Neste cenário, o Hidrogênio Verde emerge como um vetor energético capaz de viabilizar a transição do modelo atual para uma matriz que explore plenamente o potencial das fontes renováveis.

Segundo Delgado e Costa (2021), o Brasil apresenta vantagens competitivas significativas para o desenvolvimento da indústria de Hidrogênio Verde.

Um potencial excepcional de fontes renováveis, como solar e eólica, superior a 1300 GW segundo dados da EPE. O sistema elétrico brasileiro possui capacidade instalada de 172 GW, sendo 20 GW de fonte eólica e 4,5 GW de energia solar, conforme o ONS. Estas condições proporcionam custos competitivos de energia elétrica, fator crucial considerando que este insumo representa cerca de 70% dos custos de produção do H2V via eletrólise.

Um modelo regulatório e econômico potencialmente favorável à expansão da geração elétrica através de leilões para novos investimentos no mercado cativo e crescimento dos contratos diretos no mercado livre. Isto é evidenciado pela presença de grandes grupos econômicos globais como Engie, EDP, Enel, State Grid e Iberdrola, além de empresas nacionais como Energisa, Equatorial, Cemig, Copel e Celesc, que podem contribuir para o desenvolvimento da cadeia de valor do H2V.

A infraestrutura portuária oceânica brasileira oferece vantagem logística significativa para exportação. O Observatório do Hidrogênio do Gesel, em publicação de janeiro de 2022 (CASTRO et al., 2022), reportou diversos Memorandos de Entendimento propondo investimentos substanciais, principalmente direcionados ao Porto de Pecém (CE), Polo Industrial de Camaçari (BA), Porto do Açu (RJ), Porto de Suape (PE) e Rio Grande do Norte.

Conforme destacado por Delgado e Costa (2021), em um cenário de transição energética e abundância de fontes renováveis, a implementação eficaz da

produção de Hidrogênio Verde no Brasil requer apoio adequado das instituições governamentais.

Contudo, diferentemente de outros países, o Brasil ainda não estabeleceu uma estratégia específica e abrangente para regulação, produção, consumo, transporte, armazenamento e exportação do hidrogênio, integrando-o adequadamente ao planejamento e à matriz energética nacional.

Portanto, evidencia-se a necessidade de esforços regulatórios e financeiros governamentais para impulsionar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio, tema de relevância fundamental no contexto da descarbonização da matriz energética brasileira.

1.5. Marco regulatório no Brasil

A construção do arcabouço regulatório para o hidrogênio no Brasil segue um processo meticuloso que envolve múltiplos atores e etapas sequenciais. Em diversos países, a responsabilidade pela elaboração de regulamentações é atribuída a órgãos governamentais específicos designados para setores econômicos particulares. No âmbito energético brasileiro, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) assume posição central na elaboração de normas regulatórias para o setor energético, incluindo tecnologias emergentes como o hidrogênio.

O ano de 2022 marcou avanços significativos na regulamentação do setor de hidrogênio no Brasil com dois marcos fundamentais. Primeiramente, a publicação do Decreto nº 11.075, de 19 de maio de 2022, que estabeleceu o mercado regulado de carbono, priorizando a exportação de créditos para nações e empresas que necessitam compensar emissões para atender seus compromissos de neutralidade carbônica. Adicionalmente, o Projeto de Lei nº 725/2022 incorporou o hidrogênio como recurso energético na matriz brasileira, estabelecendo metas progressivas para sua introdução na infraestrutura de gasodutos nacionais: 5% até 2032 e 10% até 2050, sendo que 60% desse volume deve ser proveniente de fontes sustentáveis como solar, eólica, biomassas, biogás e hidráulica até 2032, com incremento para 8% até 2050. Este PL visa modificar a Lei nº 9.478/1997 (Lei do Petróleo), colocando o hidrogênio sob regulação da ANP (OLIVEIRA, 2022).

Outro avanço legislativo importante foi o projeto de lei nº 1878/2022, que propõe a criação da política regulatória para produção e aplicações energéticas do Hidrogênio Verde. Conforme seu Artigo 1º, esta legislação estabelece diretrizes para

a normatização da produção e usos energéticos do Hidrogênio Verde, além de definir atribuições institucionais relacionadas a esta fonte no âmbito da Política Energética Nacional, visando fomentar o desenvolvimento deste vetor energético.

Mais recentemente, o Projeto de Lei 2308/23 propõe a inclusão do hidrogênio verde e do hidrogênio combustível na Política Energética Nacional, tornando-os componentes oficiais da matriz energética brasileira, o que viabiliza o desenvolvimento de um mercado e de um sistema regulatório específico.

A estruturação regulatória brasileira para o hidrogênio verde em 2022 desempenhou papel fundamental no panorama energético nacional, fornecendo orientações claras e estabelecendo um quadro normativo para o desenvolvimento desta fonte energética sustentável (OLIVEIRA, 2022). A ANP tem exercido função essencial na elaboração de normativas para os processos de produção, transporte, armazenamento e distribuição de hidrogênio verde, proporcionando uma base regulatória consistente que oferece segurança jurídica para investidores e organizações interessadas no setor (RANGEL; SILVA; PAIVA, 2008; MORAES, 2022).

De acordo com a regulamentação brasileira de 2022, reconheceu-se a relevância estratégica do hidrogênio verde no contexto da transição energética. A implementação de incentivos fiscais e financeiros específicos para iniciativas relacionadas ao hidrogênio verde exemplifica esta abordagem. Tais incentivos apresentam potencial significativo para estimular investimentos no setor, aumentando sua atratividade para empresas e financiadores, assim acelerando o desenvolvimento tecnológico e a infraestrutura necessária (OLIVEIRA, 2022).

Adicionalmente, a regulamentação brasileira tem demonstrado atenção às exigências de padrões rigorosos de segurança, considerando a natureza inflamável do hidrogênio. O estabelecimento de normas de segurança precisas e harmonizadas internacionalmente é fundamental para minimizar riscos e assegurar a aceitação pública desta tecnologia emergente.

A priorização das melhores práticas de segurança contribui para a consolidação de uma percepção confiável e segura do hidrogênio verde como componente integral da matriz energética brasileira (RANGEL; SILVA; PAIVA, 2008; MORAES, 2022).

1.6. Iniciativas de produção de hidrogênio verde no Brasil e no cenário global

No contexto nacional brasileiro, as iniciativas voltadas ao hidrogênio verde emergem como uma resposta estratégica às crescentes demandas por alternativas energéticas sustentáveis, contribuindo significativamente para a evolução da matriz energética nacional em direção a fontes mais limpas (BARROSO; ROCHA; MEIRELES FILHO, 2022).

No âmbito das cidades que adotam tecnologias avançadas de hidrogênio, diversos projetos estão sendo desenvolvidos visando incorporar esta inovadora fonte energética aos sistemas urbanos. Estas ações não se limitam apenas ao fornecimento de energia limpa, mas também exploram aplicações diversificadas do hidrogênio em setores como transporte, geração elétrica e sistemas de aquecimento residencial. O avanço destas iniciativas é facilitado pela colaboração entre entidades governamentais, empresas do setor energético e instituições de pesquisa, que juntas buscam desenvolver soluções customizadas para atender às necessidades específicas dos ambientes urbanos (DE LARA; RICHTER, 2023).

A diversidade geográfica e climática brasileira proporciona oportunidades singulares para a exploração do potencial do hidrogênio verde em diferentes regiões do país. Os projetos nacionais procuram aproveitar estas características particulares, adaptando as tecnologias de produção às condições locais. Esta abordagem não apenas promove autonomia energética, mas também estimula o desenvolvimento regional, gerando novas oportunidades econômicas e de emprego nas áreas onde os projetos são implementados (DE LARA; RICHTER, 2023).

A implementação de centros urbanos com infraestrutura avançada para hidrogênio vai além da simples produção, abrangendo também a estrutura necessária para transporte, armazenamento e distribuição deste recurso energético. A criação de uma rede integrada é essencial para garantir a viabilidade e eficiência destas iniciativas, envolvendo parcerias público-privadas para investimentos em infraestrutura de ponta.

Os projetos nacionais de hidrogênio verde também buscam integrar as cidades tecnologicamente avançadas dentro de uma visão mais ampla de sustentabilidade. Isto inclui o incentivo a práticas urbanas inteligentes, eficientes e de baixa emissão carbônica. A adoção de tecnologias baseadas em hidrogênio verde pode atuar como catalisador para o desenvolvimento de soluções inovadoras e a formação de ecossistemas urbanos mais resilientes e sustentáveis (BARROSO; ROCHA; MEIRELES FILHO, 2022).

A conscientização e educação pública exercem função crucial neste panorama. Os projetos nacionais buscam não apenas implementar as tecnologias,

mas também comunicar efetivamente os benefícios e oportunidades associados a estas iniciativas. Esta abordagem cria um ambiente favorável à aceitação e participação ativa da sociedade, fomentando uma cultura de sustentabilidade e inovação (DE LARA; RICHTER, 2023).

A cooperação internacional representa outro aspecto fundamental destes projetos, uma vez que o intercâmbio de conhecimentos e melhores práticas contribui para acelerar o desenvolvimento de cidades avançadas em hidrogênio. As parcerias entre governos, empresas e instituições de pesquisa de diferentes nações fortalecem a capacidade inovadora e promovem uma abordagem global para os desafios energéticos e ambientais contemporâneos (DE LARA; RICHTER, 2023).

Em diversas metrópoles mundiais, a implementação de projetos relacionados ao hidrogênio verde tem se tornado prioritária, sinalizando uma transição significativa rumo a fontes energéticas mais sustentáveis. Copenhague, na Dinamarca, destaca-se como pioneira nesta tendência, investindo em transporte público movido a hidrogênio e integrando esta tecnologia em sua matriz energética. Similarmente, Aberdeen, no Reino Unido, concentra esforços na redução de emissões no setor de transportes, implementando veículos movidos a hidrogênio como parte de sua estratégia de sustentabilidade urbana (BARROSO; ROCHA; MEIRELES FILHO, 2022).

Amsterdã, nos Países Baixos, também se destaca pela inovação na aplicação do hidrogênio verde em sua frota de transporte público e veículos de carga, alinhando-se aos seus contínuos esforços para adoção de tecnologias sustentáveis. Em Tóquio, uma das maiores concentrações urbanas do mundo, a ênfase recai na transição para uma economia baseada em hidrogênio, visando a redução de emissões e promoção de fontes energéticas mais limpas.

Berlim se posiciona como um centro de inovação em projetos de hidrogênio verde, com investimentos em infraestrutura de transporte e produção energética limpa. Nos Estados Unidos, Los Angeles demonstra comprometimento com a descarbonização de sua infraestrutura, explorando a aplicação do hidrogênio verde em diversos setores, do transporte público à indústria.

Estas cidades representam apenas alguns exemplos iniciais, sendo importante reconhecer que a transição para o hidrogênio verde está em contínua evolução. Inúmeras outras localidades globais estão implementando projetos inovadores, evidenciando a crescente relevância do hidrogênio verde como elemento essencial na busca por soluções energéticas mais sustentáveis e eficientes. O compromisso global destas cidades reflete um entendimento comum

sobre a necessidade de ação imediata frente aos desafios ambientais e climáticos atuais.

A projeção de crescimento da demanda por hidrogênio na América Latina até 2030 é expressiva, sendo o desenvolvimento econômico o principal impulsionador deste aumento, enquanto as políticas ambientais desempenham papel mais limitado na promoção de novas aplicações (IEA, 2022).

2. A CONSTITUIÇÃO ECONÔMICA E O PRINCÍPIO DA SUSTENTABILIDADE

Este capítulo analisa a relação entre a teoria da Constituição Econômica e a proteção ambiental. Partindo da contextualização econômica na Constituição Federal, examina-se como a economia e o meio ambiente se conectam no ordenamento jurídico, sendo que essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de uma análise crítica sobre o papel do hidrogênio verde na realização dos preceitos constitucionais.

Nessa senda, os princípios econômicos e ambientais constitucionais demonstram uma evolução jurídica que reconhece a interdependência entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Essa visão, indubitavelmente, supera a tradicional oposição entre crescimento econômico e conservação ambiental, propondo um modelo de desenvolvimento que harmoniza ambos os objetivos aparentemente opostos.

2.1. Considerações sobre a teoria da Constituição Econômica

A incorporação de princípios e normas econômicas nas constituições representa um fenômeno histórico relativamente novo. As primeiras constituições, sob influência do liberalismo clássico, concentravam-se primordialmente na estruturação estatal e na salvaguarda de direitos individuais, delegando a regulação econômica à legislação ordinária e aos mecanismos de mercado.

Uma transformação significativa nessa perspectiva ocorreu durante o século XX. A Constituição Mexicana de 1917 e a Constituição de Weimar de 1919 emergiram como referências inaugurais do constitucionalismo econômico, ao introduzirem dispositivos que abordavam diretamente questões econômicas e sociais (BERCOVICI, 2022).

A respeito da teoria da Constituição Econômica, Gilberto Bercovici destaca que (BERCOVICI, 2022, p. 47):

A Constituição Econômica, para Irti, é a Constituição política estatal aplicada às relações econômicas. Nesta mesma linha, podemos adotar algumas das premissas expostas por Washington Peluso Albino de Souza, principalmente a de entender, assim como Irti e vários outros, a Constituição Econômica como parte integrante, não autônoma ou estanque, da Constituição total. Na sua visão, as Constituições Econômicas caracterizar-se-iam pela presença do econômico no texto constitucional, integrado na ideologia constitucional. E seria a partir desta presença do econômico no texto constitucional e da ideologia constitucionalmente adotada que se elaboraria a política econômica do Estado.

Na acepção de Eros Roberto Grau, a Constituição Econômica configura um sistema econômico compreendido por um conjunto coerente de instituições jurídicas e sociais (GRAU, EROS ROBERTO, 2002, p.70/72), *in verbis*:

A ideia de Constituição Econômica ganhou corpo na doutrina alemã, neste século, a partir da consideração do quanto dispôs a Constituição de Weimar a respeito da vida econômica. A doutrina portuguesa, de outra parte, tal qual, antes dela, a italiana, à ideia tem detido cuidadosa atenção. Inicialmente concebida em termos amplos, como conjunto de normas voltadas à organização econômica, o preenchimento, hoje, de vastas zonas do texto constitucional por normas de caráter socioeconômico – e de cunho diretivo – importa em que, como anota José Simões Patrício, essa noção seja tida por ultrapassada. Conceitua-se-a, então, como “o conjunto de preceitos e instituições jurídicas que, garantindo os elementos definidores de um determinado sistema econômico, instituem uma determinada forma de organização e funcionamento da economia e constituem, por isso mesmo, uma determinada ordem econômica” (Vital Moreira); ou, definida a partir de sua função, como “formada pelo *ordenamento essencial da actividade económica* – contendo os princípios e as normas essenciais ordenadoras da economia, dos quais decorrem sistematicamente as restantes normas da ordem jurídica da economia” (Antonio L. Sousa Franco).

(...)

Compreendendo, a Constituição Econômica, conjunto de preceitos que institui determinada ordem econômica (mundo do ser) ou conjunto de princípios e regras essenciais ordenadoras da economia, é de se esperar que, como tal, opere a consagração de um determinado sistema econômico.

A constitucionalização da ordem econômica, no contexto brasileiro, consolidou-se a partir da Constituição de 1934, que inovou ao dedicar um capítulo

específico à Ordem Econômica e Social. Subsequentemente, todas as constituições nacionais mantiveram dispositivos relacionados à ordem econômica, espelhando as concepções político-econômicas predominantes em cada período histórico.

A Constituição Federal de 1988 simboliza o ponto culminante desse processo de constitucionalização econômica no Brasil. Seu Título VII, "Da Ordem Econômica e Financeira", estabelece os princípios fundamentais da atividade econômica, as bases da ordem econômica brasileira e diretrizes para políticas específicas. Nesse contexto, merece destaque o art. 170, VI, que estabelece a defesa do meio ambiente como princípio estruturante da ordem econômica nacional.

Conforme consignado por André Ramos Tavares e Marina Faraco, em sua obra "O STF e a Constituição Econômica" (TAVARES; FARACO, 2022, p. 12 e 95/96):

O art. 170 da Constituição brasileira (CB) indica, ainda, os fundamentos, os objetivos e os princípios que norteiam a Constituição Econômica de 1988. Trata-se de um conjunto normativo que demanda a adoção de planejamento, políticas econômicas e políticas públicas para a consecução dos valores ali consagrados, configurando uma Constituição dirigente (Canotilho, 2003, p. 183) e, mais do que isso, um modelo para o desenvolvimento do país.

(...)

A Constituição do Brasil de 1988 inovou ao incluir, entre os princípios norteadores da Ordem Econômica, a tutela de direitos metaindividuais, ou de terceira dimensão, como valores aptos a legitimar a conformação do exercício de atividades econômicas privadas pelo Estado. Previu-se, assim, a proteção do consumidor, examinada no tópico precedente, e do meio ambiente, que não constavam dos textos constitucionais anteriores.

Aliás, essa foi a primeira Carta na experiência constitucional brasileira a conferir especial proteção ao meio ambiente, não apenas relativamente à Ordem Econômica (art. 170, VI), mas também de forma específica. Dedicou-lhe, assim, capítulo próprio (Capítulo VI do Título VIII), atribuindo sua defesa ao Poder Público, à coletividade (art. 225, *caput*) e ao Ministério Público (art. 129, III), além da possibilidade de sua tutela também por meio da ação popular, titularizada pelo cidadão (art. 5º, LXXIII).

A incorporação da proteção ambiental como princípio norteador da ordem econômica demonstra uma visão contemporânea sobre a inter-relação indissociável entre as atividades econômicas e o meio ambiente. Essa previsão constitucional institui uma diretriz imperativa para que o crescimento econômico se desenvolva

com responsabilidade ambiental, fundamentando assim as bases jurídicas para um modelo econômico ecologicamente orientado no cenário brasileiro, que poderia ser caracterizado como uma economia de mercado ambientalmente sustentável.

Na perspectiva de André Ramos Tavares, em sua análise sobre o tema, a elevação da ordem econômica ao patamar constitucional transcende a simples enunciação de princípios abstratos, configurando-se como um complexo normativo plenamente eficaz e de aplicação imediata na realidade jurídica brasileira. Essa interpretação reforça o caráter vinculante e operativo das disposições constitucionais relacionadas à economia (TAVARES, 2011, p. 77; 81), *ipsis litteris*:

Pode-se considerar a Constituição econômica formal como a parcela da Constituição que abriga e interpreta o sistema econômico (material), ou seja, que confere forma ao sistema econômico (no caso brasileiro, em sua essência, capitalista). A Constituição econômica formal brasileira consubstancia-se na parte da Constituição Federal que contém os direitos que legitimam a atuação dos sujeitos econômicos, o conteúdo e limites desses direitos e a responsabilidade que são inerentes ao exercício da atividade econômica no país. Consoante Manoel Gonçalves Ferreira Filho (1990: 8), o Direito constitucional econômico "há de voltar-se para o controle do poder econômico. Ou seja, do poder que decorre da riqueza, seja esta privada, seja pública".

(...)

Além da positivação constitucional do Direito econômico, acima descrita como a incorporação, pelas constituições, de normas de Direito econômico, existe outro fenômeno, conceitualmente diverso, denominado "constitucionalização do Direito" econômico.

A constitucionalização do Direito consiste na imposição de que os diversos operadores do Direito, incluindo os juízes, promovam uma aplicação das leis e demais atos normativos secundários, a partir de uma leitura constitucionalmente atenta, quer dizer, por meio de uma interpretação sempre e constantemente imbuída das normas constitucionais.

Nesse mote, a trajetória histórica de incorporação da ordem econômica no texto constitucional, que alcançou seu ápice com a inserção da tutela ambiental como princípio econômico fundamental na Carta Magna de 1988 (BRASIL, 1988), estabelece a base jurídica essencial para examinar o papel da energia do hidrogênio verde no sistema jurídico brasileiro. O desenvolvimento do tratamento constitucional das questões econômicas - desde sua ausência nas constituições iniciais até sua configuração contemporânea que explicitamente integra a proteção do meio

ambiente - evidencia uma consciência crescente sobre a importância de conciliar crescimento econômico e conservação ambiental. O quadro normativo constitucional não somente viabiliza, mas efetivamente exige a adoção de paradigmas econômicos mais sustentáveis, incluindo as técnicas para a obtenção do hidrogênio, por meio de fontes energéticas renováveis, objeto central desta investigação acadêmica.

2.2. Sustentabilidade – aspectos conceituais

A sustentabilidade surge como elemento fundamental na relação entre economia e meio ambiente, representando uma transformação na concepção do desenvolvimento que procura harmonizar as necessidades econômicas com os limites ecológicos planetários.

Apesar de suas raízes em discussões anteriores, o conceito adquiriu notoriedade mundial com a publicação do Relatório Brundtland em 1987, "Nosso Futuro Comum", que caracterizou o desenvolvimento sustentável como aquele que atende às necessidades atuais sem prejudicar a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades.

Essa conceitualização, aparentemente direta, contém significativa complexidade, sugerindo uma perspectiva de longo prazo e uma abordagem holística que contempla dimensões econômicas, sociais e ambientais do desenvolvimento.

Na estrutura constitucional brasileira, a sustentabilidade pode ser interpretada como um propósito subjacente da ordem econômica, resultante da articulação entre princípios como livre iniciativa, função social da propriedade e proteção ambiental.

Na análise do tema, extraída da obra "Sustentabilidade: Direito ao Futuro", Juarez Freitas oferece uma definição jurídica mais ampla de sustentabilidade (FREITAS, 2019, p. 133/134), *ipsis litteris*:

Trata-se do princípio constitucional que determina, com eficácia direta e imediata, a responsabilidade do Estado e da sociedade pela concretização solidária do desenvolvimento material e imaterial, socialmente inclusivo, durável e equânime, ambientalmente limpo, inovador, ético e eficiente, no intuito de assegurar, preferencialmente de modo preventivo e precavido, no presente e no futuro, o direito ao bem-estar.

A formulação evidencia a natureza multidimensional do conceito, que transcende o aspecto ambiental para incorporar dimensões econômicas, sociais e

éticas, alinhando-se com a própria arquitetura da Constituição de 1988, que integra direitos sociais, econômicos e ambientais em um sistema coerente de princípios e garantias fundamentais.

A aplicação prática do conceito de sustentabilidade no sistema jurídico brasileiro tem se manifestado através de diversos mecanismos legais e iniciativas governamentais.

A Lei nº 12.187 (BRASIL, 2009), que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima, exemplifica essa tendência ao estabelecer compromissos voluntários nacionais para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), demonstrando a incorporação de preocupações ambientais globais na política econômica do país.

Merece menção também o Código Florestal, Lei nº 12.651 (BRASIL, 2012), que busca equilibrar a conservação florestal com atividades agrícolas, visando compatibilizar interesses econômicos e ambientais no uso territorial.

Adicionalmente, a Lei da Biodiversidade, Lei nº 13.123 (BRASIL, 2015), surgida no contexto do avanço tecnológico, regulamenta o acesso ao patrimônio genético e conhecimentos tradicionais associados, traduzindo uma abordagem que reconhece tanto o valor econômico quanto cultural da biodiversidade.

A Assembleia Geral das Nações Unidas estabeleceu um programa de ação global denominado Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), composto por 17 metas⁴ abrangentes que articulam harmonicamente dimensões econômicas, ambientais e sociais do desenvolvimento humano. Esse conjunto de diretrizes estratégicas foi progressivamente integrado ao arcabouço institucional brasileiro através de políticas públicas diversas, refletindo o compromisso nacional com os esforços internacionais para concretização prática do paradigma de desenvolvimento sustentável.

Nessa ótica, a trajetória histórica evidencia progressivamente a essencialidade da atuação estatal como instrumento para materializar o ideal do desenvolvimento sustentável, assegurando não apenas a continuidade da espécie humana, mas a preservação integral da biodiversidade planetária. Essa percepção crescente ressalta o papel fundamental das instituições públicas na mediação entre progresso econômico e conservação dos sistemas ecológicos que sustentam todas as formas de vida na biosfera terrestre.

⁴ Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 12 mai. 2025.

2.3. A relação entre o meio ambiente e o desenvolvimento econômico sustentável

A interdependência entre ambiente natural e atividade econômica apresenta-se como profundamente intrincada e polivalente. Enquanto as operações econômicas dependem essencialmente dos ativos naturais e das funções ecossistêmicas disponibilizadas pelo meio ambiente, simultaneamente, a expansão econômica desenfreada pode ocasionar deterioração ambiental, comprometendo os próprios alicerces que sustentam o sistema econômico.

Em seu renomado estudo sobre alterações climáticas, desenvolvido durante o biênio 2005-2006, o economista Nicholas Stern (RELATÓRIO STERN, 2006) sustentou que tais modificações climáticas constituem "a mais ampla e significativa imperfeição de mercado já identificada". Esta constatação evidencia de maneira enfática como a desconsideração dos aspectos ambientais pode resultar, e efetivamente já resulta, em repercussões econômicas devastadoras.

No âmbito brasileiro, a interligação entre aspectos econômicos e ambientais manifesta-se por diversos mecanismos no sistema jurídico e nas práticas econômicas vigentes.

Diversos instrumentos exemplificam esta relação, incluindo o processo de licenciamento ambiental, o ICMS ecológico, a remuneração por serviços ambientais (PSA – Lei nº 14.119/2021) e as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).

A obrigatoriedade de elaboração de estudos de impacto ambiental para empreendimentos de grande porte, conforme estabelecido no artigo 225, §1º, IV da Constituição Federal (BRASIL, 1988), viabiliza a incorporação de considerações ambientais e econômicas no planejamento e concepção de projetos.

Adotado por diversos estados do território brasileiro, o ICMS Ecológico configura-se como um dispositivo que incorpora parâmetros ambientais na distribuição do percentual tributário destinado às municipalidades, estabelecendo um estímulo econômico à conservação ambiental (INSTITUTO ÁGUA E TERRA, 2025; FERNANDES ET AL., 2024).

Normatizado pela Lei nº 14.119/2021 (BRASIL, 2021), o PSA constitui um mecanismo econômico que objetiva compensar proprietários de áreas rurais pela preservação de ecossistemas provedores de serviços ambientais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), incorpora aspectos ambientais e econômicos na administração de

resíduos, incentivando práticas de reciclagem e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo vital dos produtos.

A jurisprudência consolidada pelos tribunais de instância superior tem consistentemente evidenciado e fortalecido o vínculo existente entre as esferas econômica e ambiental. Um caso particularmente ilustrativo desta tendência pode ser observado na apreciação dos ED na ADI 4903, pelo Supremo Tribunal Federal, de relatoria do Ministro Luiz Fux, de cuja ementa se colhe o excerto:

Por sua vez, a Conferência Eco-92, no Rio de Janeiro, introduziu o princípio do desenvolvimento sustentável, consubstanciado na necessária composição entre o crescimento socioeconômico e o uso adequado e razoável dos recursos naturais. Essa nova perspectiva demandou aos Estados a construção de políticas públicas mais elaboradas, atentas à gestão eficiente das matérias primas, ao diagnóstico e ao controle das externalidades ambientais, bem como ao cálculo de níveis ótimos de poluição. Todos esses instrumentos atendem a perspectiva intergeracional, na medida em que o desenvolvimento sustentável estabelece uma ponte entre os impactos provocados pelas gerações presentes e o modo como os recursos naturais estarão disponíveis para as gerações futuras.

(...)

O desenho institucional das políticas públicas ambientais suscita o duelo valorativo entre a tutela ambiental e a tutela do desenvolvimento, tendo como centro de gravidade o bem comum da pessoa humana no cenário de escassez. É dizer, o desenvolvimento econômico e a preservação do meio ambiente não são políticas intrinsecamente antagônicas.

A análise de compatibilidade entre natureza e obra humana é ínsita à ideia de desenvolvimento sustentável, expressão popularizada pelo relatório Brundtland, elaborado em 1987 pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento. A mesma organização eficiente dos recursos disponíveis que conduz ao progresso econômico, por meio da aplicação do capital acumulado no modo mais produtivo possível, é também aquela capaz de garantir o racional manejo das riquezas ambientais em face do crescimento populacional. Por conseguinte, a proteção ao meio ambiente, no contexto de um desenvolvimento sustentável, não equivale a uma visão estática dos bens naturais, que pugna pela proibição de toda e qualquer mudança ou interferência em processos ecológicos ou correlatos. A história humana e natural é feita de mudanças e adaptações, não de condições estáticas ou de equilíbrio.

A preservação dos recursos naturais para as gerações futuras não pode significar a ausência completa de impacto do homem na natureza, consideradas as carências materiais da geração atual e também a necessidade de gerar desenvolvimento econômico suficiente para assegurar uma travessia confortável

para os nossos descendentes. Meio ambiente e Desenvolvimento Econômico encerram conflito aparente normativo entre diversas nuances, em especial a justiça intergeracional, demandando escolhas trágicas a serem realizadas pelas instâncias democráticas, e não pela convicção de juízes, por mais bem-intencionados que sejam. (REVESZ, Richard L.; STAVINS, Robert N. Environmental Law. In: Handbook of Law and Economics. A. Mitchell Polinsky; Steven Shavell (ed.). V. 1. Boston: Elsevier, 2007. p. 507)

O segmento analisado demonstra como o princípio constitucional de proteção ambiental tem sido interpretado não apenas como uma restrição à atividade econômica, mas também como uma orientação para um paradigma de desenvolvimento mais sustentável.

A assimilação desta conexão fundamental entre economia e meio ambiente revela-se essencial para a investigação do potencial da economia circular como instrumento de materialização dos princípios constitucionais de proteção ambiental no contexto econômico brasileiro.

2.4. A defesa do meio ambiente como princípio conformador da ordem econômica

A Constituição Federal de 1988 inovou ao incorporar, de forma expressa, a proteção ambiental como elemento estruturante da ordem econômica nacional. Essa incorporação não representou mera inclusão formal, mas uma verdadeira reconfiguração paradigmática da própria concepção de desenvolvimento econômico no ordenamento jurídico brasileiro. Nesse sentido, a Constituição de 1988 demarcou uma nova era na proteção ambiental brasileira, elevando o meio ambiente à categoria de bem jurídico constitucionalmente tutelado e articulando-o com os demais princípios que regem a atividade econômica (BARROSO, 2018, p. 243).

A inserção do princípio da defesa do meio ambiente no rol do art. 170 representa o reconhecimento, pelo constituinte originário, da necessária correlação entre a dimensão econômica e a ambiental no projeto de desenvolvimento nacional. Não se trata, portanto, de mera disposição programática, mas de verdadeiro parâmetro conformador da atividade econômica. A defesa do meio ambiente conforma a ordem econômica, informando substancialmente os princípios da garantia do desenvolvimento. Essa concepção evidencia a superação da dicotomia entre desenvolvimento econômico e proteção ambiental, estabelecendo uma relação de complementaridade necessária entre ambos (GRAU, 2017, p. 250).

A literatura jurídica contemporânea tem ressaltado que a inclusão da defesa ambiental no capítulo da ordem econômica demonstra a opção constitucional por um modelo de desenvolvimento que não se restringe ao crescimento econômico quantitativo, mas incorpora dimensões qualitativas essenciais à dignidade humana. Nessa perspectiva, a Constituição assumiu o conceito de desenvolvimento sustentável sem expressamente enunciá-lo, evidenciando que a conciliação dos valores aparentemente antagônicos – desenvolvimento econômico e preservação do meio ambiente – constitui um dos objetivos da ordem constitucional brasileira (SILVA, (2020, p. 848).

A força normativa desse princípio ambiental inserido na ordem econômica não pode ser minimizada. Os princípios constitucionais da ordem econômica não são meras recomendações ou diretrizes políticas, mas normas jurídicas dotadas de imperatividade, o que implica reconhecer que a defesa do meio ambiente consubstancia verdadeiro limite material à atividade econômica (MENDES, 2022, p. 1547).

Sob a ótica da hermenêutica constitucional, o art. 170, VI, CF/1988, deve ser interpretado sistematicamente com o art. 225, consolidando o que se denomina de “bloco de constitucionalidade ambiental”. A leitura integrativa revela que o legislador constituinte atribuiu ao meio ambiente uma dupla funcionalidade, tanto como direito fundamental quanto como elemento condicionante da ordem econômica. Nesse toar, a inclusão do meio ambiente como princípio da atividade econômica dá ao meio ambiente um extraordinário peso nas decisões dos agentes econômicos e faz com que o direito ambiental não seja separado do direito econômico (MACHADO, 2019, p. 178).

A parte final do inciso VI do art. 170, que prevê “tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços e de seus processos de elaboração e prestação”, autoriza a implementação de políticas públicas que estimulem economicamente as atividades menos impactantes.

No plano infraconstitucional, a efetivação desse princípio conformador tem ocorrido mediante diversos instrumentos jurídicos que concretizam a diretriz constitucional de tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental.

A doutrina especializada tem destacado, ainda, que a inserção da defesa ambiental no capítulo da ordem econômica representa uma manifestação do chamado “constitucionalismo ecológico”, fenômeno que se caracteriza pela incorporação de valores ambientais na estrutura fundamental da ordem jurídica (CANOTILHO, 2010, p. 8). Nesse sentido, o constituinte brasileiro adotou um

capitalismo ambientalmente qualificado, no qual o desenvolvimento econômico deve necessariamente estar em sintonia com a preservação ambiental (FIORILLO, 2020, p. 72).

Cumprе ressaltar que a efetividade desse princípio conformador depende tanto da atuação estatal quanto da participação dos agentes econômicos privados. A proteção ambiental na ordem econômica constitucional impõe tanto limites negativos (obrigações de não fazer) quanto positivos (obrigações de fazer) aos atores públicos e privados (AYALA, 2018, p. 219). Essa corresponsabilidade entre Estado e particulares decorre da própria estrutura normativa da Constituição (art. 225), que atribui ao Poder Público e à coletividade o dever de defender e preservar o meio ambiente.

Merece destaque a dimensão intergeracional implícita na configuração da defesa ambiental como princípio da ordem econômica. Ao vincular a atividade econômica à proteção ambiental, o constituinte incorporou a preocupação com as gerações futuras na própria estrutura do sistema econômico, alinhando-se ao conceito de desenvolvimento sustentável consagrado internacionalmente a partir do Relatório Brundtland. Essa perspectiva temporal estendida confere ao princípio em análise um papel fundamental na concretização do projeto constitucional de sociedade.

A análise desenvolvida revela, portanto, que a defesa do meio ambiente como princípio conformador da ordem econômica transcende a mera limitação pontual à atividade produtiva, configurando verdadeiro parâmetro de legitimação do próprio sistema econômico. Trata-se de um dos fundamentos materiais da Constituição Econômica, sem o qual não se pode conceber a legitimidade da própria ordem capitalista no Brasil contemporâneo (BERCOVICI, 2018, p. 318).

2.5. Distinção entre regras e princípios e a aplicação do princípio da ponderação na Teoria dos Direitos Fundamentais

A configuração das normas jurídicas constitui elemento fundamental para a compreensão da dogmática dos direitos fundamentais, especialmente quando se considera a necessidade de métodos hermenêuticos adequados para a resolução de conflitos normativos complexos. Robert Alexy desenvolveu uma teoria inovadora que supera as limitações do positivismo tradicional ao estabelecer uma distinção qualitativa entre regras e princípios, propondo simultaneamente um modelo racional para a aplicação do princípio da ponderação. Essa abordagem representa um

avanço metodológico na ciência do direito, influenciando tanto a interpretação quanto a aplicação das normas constitucionais.

A teoria alexyana fundamenta-se no reconhecimento de que tanto regras quanto princípios constituem espécies do gênero normas jurídicas, uma vez que ambos se situam no plano deontológico e podem expressar mandamentos, permissões ou proibições. Contudo, a diferenciação entre essas categorias normativas se estabelece por critérios de distinção estrutural qualitativa que determina seus respectivos modos de aplicação. As regras são normas que só podem ser cumpridas ou não. Se uma regra é válida, então há de fazer exatamente o que ela exige, sem mais nem menos. Por isso, as regras contêm determinações (definitivas) no âmbito do fático e juridicamente possível (AMORIM, 2005, p. 126).

Por outro lado, os princípios são normas que ordenam que algo seja realizado na maior medida possível, dentro das possibilidades jurídicas e reais existentes. Por isso, os princípios são mandados de otimização, que estão caracterizados pelo fato de que podem ser cumpridos em diferentes graus e que a medida devida de seu cumprimento não só depende das possibilidades reais como também das jurídicas. Essa caracterização dos princípios como mandamentos de otimização constitui a inovação conceitual mais significativa da teoria alexyana, diferenciando-a das proposições de Ronald Dworkin e estabelecendo um fundamento teórico sólido para a aplicação da técnica da ponderação.

A distinção estrutural entre regras e princípios manifesta-se de forma mais evidente na análise dos mecanismos de resolução de conflitos normativos. O conflito de regras se opera no nível da validade jurídica, que não comporta graus; uma norma vale ou não vale juridicamente. Quando uma regra vale e é aplicável a um caso, significa que vale também sua consequência jurídica. Desta forma, conflitos entre regras são solucionados mediante a declaração de invalidade de pelo menos uma das normas em conflito ou através da introdução de cláusulas de exceção que eliminem a antinomia normativa.

Diversamente, as colisões de princípios devem ser solucionadas de maneira totalmente distinta. Quando dois princípios estão em colisão, um dos dois princípios tem que ceder ante o outro. Mas isso não significa declarar inválido o princípio desprezado nem que deva ser introduzida uma cláusula de exceção (AMORIM, 2005, p. 127). A resolução destas colisões opera-se mediante a determinação de relações de precedência condicionada, estabelecidas através das circunstâncias fáticas e jurídicas do caso concreto.

O princípio da ponderação surge, nesse contexto, como instrumento metodológico fundamental para a concretização dos direitos fundamentais estruturados como princípios. A técnica do balanceamento, do sopesamento ou da ponderação foi desenvolvida pelo Tribunal Constitucional Alemão, tendo sido utilizada pela primeira vez, em 1958, para resolver um conflito entre direitos fundamentais (CARDOSO, 2016, p. 145). Essa técnica estabelece que não existe hierarquia abstrata entre princípios de mesma categoria, devendo a precedência ser determinada mediante análise das condições específicas de cada caso.

A aplicação do princípio da ponderação encontra sua estruturação através da máxima da proporcionalidade, que se subdivide em três submáximas parciais: adequação, necessidade (mandamento do meio menos gravoso) e proporcionalidade em sentido estrito (mandamento do sopesamento propriamente dito).

A submáxima da adequação verifica se o meio escolhido é abstratamente apto para promover o fim almejado, constituindo um exame absoluto da relação meio-fim. A necessidade, por sua vez, realiza um juízo comparativo para determinar se não existe outro meio menos restritivo que possa alcançar o mesmo objetivo com menor intensidade de intervenção no direito fundamental afetado. Finalmente, o subprincípio da proporcionalidade em sentido estrito ou mandamento de ponderação é um exame que deve levar em conta a intensidade da restrição do direito atingido e a importância da realização do direito fundamental colidente (CARDOSO, 2016, p. 149).

A lei da ponderação estabelece que quanto maior seja o grau de prejuízo do princípio que há de retroceder, maior há de ser a importância do cumprimento do princípio que prevalece. Essa formulação expressa a racionalidade intrínseca ao processo ponderativo, evitando o decisionismo judicial e proporcionando critérios objetivos para a fundamentação das decisões jurídicas.

O resultado da ponderação não se limita à mera prevalência de um princípio sobre outro, mas gera uma regra específica que expressa a consequência jurídica do princípio precedente nas condições estabelecidas pelo caso concreto. A lei de ponderação pode assim ser resumida: as condições segundo as quais um princípio precede a outro constituem o suposto de fato de uma regra que expressa a consequência jurídica do princípio precedente (AMORIM, 2005, p. 127-128). Essa lei de colisão demonstra que a ponderação não constitui processo arbitrário, mas método racionalmente estruturado que contribui para a estabilidade e previsibilidade do sistema jurídico.

A importância da teoria alexyana transcende os aspectos meramente dogmáticos, constituindo fundamento teórico para o fortalecimento da argumentação jurídica e da racionalidade das decisões judiciais. A teoria de Alexy contribui ao cumprimento da tarefa de dar respostas racionalmente fundamentadas às questões vinculadas aos Direitos Fundamentais, com isso, busca a reabilitação da axiologia prática ao sistema jurídico, tornando a teoria dos princípios uma axiologia isenta de suposições insustentáveis (AMORIM, 2005, p. 124).

A teoria alexyana representa, portanto, síntese equilibrada entre vinculação normativa e flexibilidade interpretativa, proporcionando instrumentos metodológicos para a concretização adequada dos direitos fundamentais. A distinção qualitativa entre regras e princípios, aliada à estruturação racional do princípio da ponderação, constitui contribuição fundamental para o desenvolvimento de uma dogmática dos direitos fundamentais.

Com base nessa teoria, havendo interpretação no sentido de que a relação entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, no contexto da sustentabilidade, possa constituir exemplo paradigmático de colisão entre princípios constitucionais, a aplicação da técnica da ponderação se mostra necessária. Isso porque, para aqueles que defendem a hipótese de colisão entre o princípio do desenvolvimento econômico e o princípio da proteção ambiental, evidentemente, a ponderação orienta que não se estabelece hierarquia abstrata entre os postulados, uma vez que ambos possuem fundamentação constitucional e relevância social equivalente, exigindo que sua harmonização ocorra mediante análise das circunstâncias concretas de cada caso. A sustentabilidade ambiental emerge, portanto, como resultado do processo ponderativo que busca otimizar simultaneamente os dois princípios em tensão, reconhecendo que nem o desenvolvimento econômico pode ser absoluto a ponto de inviabilizar a proteção ambiental, nem a preservação pode ser tão restritiva que impeça totalmente o progresso socioeconômico.

Nessa senda, a aplicação da máxima da proporcionalidade exige que medidas restritivas ao desenvolvimento econômico em favor da proteção ambiental sejam adequadas (aptas a promover a preservação), necessárias (constituindo o meio menos gravoso disponível) e proporcionais em sentido estrito (justificando-se pelo peso da proteção ambiental face à intensidade da restrição econômica imposta), o que significa que restrições significativas ao desenvolvimento econômico só se justificam quando os benefícios ambientais sejam proporcionalmente relevantes.

Dessa forma, o princípio da sustentabilidade não representa mero compromisso político, mas constitui síntese normativa racionalmente fundamentada que concretiza, através da ponderação de princípios, a exigência constitucional de harmonização entre progresso econômico e preservação ambiental para as presentes e futuras gerações.

2.6. A sustentabilidade e o princípio da solidariedade intergeracional: fundamentos e perspectivas para a proteção dos direitos das futuras gerações

A consagração constitucional do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, prevista no art. 225 da Constituição Federal de 1988, estabelece um paradigma jurídico que transcende as tradicionais concepções temporais do direito, incorporando uma dimensão intergeracional que se materializa através do princípio da solidariedade entre gerações. Essa perspectiva inovadora do constitucionalismo brasileiro reconhece que a proteção ambiental não se esgota nas necessidades presentes, mas projeta-se como um imperativo ético-jurídico que vincula tanto o Poder Público quanto a coletividade à preservação dos recursos naturais para as gerações futuras.

O fundamento teórico desta abordagem intergeracional encontra respaldo na doutrina constitucional contemporânea, particularmente nos estudos desenvolvidos por Sarlet, que identifica na solidariedade intergeracional um princípio estruturante do direito fundamental ao meio ambiente. Segundo esta concepção, a dimensão temporal do direito ambiental configura-se como elemento essencial para a compreensão da sua natureza jurídica, uma vez que a degradação ambiental produz efeitos que se estendem muito além do momento presente, comprometendo a capacidade das futuras gerações de satisfazerem suas próprias necessidades e exercerem seus direitos fundamentais (SARLET, 2015, p. 47-52).

A operacionalização jurídica desta solidariedade intergeracional se manifesta através de diversos instrumentos normativos que buscam conciliar o desenvolvimento presente com a preservação ambiental futura. Nessa ótica, emerge a necessidade de uma hermenêutica constitucional que considere não apenas os interesses das gerações atuais, mas também os direitos das gerações vindouras, estabelecendo um diálogo temporal que permita a construção de políticas públicas e decisões judiciais orientadas pela sustentabilidade de longo prazo.

A dimensão procedimental desta solidariedade intergeracional revela-se particularmente relevante na elaboração de estudos de impacto ambiental, no

licenciamento de atividades potencialmente degradadoras e na implementação de políticas de recuperação ambiental. Esses instrumentos jurídicos devem incorporar uma análise prospectiva que considere os efeitos cumulativos e de longo prazo das ações humanas sobre o meio ambiente, garantindo que as decisões tomadas no presente não comprometam irreversivelmente a qualidade ambiental disponível às futuras gerações.

O arcabouço jurídico brasileiro tem progressivamente reconhecido essa dimensão intergeracional do direito ambiental, mediante critérios interpretativos que privilegiam a precaução e a prevenção como mecanismos de proteção dos direitos das gerações futuras. Essa evolução, inequivocamente, reflete uma compreensão mais sofisticada da temporalidade jurídica, que supera as limitações da dogmática tradicional para incorporar uma perspectiva que reconhece a interdependência temporal dos direitos fundamentais.

3. O HIDROGÊNIO VERDE E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: DESCARBONIZAÇÃO E TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A maior parte das pesquisas atuais reforça que o aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (N_2O), está diretamente associado às atividades humanas, especialmente o uso intensivo de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas insustentáveis (Silva, 2021, p. 45). Nesse cenário, as emissões globais de dióxido de carbono continuam em alta, apesar dos compromissos internacionais, o que evidencia a necessidade urgente de políticas públicas eficazes para a redução das emissões.

As mudanças climáticas produzem impactos ambientais significativos, como o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos - ondas de calor, secas, enchentes e tempestades - que afetam ecossistemas e a biodiversidade (COSTA, 2022).

Além disso, a literatura aponta que os efeitos não são homogêneos, atingindo mais severamente populações vulneráveis, ampliando desigualdades sociais. As comunidades periféricas, devido à sua vulnerabilidade social e dependência direta dos recursos naturais, tendem a sofrer os efeitos mais acentuados das mudanças climáticas (FERREIRA, 2020, p. 122).

No campo das políticas públicas, estudos recentes analisam estratégias para mitigar as emissões de GEE e promover a adaptação aos impactos já inevitáveis

das mudanças climáticas. O potencial do mercado de créditos de carbono no Brasil se caracteriza como uma ferramenta para incentivar a redução das emissões, de modo que o mecanismo de mercado pode potencializar investimentos em tecnologias limpas e exigir rigor na fiscalização e transparência para evitar práticas de “greenwashing”⁵ (ALMEIDA, 2023, p. 78).

Além disso, a integração de políticas de desenvolvimento sustentável com ações climáticas locais é destacada como fundamental. A resiliência climática depende da participação comunitária e da incorporação do conhecimento tradicional nos processos decisórios, promovendo soluções adaptativas culturalmente apropriadas.

Outro aspecto enfatizado nas pesquisas é o papel da inovação tecnológica, como energias renováveis, captura e armazenamento de carbono, e agricultura de baixo carbono para enfrentar as mudanças climáticas. Nesse passo, a transição energética é imperativa para o cumprimento das metas do Acordo de Paris, demandando políticas públicas que promovam investimentos em infraestrutura verde e a formação de capital humano especializado (LIMA et al., 2022, p. 94).

3.1. Protocolos Internacionais de Mitigação Climática: Protocolo de Quioto e Acordo de Paris

A governança climática internacional tem evoluído significativamente desde o final do século XX, com a implementação de acordos multilaterais que visam à mitigação das mudanças climáticas. Entre os mais proeminentes estão o Protocolo de Quioto, adotado em 1997, e o Acordo de Paris, firmado em 2015. Ambos, representam marcos distintos na tentativa global de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), embora com abordagens e estruturas diferenciadas.

O Protocolo de Quioto, estabelecido sob a égide da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), foi o primeiro tratado internacional a impor metas legalmente vinculantes de redução de GEE para países desenvolvidos. Entrando em vigor em 2005, após a ratificação por nações responsáveis por pelo menos 55% das emissões globais de CO₂, o protocolo

⁵ A mentira verde (greenwashing) é quando uma empresa diz se preocupar com a natureza, mas na prática faz o contrário ou não faz nada. Ela pode acontecer de diferentes formas: por meio de propagandas falsas nos rótulos dos produtos, com afirmações vagas nos relatórios de sustentabilidade ou, ainda, na venda de soluções ambientais para os consumidores que deveriam ser assumidas pela própria empresa. IDEC – Instituto de Defesa de Consumidores. Disponível em: <https://idec.org.br/greenwashing>, acesso em 05/05/2025.

estipulou que esses países deveriam reduzir suas emissões em uma média de 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período de 2008 a 2012 (LEHMEN, 2006).

Uma característica distintiva do Protocolo de Quioto foi a introdução de mecanismos de flexibilização, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitia aos países desenvolvidos investir em projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento, obtendo créditos de carbono em troca. Essa abordagem visava promover o desenvolvimento sustentável e a transferência de tecnologia, embora tenha enfrentado críticas quanto à eficácia e à equidade na distribuição dos benefícios (GULLO, 2012).

Contudo, o protocolo enfrentou desafios significativos. A ausência de compromissos obrigatórios para países em desenvolvimento, como China e Índia, e a não ratificação por parte dos Estados Unidos, um dos maiores emissores globais, limitaram seu alcance e eficácia. Além disso, embora alguns países tenham cumprido suas metas individuais, as emissões globais continuaram a aumentar, indicando a necessidade de uma abordagem mais inclusiva e abrangente (ARATANGY, 2007).

Vale destacar o trecho do estudo disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente do Governo Brasileiro, acerca do Protocolo de Quioto, e a ratificação do documento pelo Brasil, *in verbis*:

O Protocolo de Quioto constitui um tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, definindo metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e os que, à época, apresentavam economia em transição para o capitalismo, considerados os responsáveis históricos pela mudança atual do clima.

Criado em 1997, o Protocolo entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005, logo após o atendimento às condições que exigiam a ratificação por, no mínimo, 55% do total de países-membros da Convenção e que fossem responsáveis por, pelo menos, 55% do total das emissões de 1990.

Durante o primeiro período de compromisso, entre 2008-2012, 37 países industrializados e a Comunidade Europeia comprometeram-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) para uma média de 5% em relação aos níveis de 1990. No segundo período de compromisso, as Partes se comprometeram a reduzir as emissões de GEE em pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990 no período de oito anos, entre 2013-2020. Cada país negociou a sua própria meta de redução de emissões em função da sua visão sobre a capacidade de atingi-la no período considerado.

O Brasil ratificou o documento em 23 de agosto de 2002, tendo sua aprovação interna se dado por meio do Decreto Legislativo nº 144 de 2002. Entre os principais emissores de gases de efeito estufa, somente os Estados Unidos não ratificaram o Protocolo. No entanto, continuaram com responsabilidades e obrigações definidas pela Convenção.

De forma a auxiliar os países desenvolvidos e os de economia em transição para o capitalismo – conhecidos tecnicamente como Países Anexo I - a cumprirem suas metas de redução ou limitação de emissões, o Protocolo de Quioto contemplou três mecanismos de flexibilização: Comércio de Emissões, Implementação Conjunta e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Esse último é o único a permitir a participação dos países em desenvolvimento – chamados tecnicamente de Partes não-Anexo I.

Por meio do MDL, um país desenvolvido ou de economia em transição para o capitalismo pode comprar “créditos de carbono”, denominados “reduções certificadas de emissões” (RCEs) resultantes de atividades de projeto desenvolvidas em qualquer país em desenvolvimento que tenha ratificado o Protocolo. Isso é possível desde que o governo do país onde ocorrem os projetos concorde que a atividade de projeto é voluntária e contribui para o desenvolvimento sustentável nacional.

Na perspectiva do funcionamento do mecanismo, o proponente deve elaborar, inicialmente, um documento de concepção do projeto, aplicando uma metodologia previamente aprovada pelo Comitê Executivo do MDL para definição de linha de base e monitoramento.

Após a elaboração do documento, o projeto precisa ser validado por uma Entidade Operacional Designada (EOD) e aprovado pela Autoridade Nacional Designada (AND), que, no Brasil, é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), criada pelo Decreto Presidencial de 7 de julho de 1999, tem por finalidade articular as ações de governo decorrentes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e seus instrumentos subsidiários de que o Brasil vier a ser parte.

Uma vez aprovados e validados, os projetos são submetidos ao Conselho Executivo da UNFCCC para registro. Inicia-se, então, o monitoramento e a verificação das reduções de emissões do gás de efeito estufa pertinentes ao projeto, para, finalmente, serem emitidas as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs).

(<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>, acesso em 05/05/2025)

Em resposta a essas limitações, o Acordo de Paris foi adotado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em 2015. Diferentemente de seu predecessor, o acordo estabeleceu um compromisso universal, envolvendo tanto países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, com o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar esse aumento a 1,5°C (HISAMOTO, 2022).

O Acordo de Paris introduziu as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), nas quais cada país define suas metas de redução de emissões, adaptadas às suas capacidades e circunstâncias nacionais. Essas contribuições são revistas e atualizadas a cada cinco anos, promovendo um ciclo contínuo de ambição crescente. Além disso, o acordo enfatiza a importância da transparência e da prestação de contas, estabelecendo mecanismos para monitorar e relatar o progresso das NDCs (HISAMOTO, 2022).

Outro aspecto relevante do Acordo de Paris é o compromisso dos países desenvolvidos em mobilizar US\$ 100 bilhões por ano até 2020 para apoiar ações de mitigação e adaptação em países em desenvolvimento, promovendo uma abordagem mais equitativa e colaborativa no enfrentamento das mudanças climáticas (HISAMOTO, 2022).

Quanto ao Acordo de Paris e a sua ratificação pelo estado brasileiro, eis o teor do estudo apresentado pelo Ministério do Meio Ambiente, *ipsis litteris*:

Na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças.

O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países Parte da UNFCCC para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso ocorre no sentido de manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.

Para que comece a vigorar, necessita da ratificação de pelo menos 55 países responsáveis por 55% das emissões de GEE. O secretário-geral da ONU, numa cerimônia em Nova York, no dia 22 de abril de 2016, abriu o período para assinatura oficial do acordo, pelos países signatários. Este período se encerrou em 21 de abril de 2017.

Para o alcance do objetivo final do Acordo, os governos se envolveram na construção de seus próprios compromissos, a partir das chamadas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC, na sigla em inglês). Por meio das iNDCs, cada nação apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa, seguindo o que cada governo considera viável a partir do cenário social e econômico local.

Após a aprovação pelo Congresso Nacional, o Brasil concluiu, em 12 de setembro de 2016, o processo de ratificação do Acordo de Paris. No dia 21 de setembro, o instrumento foi entregue às Nações Unidas. Com isso, as metas brasileiras deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais. Agora, portanto, a sigla perdeu a letra “i” (do inglês, intended) e passou a ser chamada apenas de NDC.

A NDC do Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

A NDC do Brasil corresponde a uma redução estimada em 66% em termos de emissões de gases efeito de estufa por unidade do PIB (intensidade de emissões) em 2025 e em 75% em termos de intensidade de emissões em 2030, ambas em relação a 2005. O Brasil, portanto, reduzirá emissões de gases de efeito estufa no contexto de um aumento contínuo da população e do PIB, bem como da renda per capita, o que confere ambição a essas metas.

No que diz respeito ao financiamento climático, o Acordo de Paris determina que os países desenvolvidos deverão investir 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação, em países em desenvolvimento. Uma novidade no âmbito do apoio financeiro é a possibilidade de financiamento entre países em desenvolvimento, chamada “cooperação Sul-Sul”, o que amplia a base de financiadores dos projetos.

Observa-se no texto a preocupação em formalizar o processo de desenvolvimento de contribuições nacionais, além de oferecer requisitos obrigatórios para avaliar e revisar o progresso das mesmas. Esse mecanismo exige que os países atualizem continuamente seus compromissos, permitindo que ampliem suas ambições e aumentem as metas de redução de emissões, evitando qualquer retrocesso. Para tanto, a partir do início da vigência do acordo, acontecerão ciclos de revisão desses objetivos de redução de gases de efeito estufa a cada cinco anos.

(<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em 05/05/2025)

Em síntese, enquanto o Protocolo de Quioto representou um passo inicial na imposição de metas obrigatórias de redução de emissões para países desenvolvidos, o Acordo de Paris avançou ao estabelecer um compromisso global mais inclusivo e flexível, reconhecendo as diferentes capacidades e responsabilidades dos países. Ambos os acordos refletem a evolução da cooperação internacional em matéria climática, destacando a importância de abordagens adaptativas e colaborativas para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos.

3. 2. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas: Agenda 2030 no Brasil

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, aprovada pela Assembleia Geral das Nações Unidas, em setembro de 2015, estabeleceu um marco paradigmático para a reconfiguração das políticas públicas globais, fundamentando-se na premissa de que os desafios contemporâneos demandam abordagens sistêmicas e interdisciplinares. No contexto brasileiro, a implementação dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representa não apenas um compromisso internacional, mas uma oportunidade de efetivação do princípio da sustentabilidade, insculpido no texto constitucional, que determina o desenvolvimento econômico com a observância da proteção ambiental (ONU BRASIL, 2025).

Nesse aspecto, mister se faz a abordagem acerca da convergência sistêmica entre quatro objetivos específicos da Agenda 2030: o ODS 7 (Energia limpa e acessível), o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), representados conforme ilustração abaixo (Figura 2):



Essa delimitação se justifica pela identificação de uma estrutura comum que articula dimensões energéticas, urbanas, produtivas e climáticas como elementos estruturantes de um novo paradigma de sustentabilidade ambiental.

A ideia central, nesse contexto, refere-se à efetivação simultânea dos objetivos reportados, a partir de uma perspectiva que implica reconhecer que a sustentabilidade ambiental se configura como um vetor transformador das estruturas produtivas no Brasil.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 – “Energia limpa e acessível”, estabelece como meta central assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos até 2030. Essa formulação articula critérios de universalidade, sustentabilidade, modernidade e acessibilidade econômica como parâmetros integrados para a formulação de políticas energéticas, estabelecendo o denominado direito fundamental de segunda geração e que demanda prestações positivas do Estado.

Estabelece, ainda (meta 7.2), a necessidade de aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global, introduz uma dimensão qualitativa na política energética que transcende considerações meramente quantitativas de oferta e demanda. A transição para fontes renováveis implica não apenas transformações tecnológicas, mas uma reconfiguração dos modelos de segurança energética, demandando instrumentos jurídicos que incentivem o acesso aos recursos energéticos.

Também tem como meta (7.3) dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética até 2030, estabelece um imperativo de otimização que ressoa com os princípios constitucionais da proporcionalidade e da economicidade. A eficiência energética configura-se como princípio constitucional implícito, demandando que os agentes públicos e privados adotem padrões de consumo que maximizem a utilidade social dos recursos energéticos disponíveis. No contexto brasileiro, esse desafio demanda uma coordenação intergovernamental que transcenda as competências setoriais tradicionalmente estabelecidas, promovendo uma governança energética que integre dimensões locais, regionais e nacionais.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 propõe tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, estabelecendo um paradigma de desenvolvimento urbano que articula dimensões sociais, ambientais e econômicas. No contexto brasileiro há uma particular relevância, considerando que as cidades concentram aproximadamente 85% da

população nacional e respondem por significativa parcela das emissões de gases de efeito estufa (ONU BRASIL, 2025).

A meta 11.3, que visa aumentar a urbanização inclusiva e sustentável, e as capacidades para o planejamento e gestão de assentamentos humanos participativos, integrados e sustentáveis, estabelece parâmetros normativos que transcendem a tradicional concepção de planejamento urbano como atividade meramente técnica. A inclusividade e a sustentabilidade configuram-se como princípios constitucionais que informam o exercício das competências urbanísticas, demandando que os instrumentos de planejamento incorporem critérios de justiça social e proteção ambiental.

A meta 11.5, que estabelece a necessidade de reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes, introduz o conceito de resiliência urbana como elemento estruturante das políticas de desenvolvimento territorial.

A resiliência urbana configura-se como capacidade adaptativa dos sistemas urbanos diante de perturbações ambientais, demandando a implementação de instrumentos de gestão de riscos que articulem prevenção, mitigação e adaptação. Essa perspectiva, no contexto brasileiro, implica reconhecer que a sustentabilidade urbana constitui não apenas objetivo de política pública, mas limite constitucional ao exercício de direitos individuais.

A meta 11.6, que objetiva reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros, estabelece parâmetros quantitativos para a avaliação da sustentabilidade urbana. A redução do impacto ambiental per capita configura-se como indicador de efetividade das políticas urbanas, demandando a implementação de sistemas de monitoramento que permitam a avaliação continuada dos resultados das intervenções públicas. A implementação de sistemas integrados de gestão de resíduos demanda, além de investimentos em infraestrutura, transformações nos padrões de produção e consumo, exigindo articulação intergovernamental e cooperação interfederativa.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 estabelece como meta central assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, configurando uma transformação paradigmática que transcende considerações meramente ambientais para incorporar dimensões éticas, sociais e econômicas dos processos produtivos (ONU BRASIL, 2025).

A meta 12.2, tem como escopo alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais até 2030. A gestão sustentável dos recursos naturais demanda que os agentes econômicos incorporem externalidades ambientais em seus processos decisórios, transcendendo a lógica da maximização de lucros de curto prazo para adotar perspectivas de sustentabilidade de longo prazo.

A meta 12.5, que propõe reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso, introduz os fundamentos da economia circular como paradigma alternativo ao modelo linear de produção-consumo-descarte, demandando transformações estruturais nos processos produtivos e nos padrões de consumo.

Esse desafio demanda uma reconfiguração dos instrumentos de política econômica, incorporando critérios de sustentabilidade como parâmetros para a concessão de incentivos fiscais e creditícios.

A meta 12.6, propõe incentivar as empresas, especialmente as empresas grandes e transnacionais, a adotar práticas sustentáveis e a integrar informações de sustentabilidade em seu ciclo de relatórios, estabelecendo um novo paradigma de responsabilidade empresarial que transcende obrigações meramente legais para incorporar dimensões éticas e sociais da atividade econômica.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13, por sua vez, estabelece a necessidade de tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos, reconhecendo que as alterações climáticas constituem um dos principais desafios contemporâneos para a sustentabilidade ambiental. A urgência expressa na formulação do objetivo reflete o consenso científico de que as janelas de oportunidade para limitar o aquecimento global estão se fechando rapidamente, demandando ações imediatas e coordenadas em múltiplas escalas (ONU BRASIL, 2025).

A meta 13.1, que visa reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos os países, estabelece a adaptação climática como estratégia fundamental para a proteção de populações vulneráveis. No contexto brasileiro, a adaptação climática configura-se como desdobramento do dever estatal de proteção ambiental, demandando que os poderes públicos implementem medidas preventivas que antecipem os impactos das mudanças climáticas.

A meta 13.2, que propõe integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais, estabelece o princípio do mainstreaming climático como diretriz transversal para a formulação de políticas públicas,

configurando-se como metodologia de planejamento que incorpora considerações climáticas em todos os setores de políticas públicas, transcendendo a tradicional fragmentação setorial para promover abordagens integradas.

A implementação do princípio, no Brasil, demanda transformações significativas nos processos de planejamento governamental, exigindo que os órgãos estatais incorporem avaliações de impacto climático em suas atividades. Esse desafio requer o desenvolvimento de capacidades técnicas e metodológicas que permitam a quantificação dos impactos climáticos das políticas públicas, bem como a identificação de sinergias entre objetivos setoriais e climáticos.

A meta 13.3, que visa melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima, estabelece a dimensão educacional como elemento fundamental para a implementação de políticas climáticas efetivas. A educação climática configura-se como direito fundamental que vai além da mera transmissão de informações para incorporar o desenvolvimento de competências para a ação climática, dialogando diretamente com o direito constitucional à educação e ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.

Nesse cenário, a análise da convergência sistêmica entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 11, 12 e 13, demonstra, inequivocamente, que a sustentabilidade ambiental configura-se como paradigma integrador que transcende abordagens setoriais tradicionais para promover transformações estruturais nos sistemas energéticos, urbanos, produtivos e climáticos.

O nexos energia-cidade-consumo-clima aponta para a necessidade de desenvolvimento de marcos regulatórios inovadores que articulem instrumentos econômicos, fiscais e regulatórios de forma a induzir comportamentos sustentáveis em múltiplas escalas. A economia de baixo carbono emerge como paradigma integrador que oferece oportunidades para a reconciliação entre crescimento econômico e proteção ambiental, propondo investimentos significativos em capacidade institucional e inovação tecnológica.

A análise desses elementos, portanto, sugere que a Agenda 2030 oferece uma oportunidade única para a reconfiguração do modelo de desenvolvimento brasileiro, promovendo a transição para uma economia socialmente inclusiva, ambientalmente sustentável e climaticamente resiliente.

3.3. A COP30 e o protagonismo da Amazônia nas negociações climáticas multilaterais

A 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Conferência das Partes) – COP30, a ser realizada no Brasil, em Belém-PA, no mês de 2025, representa um marco paradigmático na governança climática global, configurando-se como a primeira vez na história das Conferências das Partes que a região amazônica sediará este fórum multilateral de magnitude internacional.

As projeções elaboradas pela Fundação Getúlio Vargas indicam um afluxo estimado de mais de 40 (quarenta) mil participantes durante o período de maior intensidade das negociações, dos quais aproximadamente 7 (sete) mil constituem a denominada "família COP", composta pelas equipes técnicas da Organização das Nações Unidas e delegações de países membros.

A dimensão simbólica e estratégica da escolha de Belém como sede da COP30 transcende os aspectos meramente logísticos, inserindo-se em uma lógica de diplomacia ambiental que busca estabelecer uma conexão direta entre os espaços de tomada de decisão e os territórios objeto das políticas climáticas. A realização da conferência no coração da Amazônia proporciona uma oportunidade sem precedentes para que as discussões sobre preservação florestal e sustentabilidade sejam conduzidas *in loco*, permitindo uma compreensão mais profunda e contextualizada dos desafios e potencialidades da região.

O evento multilateral assume particular relevância no contexto da agenda climática contemporânea, abordando temas centrais como a redução de emissões de gases de efeito estufa, mecanismos de adaptação às mudanças climáticas, arquiteturas de financiamento climático para países em desenvolvimento, transferência de tecnologias de energia renovável e soluções de baixo carbono, além de questões relacionadas à justiça climática e aos impactos socioambientais diferenciados das alterações climáticas.

O embaixador André Aranha Corrêa do Lago, Presidente da COP30, em recente entrevista no Programa Roda Viva (31 mar. 2025), discorreu a respeito das questões climáticas, sobretudo, o papel no Brasil nas negociações entre os países signatários. Veja:

Uma das nossas prioridades na COP vai ser de conseguir traduzir o que é decidido nas COP's, o que já vem sendo traduzido, sobretudo nos últimos dez anos, desde que começou o Acordo de Paris, como traduzir isso na economia. O que a gente está vendo hoje é cada vez menos dúvida com relação à mudança do clima. Há uma dúvida se a mudança do clima consegue se encaixar numa economia de maneira a criar empregos, a melhorar a vida das pessoas e a ser um

instrumento de desenvolvimento convincente. A COP30 já começou porque a gente já está discutindo os temas que a gente vai levar para a COP30. O acordo de Paris foi a solução encontrada há dez anos para trazer de volta os Estados Unidos, o que é uma ironia, porque foi um acordo desenhado para que os Estados Unidos voltasse às negociações climáticas, agora os Estados Unidos estão saindo novamente, porque eles tinham saído de Quioto que é o acordo anterior dentro dessa convenção do clima que foi assinado no Rio em 92. Nós temos que explorar, que ir além, porque antes a mudança do clima era algo mais distante, não se sabia que estava tão próximo e não tinha a ciência avisando que tinha tão poucos anos. E se tem poucos anos pela frente para conseguir o que é necessário, para evitar que a mudança do clima provoque desastres imensos e desequilibre todas as economias, tem que se pensar de forma mais ampla, que é negociar dentro dessa estrutura jurídica. E para implementar, tem que ir mais além do que as regras que foram estabelecidas dentro da Convenção e dentro do Acordo de Paris. O compromisso do Brasil e dos demais países no Acordo de Paris é de se afastar dos combustíveis fósseis e ter uma transição nesse processo para se chegar a uma neutralidade de carbono em 2050, que é o compromisso brasileiro. Todos os países estão buscando uma transição que seja compatível com suas possibilidades econômicas. O Brasil é um país em desenvolvimento, com grandes desafios ainda na área social, então, o Brasil tem que explorar as possibilidades que existem para o país.

Para o Brasil, a COP30 configura-se como uma oportunidade estratégica de reafirmação de sua liderança histórica nas negociações multilaterais sobre sustentabilidade, consolidando seu posicionamento como protagonista na transição energética global e na preservação de ecossistemas críticos para a estabilidade climática planetária.

3.4. Economia de baixo carbono: caminhos para a sustentabilidade ambiental

A transição para uma economia de baixo carbono constitui um imperativo contemporâneo frente à intensificação das mudanças climáticas e à necessidade de promover um desenvolvimento sustentável. Este modelo econômico busca dissociar o crescimento econômico das emissões de gases de efeito estufa (GEE), promovendo práticas produtivas e de consumo que minimizem a pegada de carbono. A descarbonização, nesse contexto, refere-se à redução progressiva das emissões de GEE, visando alcançar a neutralidade de carbono até meados do

século XXI, conforme estabelecido por acordos internacionais como o Acordo de Paris.

A economia de baixo carbono propõe uma reconfiguração dos sistemas produtivos e de consumo, priorizando a eficiência energética, a utilização de fontes renováveis e a inovação tecnológica. No Brasil, estudos indicam que políticas públicas eficazes, investimentos em tecnologias limpas e a reestruturação de setores intensivos em carbono são essenciais para alcançar as metas de descarbonização (MAGALHÃES, 2013). A integração de políticas setoriais e a promoção de instrumentos econômicos, como a precificação do carbono, são fundamentais para internalizar os custos ambientais das emissões e estimular comportamentos sustentáveis.

A descarbonização da economia brasileira envolve a transformação de setores estratégicos, como energia, transporte, agropecuária e indústria. A transição energética desempenha um papel crucial nesse processo, com a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como a solar e a eólica, sendo essenciais para a redução das emissões no setor energético (OLIVEIRA, 2023). Além disso, a adoção de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) e a promoção da economia circular contribuem para a mitigação das emissões em setores de difícil descarbonização, como a indústria pesada e a agricultura (SOUZA, 2023).

A implementação de instrumentos econômicos, como o mercado de carbono e a precificação das emissões, é fundamental para incentivar a redução de GEE. No Brasil, a criação de um sistema de comércio de emissões pode alinhar os interesses econômicos com os objetivos ambientais, promovendo investimentos em tecnologias limpas e práticas sustentáveis (SILVA, 2022). Além disso, políticas públicas que incentivem a eficiência energética, o uso de fontes renováveis e a inovação tecnológica são essenciais para alcançar as metas de descarbonização (MONZONI & BIDERMAN, 2010).

A transição para uma economia de baixo carbono apresenta desafios significativos, incluindo barreiras econômicas, institucionais e tecnológicas. No entanto, também oferece oportunidades para o desenvolvimento sustentável, a geração de empregos verdes e a melhoria da qualidade de vida. A adoção de práticas sustentáveis pode fortalecer a competitividade da economia brasileira, garantir acesso a mercados internacionais exigentes em padrões socioambientais e promover a segurança energética por meio do fomento às novas energias renováveis (MONZONI, 2011).

A economia de baixo carbono representa uma oportunidade para alinhar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental, promovendo uma sociedade mais justa e resiliente às mudanças climáticas. A efetivação desse modelo requer esforços coordenados e sustentados, capazes de transformar os desafios climáticos em oportunidades de inovação e progresso sustentável.

3.5. Metas de descarbonização: desafios e perspectivas para implementação no Brasil

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade no século XXI. A comunidade científica, por meio de extensos estudos, tem alertado para os impactos potencialmente catastróficos do aquecimento global causado pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes das atividades humanas (IPCC, 2022). Como resposta a esse cenário, emerge o conceito de descarbonização, entendido como o processo de redução das emissões de carbono na atmosfera, especialmente de dióxido de carbono (CO₂), com o objetivo de alcançar uma economia global com emissões reduzidas e eventualmente neutralidade climática (SACHS, 2020).

A relevância deste capítulo transcende as fronteiras das ciências naturais e adentra o universo jurídico, particularmente o direito ambiental, que tem como um de seus pilares o princípio do desenvolvimento sustentável. Este princípio, consagrado internacionalmente na Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992), estabelece a necessidade de harmonizar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental, garantindo a satisfação das necessidades das gerações presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades (MILARÉ, 2020).

No cenário global, o Acordo de Paris, adotado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, em 2015, representa um marco histórico na cooperação internacional para enfrentar as mudanças climáticas. O acordo estabelece o objetivo de limitar o aquecimento global a bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, envidando esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C (PEREIRA E SILVA, 2019).

O Brasil, signatário do Acordo de Paris, comprometeu-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, apresentando sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC). A versão mais recente, apresentada na COP29 em 2024,

estabelece a meta de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa entre 59% e 67% até 2035, em comparação aos níveis de 2005 (BRASIL, 2024).

Este trabalho se propõe a analisar as metas de descarbonização sob a perspectiva do direito ambiental, explorando seus fundamentos jurídicos, instrumentos de implementação e desafios para sua efetivação, tendo como pano de fundo o princípio da sustentabilidade.

O princípio do desenvolvimento sustentável, consagrado em diversos instrumentos internacionais e incorporado ao ordenamento jurídico brasileiro, constitui o fundamento axiológico das metas de descarbonização. Conforme ensina Derani (2020), este princípio estabelece a necessidade de conciliar o crescimento econômico com a proteção dos recursos naturais, de modo a garantir sua disponibilidade para as futuras gerações.

No direito brasileiro, o princípio do desenvolvimento sustentável encontra respaldo no art. 225 da Constituição Federal⁶, que assim estabelece:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

Segundo Milaré (2020), o desenvolvimento sustentável opera como princípio harmonizador, buscando conciliar a proteção do meio ambiente com o desenvolvimento socioeconômico. No contexto das metas de descarbonização, esse princípio orienta a transição para uma economia de baixo carbono que não comprometa o crescimento econômico e o bem-estar social.

O desenvolvimento sustentável tem como substância a conservação dos alicerces da produção e reprodução humanas, garantindo, igualmente, uma relação satisfatória entre os homens e o meio ambiente, para que as futuras gerações também tenham a oportunidade de desfrutar dos recursos que hoje estamos utilizando (ANTUNES, 2021, p. 45).

Os instrumentos de comando e controle são mecanismos regulatórios por meio dos quais o Estado estabelece normas, padrões e limites para as atividades potencialmente poluidoras. No contexto da descarbonização, incluem a regulamentação de padrões de eficiência energética, limites de emissão para

⁶ A reprodução do texto constitucional é elementar para a compreensão do tema, embora a pesquisa tem como foco a sustentabilidade própria do art. 170, VI, da CF/1988 e não necessariamente do direito ambiental extraído do dispositivo citado.

veículos e indústrias, e requisitos para utilização de energias renováveis (SOARES; JURAS, 2019).

No Brasil, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009, representa o principal marco regulatório para a implementação de metas de redução de emissões. A lei estabelece princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Embora os instrumentos de comando e controle sejam essenciais para a implementação das metas de descarbonização, sua eficácia depende da capacidade de fiscalização e da aplicação efetiva de sanções em caso de descumprimento (MOTTA, 2022).

Os instrumentos econômicos compreendem mecanismos que utilizam incentivos financeiros para influenciar o comportamento dos agentes econômicos. No contexto da descarbonização, destacam-se os mercados de carbono e a precificação das emissões como ferramentas para internalizar os custos ambientais (NUSDEO, 2018).

O mercado de carbono opera com base na compra e venda de créditos de carbono, que representam a redução ou remoção de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente da atmosfera. No Brasil, a Lei nº 14.829/2024 estabeleceu as bases para um mercado regulado de carbono, permitindo que as emissões de gases poluentes se revertam em ativos financeiros negociáveis (BRASIL, 2024).

Esse mercado, regulado no Brasil, tem potencial para gerar novas oportunidades econômicas em diferentes setores e é fundamental na estratégia de desenvolvimento econômico e social sustentável do país (DUBEUX, 2023). A precificação das emissões pode ocorrer por meio de taxas ou impostos sobre o carbono, que estabelecem um preço fixo por tonelada de CO₂ emitida, criando, assim, oportunidades de minimização de custos, dando às empresas a liberdade de escolher tecnologias e tomar decisões de acordo com seus custos de controle e metas de produção e expansão.

A transição para uma economia de baixo carbono exige investimentos significativos em tecnologias limpas e fontes renováveis de energia. Nesse contexto, os incentivos fiscais e subsídios desempenham papel fundamental na promoção da descarbonização (GOLDEMBERG; LUCON, 2020).

No Brasil, programas como o RenovaBio, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, incentivam a ampliação da produção e do uso de biocombustíveis, contribuindo para a descarbonização da matriz de transportes brasileira (BRASIL, 2023). Além disso, o Projeto de Lei do Combustível do Futuro, apresentado pelo

Governo Federal ao Congresso Nacional, visa impulsionar a industrialização do Brasil a partir da bioenergia e promover a descarbonização da matriz energética brasileira (BARBOSA; COSTA, 2023).

De acordo com Perim (2022), os incentivos fiscais para energias renováveis no Brasil têm contribuído significativamente para a expansão da capacidade instalada de fontes como solar e eólica, diversificando a matriz energética brasileira e reduzindo sua intensidade de carbono.

A implementação das metas de descarbonização enfrenta diversos desafios técnicos e econômicos, que incluem a necessidade de investimentos expressivos em infraestrutura de baixo carbono, o desenvolvimento e difusão de novas tecnologias, e a transição justa para uma economia verde (VIOLA; FRANCHINI, 2018).

O Brasil enfrenta desafios significativos para cumprir suas metas estabelecidas no Acordo de Paris, pois as emissões líquidas do país aumentaram 21,4% entre 2015 e 2021, saltando de 1.446 milhões de toneladas (MtCO₂e) para 1.756 MtCO₂e, quando a meta seria chegar a 2025 emitindo 1.614 MtCO₂e e a 2030 com 1.281 MtCO₂e (AZEVEDO, 2022).

Entre os principais desafios para o Brasil atingir suas metas de descarbonização, destacam-se a redução do desmatamento, especialmente na Amazônia, e a diminuição das emissões de metano (CH₄) na atmosfera. Além disso, o país precisa avançar na implementação de técnicas de agricultura de baixo carbono e na transição energética (TSAI, 2022).

Do ponto de vista jurídico e institucional, a implementação das metas de descarbonização enfrenta desafios relacionados à coordenação entre diferentes níveis de governo, à fragmentação institucional e à necessidade de aprimoramento dos marcos regulatórios. A efetividade das políticas de descarbonização depende da integração entre diferentes áreas do direito, como o direito ambiental, o direito energético e o direito econômico, além da coordenação entre políticas setoriais (LEITE; AYALA, 2020).

No Brasil, a implementação das metas de descarbonização exige a articulação entre diferentes órgãos governamentais, como o Ministério do Meio Ambiente, o Ministério de Minas e Energia e o Ministério da Economia. A fragmentação institucional e a falta de coordenação podem dificultar a adoção de uma abordagem integrada para a descarbonização (SABBAG, 2019).

As leis de incentivo, como as vistoriadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, que destinam recursos da produção para

investimento em pesquisa, são essenciais para o avanço da tecnologia que influenciará na descarbonização (Carneiro, 2023).

Apesar dos desafios, a descarbonização também apresenta oportunidades para o Brasil, especialmente considerando seu potencial em energias renováveis, bioeconomia e soluções baseadas na natureza (ABRANCHES, 2020).

A descarbonização da economia representa uma grande oportunidade para criar riqueza, gerar empregos e melhorar a qualidade do ar. Além disso, o Brasil, com sua matriz energética predominantemente renovável e sua biodiversidade, tem potencial para liderar a transição para uma economia de baixo carbono.

O mercado de carbono também apresenta oportunidades significativas para o Brasil, que é uma potência de crédito de carbono e será um dos maiores geradores e exportadores de crédito de carbono do mundo, conciliando preservação com monetização de ativos e criando uma agenda sustentável dentro do ciclo produtivo (MARQUES, 2022).

Além disso, iniciativas como o programa Energias da Amazônia, lançado pelo governo federal em 2023, demonstram o potencial de combinação entre descarbonização e desenvolvimento regional sustentável. O programa visa reduzir o uso de óleo diesel na produção de energia na região amazônica, substituindo-o por fontes renováveis (BRASIL, 2023).

As metas de descarbonização representam um desafio complexo e multifacetado, que demanda uma abordagem interdisciplinar, envolvendo aspectos técnicos, econômicos, sociais e jurídicos. O direito ambiental, fundamentado no princípio do desenvolvimento sustentável, oferece o arcabouço normativo para orientar a transição para uma economia de baixo carbono.

No Brasil, a implementação das metas de descarbonização requer o aprimoramento dos instrumentos jurídicos, que incluem mecanismos de comando e controle, instrumentos econômicos como mercados de carbono e precificação de emissões, e incentivos fiscais para tecnologias limpas.

Os desafios são significativos, abrangendo desde questões técnicas e econômicas até aspectos jurídicos e institucionais. No entanto, a descarbonização também apresenta oportunidades para o Brasil, especialmente considerando seu potencial em energias renováveis, bioeconomia e soluções baseadas na natureza.

Para que as metas de descarbonização sejam efetivamente implementadas, é fundamental a articulação entre diferentes atores sociais – governo, setor privado, academia e sociedade civil – e a adoção de uma abordagem integrada, que considere as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade.

Em última análise, o sucesso das metas de descarbonização dependerá da capacidade de traduzir os compromissos internacionais em políticas públicas efetivas, respaldadas por um marco regulatório robusto e alinhado com os princípios do direito ambiental, especialmente o desenvolvimento sustentável.

3.6. Fontes energéticas: matriz energética brasileira

A energia constitui elemento fundamental para o desenvolvimento das sociedades modernas, sendo um dos pilares essenciais que sustentam as atividades econômicas, sociais e ambientais. A forma como os países organizam suas matrizes energéticas determina não apenas sua capacidade de crescimento econômico, mas também seus impactos ambientais e sua contribuição para as mudanças climáticas globais (GOLDEMBERG e LUCON, 2012).

O Brasil, por suas características geográficas, climáticas e de biodiversidade, apresenta uma configuração energética singular no panorama mundial, com expressiva participação de fontes renováveis quando comparado à média global. Esta particularidade coloca o país em posição estratégica no contexto da transição energética global e dos desafios da sustentabilidade (TOLMASQUIM, 2016).

Este tópico da pesquisa tem como objetivo analisar a composição atual da matriz energética brasileira e as perspectivas futuras, com ênfase nas dimensões da sustentabilidade e suas interfaces com o direito ambiental.

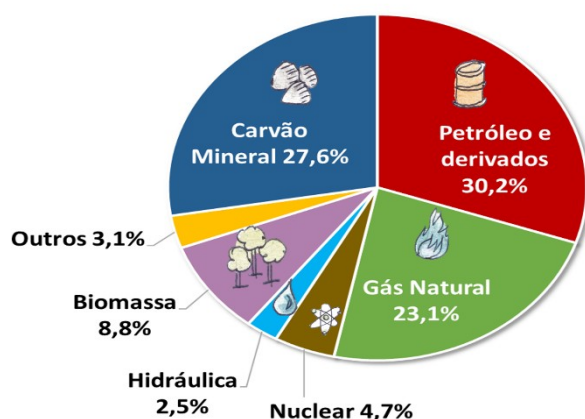
As reflexões desenvolvidas neste estudo são relevantes tanto para o campo acadêmico, contribuindo para a compreensão das dinâmicas energéticas nacionais, quanto para o campo das políticas públicas, oferecendo subsídios para a formulação de estratégias energéticas alinhadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

A matriz energética representa o conjunto de fontes disponíveis em um país para suprir toda a demanda de energia, enquanto a matriz elétrica se refere especificamente às fontes utilizadas para a geração de eletricidade (EPE, 2021). Esta distinção é fundamental para compreender os diferentes aspectos da política energética nacional e seus impactos socioambientais.

A configuração da matriz energética de um país é influenciada por diversos fatores, incluindo disponibilidade de recursos naturais, desenvolvimento tecnológico, políticas públicas, condições econômicas e compromissos ambientais assumidos internacionalmente (TOLMASQUIM, 2016). No caso brasileiro, a abundância de recursos hídricos, a extensa área territorial com potencial para biomassa e as

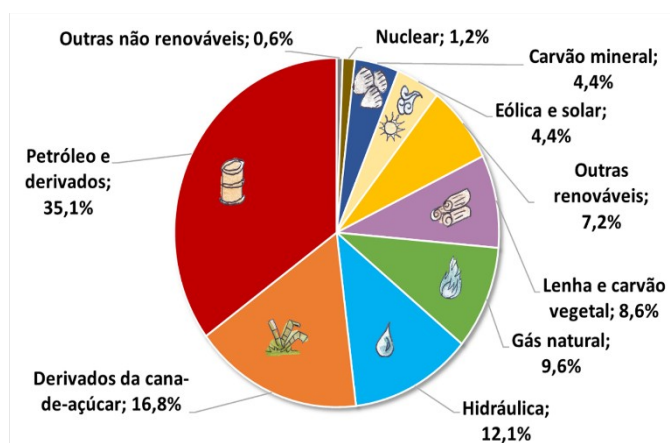
condições favoráveis para energia solar e eólica constituem vantagens comparativas significativas.

A matriz energética global é constituída, predominantemente, por recursos energéticos não renováveis, incluindo carvão mineral, derivados do petróleo e gás natural (EPE, 20204). Observe as informações apresentadas neste gráfico (Figura 3), elaborado com base nos dados fornecidos pela Agência Internacional de Energia (identificada pela sigla IEA, do inglês *International Energy Agency*):



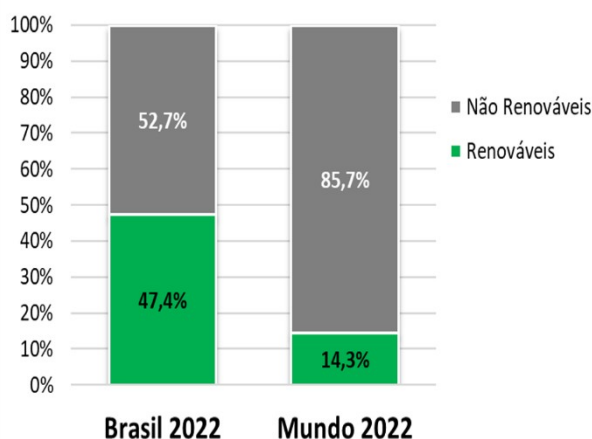
Recursos energéticos renováveis, como energia solar, eólica e geotérmica, representam conjuntamente apenas 3,1% da composição energética global, categorizados como "Outros" na representação gráfica. Quando agregadas à contribuição da energia hidrelétrica e da biomassa, as fontes renováveis alcançam cerca de 14% do total (IEA, 2023).

O panorama energético brasileiro apresenta características distintas em relação ao cenário mundial. No território nacional, há maior utilização de recursos energéticos renováveis comparativamente ao contexto internacional - 49,1% de participação renovável em sua matriz energética, constituindo aproximadamente metade do suprimento energético nacional (EPE, 2024). A elaboração do gráfico referente à matriz energética brasileira baseou-se nas informações do Balanço Energético Nacional (BEN, 2024). Veja (Figura 4):



Como se vê, a matriz energética brasileira se destaca no cenário mundial pela expressiva participação de fontes renováveis.

Vale destacar a comparação do consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo, sendo importante a utilização do mesmo parâmetro. Para tanto, a comparação foi realizada levando em conta o ano de 2022 (Figura 5):

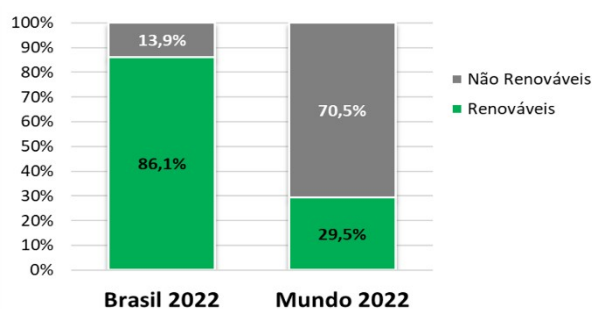


Observa-se através da representação gráfica que a composição energética do Brasil apresenta maior proporção de recursos renováveis em comparação ao cenário global. Os recursos energéticos não renováveis constituem os principais geradores de liberação de gases causadores do efeito estufa (GEE). Devido ao maior consumo de energia proveniente de fontes renováveis em território nacional, quando comparado a outras nações, ao calcularmos a razão entre as emissões de gases de efeito estufa e o contingente populacional brasileiro, constata-se que o país registra menores índices de emissão de GEE *per capita* do que a maior parte das demais nações (EPE, 2024).

A posição relativamente privilegiada do Brasil neste contexto pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo: a tradição no uso de hidroeletricidade, as políticas de incentivo a biocombustíveis (com destaque para o etanol), a crescente competitividade das energias eólica e solar, e os compromissos assumidos pelo país em acordos internacionais sobre mudanças climáticas.

Quando analisamos especificamente a matriz elétrica brasileira, a participação de fontes renováveis é ainda mais expressiva. A composição da matriz elétrica é liderada pela fonte hidráulica (58,9%), seguida pela eólica (13,2%), biomassa (8,0%) e solar (7,0%). Vejamos a comparação em relação ao consumo de

energia elétrica mundial e nacional e, no ano de 2022, mediante fontes renováveis e não renováveis (Figura 6):



3.7. Transição e diversificação da matriz energética brasileira

A transição energética pode ser compreendida como o processo de mudança na composição e no uso das fontes de energia, geralmente de um sistema baseado em combustíveis fósseis para um sistema com menor emissão de gases de efeito estufa (SOVACOL, 2016).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), a transição energética consiste em passar de uma matriz de fonte de energia que utiliza combustíveis fósseis, como Petróleo, gás natural e carvão, que são grandes emissores de Carbono (CO₂) na atmosfera, para fontes renováveis, como sol, água, vento e biomassa (MME, 2023).

No caso brasileiro, a transição energética apresenta características particulares, uma vez que o país já possui uma matriz energética relativamente limpa quando comparada à média mundial. Contudo, os desafios permanecem significativos, especialmente no que se refere à redução da dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes e na indústria (LA ROVERE et al., 2018).

O Brasil tem desenvolvido um conjunto de políticas e programas voltados para a promoção da transição energética. O Ministério de Minas e Energia (MME) é o principal responsável pela Política Nacional de Transição Energética, que visa levar o país a outro patamar mundial em fontes renováveis de energia (MME, 2023). Entre as principais iniciativas neste campo, destacam-se:

- i. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pela Lei 10.438/2002, que estimulou a diversificação da matriz elétrica por meio de incentivos à geração a partir de fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

- ii. O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), instituído em 2004, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira com objetivos sociais, ambientais e econômicos.
- iii. O RenovaBio, política nacional de biocombustíveis instituída pela Lei 13.576/2017, que busca expandir a produção de biocombustíveis no Brasil, baseada na previsibilidade, na sustentabilidade ambiental, econômica e social, e compatível com o crescimento do mercado.
- iv. O Programa Combustível do Futuro, lançado em 2021, que busca diminuir a participação de combustíveis fósseis na matriz energética nacional.
- v. O Programa Nacional do Hidrogênio, focado no desenvolvimento do hidrogênio verde como alternativa energética para o futuro.

Apesar dos avanços na diversificação da matriz energética brasileira, persistem desafios significativos para a consolidação de um modelo energético sustentável. Entre estes desafios, podemos destacar a necessidade de expansão da infraestrutura para permitir o crescimento das fontes renováveis, especialmente no que se refere à transmissão de energia gerada em regiões remotas (TOLMASQUIM, 2016), a gestão dos recursos hídricos, especialmente em períodos de seca, que afetam a disponibilidade de energia hidrelétrica (CEMIG, 2024), os altos custos iniciais de algumas tecnologias de energia renovável, que podem constituir barreiras à sua adoção em larga escala (IRENA, 2019) e a necessidade de políticas públicas mais robustas para a descarbonização do setor de transportes, que ainda depende fortemente de combustíveis fósseis.

Por outro lado, o Brasil apresenta oportunidades significativas para avançar na transição energética, incluindo a abundância de recursos naturais, como potencial hidráulico, biomassa, irradiação solar e ventos constantes em diversas regiões do país (WWF Brasil, 2023); a experiência acumulada com biocombustíveis, especialmente o etanol, que coloca o país na vanguarda da tecnologia neste segmento (GOLDEMBERG, 2013), o potencial para desenvolvimento do hidrogênio verde, aproveitando a abundância de fontes renováveis para sua produção (EPE, 2021); a crescente competitividade econômica das energias renováveis, com redução significativa nos custos de tecnologias como a solar fotovoltaica e a eólica (BNEF, 2023).

O Brasil investiu US\$ 34,8 bilhões em transição energética em 2023, abrangendo iniciativas em energia renovável, captura de carbono, hidrogênio verde e veículos elétricos, segundo relatório da BloombergNEF's Energy Transition Investment Trends 2024 (Exame, 2024).

As perspectivas futuras apontam para a continuidade do crescimento das fontes renováveis na matriz energética brasileira. Segundo o Plano Nacional de Energia (PNE), o Brasil poderia alcançar uma matriz de energia 100% renovável até 2050, com investimentos estimados em R\$ 794 bilhões, principalmente em projetos centralizados de energia solar e eólica (Portal Solar, 2023).

Para alcançar este objetivo, será necessário o desenvolvimento de novas tecnologias, a implementação de políticas públicas eficientes e a construção de uma governança energética que envolva diversos setores da sociedade. O papel do direito ambiental neste processo é fundamental.

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938/1981, estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a preservação e recuperação da qualidade ambiental. No que se refere ao setor energético, a PNMA impõe a necessidade de compatibilizar o desenvolvimento econômico com a preservação da qualidade ambiental e do equilíbrio ecológico (BRASIL, 1981).

Entre os instrumentos da PNMA com impacto direto sobre o setor energético, destacam-se: o licenciamento ambiental, exigido para a instalação de empreendimentos potencialmente poluidores, incluindo usinas hidrelétricas, termelétricas, parques eólicos e solares, entre outros (MILARÉ, 2018); a avaliação de impactos ambientais, que permite identificar, prever e interpretar os efeitos de atividades sobre o meio ambiente, orientando a tomada de decisões (SÁNCHEZ, 2013); o zoneamento ambiental, que estabelece critérios para a implantação de atividades econômicas, influenciando a localização de empreendimentos energéticos (SILVA, 2014); e os padrões de qualidade ambiental, que estabelecem limites para a emissão de poluentes, afetando especialmente as usinas termelétricas e outras fontes de geração que emitem gases poluentes (MACHADO, 2015).

A aplicação destes instrumentos no setor energético tem contribuído para a redução dos impactos ambientais negativos e para a promoção de fontes mais limpas e sustentáveis. No entanto, persistem desafios relacionados à efetividade da regulação ambiental e à integração entre as políticas energética e ambiental (DUTRA, 2019).

Conforme já consignado no capítulo 2, e com a finalidade de sedimentar o entendimento acerca desta questão, é importante ressaltar, em outras palavras, a necessidade de observância do direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado como um direito fundamental, impondo ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

No que se refere especificamente à questão energética, a Constituição estabelece, em seu artigo 170, que a ordem econômica deve observar, entre outros princípios, a defesa do meio ambiente, possibilitando tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental dos produtos e serviços. Esse dispositivo fundamenta a adoção de políticas de incentivo a fontes energéticas menos poluentes e mais sustentáveis.

Além disso, a Constituição atribui competências legislativas e administrativas aos entes federativos em matéria ambiental e energética. À União compete legislar privativamente sobre águas, energia e jazidas, enquanto a competência para legislar sobre proteção ao meio ambiente é concorrente entre União, Estados e Distrito Federal.

Essa configuração constitucional estabelece as bases para a construção de uma política energética ambientalmente sustentável, subordinando o desenvolvimento econômico à preservação ambiental e ao interesse social (SARLET, 2018).

O conceito de sustentabilidade, em sua formulação mais difundida, envolve a capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades (WCED, 1987). Aplicado à matriz energética, esse conceito implica a necessidade de desenvolver um sistema energético que atenda às demandas atuais sem esgotar recursos não renováveis, sem gerar poluição excessiva e sem comprometer o equilíbrio climático global.

A sustentabilidade pode ser compreendida em múltiplas dimensões, dentre as quais, a dimensão econômica, que é aquela que envolve a viabilidade econômica das fontes energéticas, incluindo custos de produção, distribuição e externalidades ambientais, e a política, que contempla os processos de tomada de decisão, a participação social e a governança do sistema energético (GOLDEMBERG, 2013).

A integração destas dimensões da sustentabilidade no planejamento e na gestão da matriz energética constitui um desafio complexo, que requer abordagens interdisciplinares e intersetoriais.

Nesse toar, o ordenamento jurídico brasileiro dispõe de diversos instrumentos para promover a sustentabilidade na matriz energética. Entre eles, destacam-se:

- vi. A Lei de Política Energética Nacional (Lei 9.478/1997), que estabelece entre seus objetivos a proteção ao meio ambiente e a promoção da conservação de energia (Brasil, 1997).

- vii. A Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001), que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, visando à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (Brasil, 2001).
- viii. A Lei da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187/2009), que estabelece metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, com impactos diretos sobre o setor energético (Brasil, 2009).
- ix. A Lei da Política Nacional de Educação Ambiental (Lei 9.795/1999), que inclui entre seus objetivos o estímulo à cooperação entre as diversas regiões do país para a construção de uma sociedade ambientalmente equilibrada, fundada nos princípios da sustentabilidade (BRASIL, 1999).

Estes instrumentos jurídicos criam um arcabouço institucional e normativo que orienta a transição para uma matriz energética mais sustentável, estabelecendo diretrizes, metas e mecanismos de implementação para as políticas públicas do setor. A transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável constitui um dos maiores desafios contemporâneos, com implicações significativas para a mitigação das mudanças climáticas, a segurança energética e o desenvolvimento socioeconômico (SACHS, 2015).

Nesse contexto, as energias renováveis emergem como protagonistas de um novo paradigma energético global, caracterizado pela progressiva substituição dos combustíveis fósseis por fontes alternativas de menor impacto ambiental.

3.8. Potencial de ampliação das energias renováveis

No Brasil, país reconhecido por sua matriz energética relativamente limpa, as energias renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia em 2023, segundo o Balanço Energético Nacional elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024). Esse percentual, significativamente superior à média mundial de aproximadamente 15%, posiciona o país em situação privilegiada no contexto internacional, mas também impõe desafios particulares para a expansão e diversificação de suas fontes renováveis.

Para além dos aspectos técnicos e econômicos, a ampliação das energias renováveis envolve questões jurídicas fundamentais, relacionadas à regulação do setor energético e à proteção ambiental. É nessa interseção que o direito ambiental desempenha papel crucial, oferecendo princípios e instrumentos normativos que podem orientar uma transição energética sustentável e socialmente justa.

Nesse passo, as energias renováveis podem ser definidas como aquelas provenientes de fontes naturais capazes de se regenerar em escala temporal humana, distinguindo-se dos combustíveis fósseis cuja formação demanda milhões de anos (GOLDEMBERG, 2012). Essa característica de renovabilidade constitui seu principal atributo diferenciador, conferindo-lhes vantagens significativas em termos de sustentabilidade a longo prazo. A diversidade tipológica das energias renováveis reflete a variedade de recursos naturais que podem ser convertidos em energia útil.

Entre as principais categorias, destacam-se:

a) Energia hidrelétrica: gerada a partir do aproveitamento da energia potencial e cinética da água em rios e quedas d'água. Embora considerada renovável, grandes empreendimentos hidrelétricos podem provocar impactos socioambientais significativos, como alterações em ecossistemas aquáticos e deslocamento de populações.

b) Energia eólica: obtida pela conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica através de aerogeradores. Caracteriza-se por baixas emissões de carbono e reduzido impacto ambiental durante a operação, embora existam preocupações relacionadas ao impacto visual e à interferência em rotas migratórias de aves.

c) Energia solar: captada diretamente da radiação solar e convertida em energia térmica ou elétrica. A conversão em energia elétrica ocorre por meio de sistemas fotovoltaicos (conversão direta via efeito fotoelétrico) ou sistemas heliotérmicos (conversão indireta via aquecimento de fluidos). Apresenta mínimo impacto ambiental operacional, embora a fabricação dos painéis envolva materiais potencialmente tóxicos.

d) Biomassa: obtida a partir da matéria orgânica de origem vegetal ou animal, como resíduos agrícolas, florestais, industriais e urbanos, além de culturas energéticas dedicadas. Inclui biocombustíveis líquidos (etanol, biodiesel), gasosos (biogás) e sólidos (lenha, carvão vegetal). Sua sustentabilidade depende principalmente das práticas de manejo e da eficiência na conversão energética.

e) Energia geotérmica: aproveitamento do calor proveniente do interior da Terra, especialmente em regiões com atividade vulcânica ou falhas geológicas. De aplicação ainda limitada geograficamente, possui baixo impacto ambiental quando adequadamente gerenciada.

f) Energia dos oceanos: inclui o aproveitamento da energia das marés, das ondas e das diferenças de temperatura entre águas superficiais e profundas. Embora promissora, encontra-se majoritariamente em estágio experimental.

g) Hidrogênio verde: produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis. Embora não seja propriamente uma fonte primária de energia, mas um vetor energético, o hidrogênio verde desponta como alternativa promissora para armazenamento e transporte de energia renovável.

Esta diversidade de fontes renováveis constitui um de seus pontos fortes, permitindo a adaptação a diferentes contextos geográficos, econômicos e sociais. Conforme observa Tolmasquim (2016), a complementaridade entre estas fontes pode contribuir para a estabilidade e confiabilidade dos sistemas energéticos, mitigando o desafio da intermitência característico de algumas energias renováveis.

O setor de energias renováveis tem experimentado um crescimento expressivo nas últimas décadas, impulsionado por fatores como a redução de custos tecnológicos, políticas de incentivo, preocupações ambientais e a busca por segurança energética (REN21, 2022). Esse crescimento manifesta-se tanto na capacidade instalada quanto na participação das fontes renováveis na matriz energética global.

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2023), a capacidade global de geração de energia renovável alcançou 3.372 Gigawatts (GW) ao final de 2022, registrando um aumento recorde de 295 GW em relação ao ano anterior. Este incremento representa uma taxa de crescimento de 9,6%, significativamente superior à média histórica. Ainda mais impressionante é o fato de que as energias renováveis responderam por 83% de toda a capacidade de energia adicionada globalmente naquele ano, evidenciando sua crescente predominância nos investimentos do setor.

Entre as diferentes tecnologias renováveis, a energia solar fotovoltaica liderou a expansão em 2022, com um incremento de 191 GW, seguida pela energia eólica, com 75 GW adicionais. A energia hidrelétrica, embora com crescimento mais modesto de 21 GW (2%), mantém-se como a principal fonte renovável em termos de capacidade instalada global. Outras fontes, como biomassa e geotérmica, apresentaram expansão menos expressiva, com incrementos de 7,6 GW e 181 MW, respectivamente (IRENA, 2023).

Geograficamente, o crescimento das energias renováveis mantém-se desigualmente distribuído. A Ásia, especialmente a China, liderou a expansão em 2022, respondendo por quase metade de toda a nova capacidade adicionada globalmente. A Europa, América do Norte e América do Sul também registraram avanços significativos, embora em escala menor. O Oriente Médio destacou-se pelo

maior crescimento percentual (12,8%), embora partindo de uma base comparativamente modesta (IRENA, 2023).

Essa trajetória ascendente das energias renováveis reflete não apenas avanços tecnológicos e reduções de custo, mas também uma crescente aceitação política e social da necessidade de transição para um sistema energético mais limpo. Como observa Francesco La Camera, diretor-geral da IRENA (2023), "este crescimento recorde contínuo mostra a resiliência da energia renovável em meio à persistente crise energética", evidenciando que a expansão das fontes renováveis não pode mais ser vista como tendência marginal, mas como elemento central da transformação do setor energético global.

O Brasil distingue-se no cenário internacional por sua matriz energética comparativamente limpa, com expressiva participação de fontes renováveis. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2024), as fontes renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) brasileira em 2023, percentual mais de três vezes superior à média mundial, estimada em aproximadamente 15%.

Quando analisamos especificamente a matriz elétrica, o contraste é ainda mais acentuado: 93,1% de toda a eletricidade gerada no Brasil em 2023 proveio de fontes renováveis, estabelecendo um recorde histórico, conforme estudo da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2024). Este desempenho posiciona o país entre os líderes globais em geração renovável de eletricidade.

Essa configuração favorável resulta primordialmente da combinação de condições naturais privilegiadas e de decisões estratégicas tomadas ao longo das últimas décadas. O território brasileiro reúne condições excepcionais para o aproveitamento de diversas fontes renováveis:

a) Recursos hídricos abundantes: o Brasil possui uma das maiores reservas de água doce do planeta, com uma rede hidrográfica extensa e vazões significativas, favorecendo o aproveitamento hidrelétrico. Atualmente, o país conta com 1.351 usinas hidrelétricas que respondem por 56,17% da capacidade instalada, totalizando 109,8 GW (MME, 2023).

b) Energia solar: o Brasil recebe irradiação solar que varia entre 1.500 e 2.500 kWh/m²/ano, superior à de países como Alemanha e França, pioneiros na energia fotovoltaica. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024), o país recebe mais de 2.200 horas de irradiação solar por ano, com potencial teórico de geração estimado em 15 trilhões de MW anuais, caso toda essa irradiação fosse aproveitada.

c) Energia eólica: especialmente nas regiões Nordeste e Sul, o Brasil dispõe de ventos constantes e de qualidade superior. De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2023), o potencial eólico brasileiro estimado é de 500 GW, aproximadamente três vezes superior à capacidade atual de geração do país.

d) Biomassa diversificada: com área territorial extensa e agricultura de grande escala, o Brasil produz volume significativo de resíduos agrícolas, especialmente da cana-de-açúcar, com elevado potencial energético. A biomassa já responde por 16,7 GW de capacidade instalada, distribuídos em 634 plantas (MME, 2023).

Nos últimos anos, observou-se crescimento expressivo das chamadas "novas renováveis", com destaque para a energia eólica e solar fotovoltaica. Entre janeiro e agosto de 2023, a expansão da capacidade instalada da matriz elétrica brasileira foi de 7 GW, dos quais 6,2 GW (89,9%) originaram-se das fontes solar (3 GW) e eólica (3,2 GW), estabelecendo o maior aumento da geração solar e o segundo maior incremento na energia eólica na série histórica do país (MME, 2023).

Apesar deste cenário favorável, o potencial brasileiro para energias renováveis permanece majoritariamente inexplorado.

As perspectivas para o futuro indicam continuidade na expansão das fontes renováveis na matriz energética brasileira. De acordo com projeções do MME, estima-se uma expansão de 30% no total da oferta interna de energia nos próximos 10 anos, mantendo-se a participação das energias renováveis próxima a 48%. Para a matriz elétrica, projeta-se que a participação de fontes renováveis continue acima de 80% até 2030, podendo alcançar 85% em 2050 (MME, 2021).

O desafio brasileiro não é tanto a transição para uma matriz renovável – já parcialmente conquistada – mas sim a expansão, diversificação e integração eficiente das diferentes fontes renováveis, de modo a garantir segurança energética e sustentabilidade a longo prazo (TOLMASQUIM, 2016).

A expansão das energias renováveis, embora promissora e necessária, enfrenta desafios significativos que precisam ser adequadamente considerados e endereçados. Concomitantemente, surgem oportunidades substanciais que podem catalisar esta transição energética. Compreender este conjunto de fatores restritivos e impulsionadores é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de ampliação das fontes renováveis.

Entre os principais desafios técnicos para a ampliação das energias renováveis, destaca-se a intermitência característica de algumas fontes, como a solar e a eólica, cuja geração depende de condições climáticas variáveis (Pereira et

al., 2012). Este aspecto impõe a necessidade de soluções de armazenamento energético e de sistemas de backup, elevando a complexidade e o custo dos projetos.

A questão da infraestrutura de transmissão constitui outro desafio significativo, especialmente em países de dimensões continentais como o Brasil. Frequentemente, as áreas com maior potencial renovável (como o Nordeste brasileiro para energia eólica) encontram-se distantes dos principais centros consumidores, demandando investimentos expressivos em linhas de transmissão (EPE, 2019).

Do ponto de vista econômico, embora os custos das tecnologias renováveis tenham declinado substancialmente nas últimas décadas, os investimentos iniciais ainda podem ser elevados, especialmente para pequenos produtores e comunidades de baixa renda (IRENA, 2021).

Adicionalmente, em muitos contextos, permanecem distorções nos mecanismos de precificação que não internalizam adequadamente as externalidades negativas dos combustíveis fósseis, criando desvantagens competitivas para as fontes renováveis (SANTOS, 2015).

No caso específico do Brasil, a Helexia (2025) identifica como desafios adicionais os custos elevados e a burocracia associada à implantação de sistemas de energia renovável, especialmente solar e eólica. Os processos de licenciamento ambiental e outras autorizações governamentais podem ser demorados e complexos, desestimulando investimentos no setor.

A análise da matriz energética brasileira revela um cenário de significativa participação de fontes renováveis, posicionando o país de forma diferenciada no contexto internacional. A evolução recente, com o crescimento expressivo de fontes como a solar e a eólica, demonstra o potencial de avanço em direção a um modelo energético mais sustentável.

No entanto, persistem desafios importantes para a consolidação da transição energética no Brasil. A forte dependência de combustíveis fósseis em setores como transportes e indústria, as vulnerabilidades do sistema hidrelétrico diante das mudanças climáticas, e as limitações de infraestrutura para a expansão de fontes renováveis constituem obstáculos que demandam respostas coordenadas do poder público e da sociedade.

O arcabouço jurídico ambiental brasileiro oferece instrumentos relevantes para orientar esta transição, fundamentados em princípios como o desenvolvimento sustentável, a precaução e a participação pública. A efetiva implementação destes

instrumentos requer, contudo, uma governança energética que integre as dimensões econômica, social e ambiental, em uma perspectiva de longo prazo.

Os avanços tecnológicos, a redução de custos das energias renováveis e a crescente conscientização ambiental da sociedade abrem oportunidades para a aceleração da transição energética. A capacidade do Brasil de aproveitar estas oportunidades dependerá, em grande medida, da qualidade das políticas públicas e dos arranjos institucionais que serão desenvolvidos nos próximos anos.

Finalmente, é importante ressaltar que a transição para uma matriz energética mais sustentável não é apenas uma questão técnica ou econômica, mas também uma questão ética e política, que envolve escolhas sobre o modelo de desenvolvimento desejado e a distribuição de seus benefícios e custos entre diferentes grupos sociais e gerações. O direito ambiental, ao estabelecer princípios e instrumentos para a proteção do meio ambiente e a promoção da sustentabilidade, oferece um referencial fundamental para orientar estas escolhas.

CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo central investigar o papel do hidrogênio verde no contexto da ordem econômica constitucional brasileira, buscando compreender de que forma esta tecnologia emergente atende ao princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988.

Ao longo do trabalho, analisamos aspectos técnicos, jurídicos, econômicos e ambientais do hidrogênio verde, contextualizado na urgência da transição energética frente aos desafios das mudanças climáticas globais.

A trajetória da pesquisa, fundamentada no método hipotético-dedutivo e na abordagem qualitativa, permitiu uma análise abrangente da questão, evidenciando a complexidade e a multidisciplinaridade inerentes ao tema. Partimos da contextualização do hidrogênio verde, examinamos a Constituição Econômica em sua relação com a sustentabilidade, e aprofundamos a compreensão das mudanças climáticas e do potencial das energias renováveis na matriz energética brasileira. O percurso investigativo nos permitiu confirmar as hipóteses inicialmente formuladas, demonstrando a contribuição significativa do hidrogênio verde para a concretização do princípio constitucional da defesa do meio ambiente, elemento estruturante da ordem econômica nacional.

A primeira hipótese proposta - de que o hidrogênio verde contribui para a redução de gases de efeito estufa, promovendo uma economia de baixo carbono - mostrou-se verdadeira à luz das evidências técnicas e científicas analisadas. O hidrogênio verde, obtido exclusivamente por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, destaca-se entre as diferentes classificações de hidrogênio (marrom, cinza, azul) como a única opção com potencial para emissões próximas a zero ao longo de todo seu ciclo de vida. Essa característica distintiva do hidrogênio verde foi confirmada por diversos estudos técnicos abordados nesta dissertação, que apontam para seu potencial de redução de emissões em setores de difícil descarbonização.

Conforme destacado no primeiro capítulo, o hidrogênio verde pode ser utilizado como combustível em processos industriais de alta temperatura, como vetor energético para armazenamento de energia renovável excedente, e como insumo em células de combustível para transporte de longa distância, entre outras aplicações.

Em todos os casos, o produto da utilização do hidrogênio é essencialmente água, sem a emissão direta de gases de efeito estufa, o que o diferencia fundamentalmente dos combustíveis fósseis convencionais. A Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), conforme documentado no primeiro capítulo, projeta que o hidrogênio verde ocupará papel central na transição energética global, sendo considerado essencial para o cumprimento das metas de limitação do aquecimento global a 1,5°C, estabelecidas no Acordo de Paris. A projeção corrobora a primeira hipótese, evidenciando o reconhecimento internacional do potencial do hidrogênio verde como instrumento de mitigação climática. A confirmação dessa hipótese adquire relevância especial quando consideramos os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil em matéria climática.

Como analisado no terceiro capítulo, o país comprometeu-se, no âmbito do Acordo de Paris, a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e em 43% até 2030, em relação aos níveis de 2005. Mais recentemente, na COP29 em 2024, o Brasil apresentou metas ainda mais ambiciosas, comprometendo-se a reduzir suas emissões líquidas entre 59% e 67% até 2035. O desenvolvimento do hidrogênio verde configura-se, portanto, como estratégia relevante para o cumprimento destes compromissos, contribuindo para a transição para uma economia de baixo carbono.

É importante ressaltar que a contribuição do hidrogênio verde para a redução de emissões de GEE vai além dos impactos diretos de sua utilização. Como vetor energético, o hidrogênio verde permite o aproveitamento otimizado de fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, possibilitando o armazenamento do excedente energético produzido em períodos de alta geração para utilização posterior, quando a produção for insuficiente. A capacidade de armazenamento e transporte de energia renovável potencializa a expansão destas fontes na matriz energética, amplificando os benefícios climáticos associados à substituição de combustíveis fósseis.

Ademais, o hidrogênio verde apresenta vantagens específicas para a descarbonização de setores considerados de difícil eletrificação, como a siderurgia, a produção de fertilizantes, o transporte marítimo e a aviação. Os setores, que respondem por parcela significativa das emissões globais de GEE, encontram no hidrogênio verde uma alternativa viável para a redução de sua pegada de carbono. No caso da siderurgia, por exemplo, o hidrogênio verde pode substituir o coque (derivado do carvão mineral) como agente redutor na produção de ferro e aço, eliminando uma fonte significativa de emissões. A redução de emissões de GEE

alinha-se diretamente ao princípio constitucional da defesa do meio ambiente, estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal. Como analisado no segundo capítulo, esse princípio não se limita à proteção localizada de recursos naturais, mas abrange a prevenção de danos ambientais globais, incluindo aqueles resultantes das mudanças climáticas. Ao contribuir para a mitigação do aquecimento global, o hidrogênio verde configura-se como instrumento de concretização desse postulado constitucional, promovendo um desenvolvimento econômico ambientalmente qualificado.

A segunda hipótese da dissertação - de que o hidrogênio verde possibilita a diversificação e ampliação da matriz energética brasileira, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis - também se mostrou verdadeira a partir da análise realizada. Os dados e estudos examinados ao longo da pesquisa evidenciam o potencial transformador do hidrogênio verde para a matriz energética nacional, tanto em termos de diversificação de fontes quanto de aplicações energéticas. Como detalhado no terceiro capítulo, o Brasil possui condições naturais excepcionalmente favoráveis para a produção de hidrogênio verde, incluindo abundância de recursos renováveis - hídricos, eólicos e solares -, que podem fornecer a eletricidade necessária para o processo de eletrólise. A matriz elétrica brasileira, predominantemente renovável (89,2% em 2023, segundo a ANEEL), constitui base sólida para a produção de hidrogênio verde em larga escala, com baixa pegada de carbono. De fato, a combinação desses fatores posiciona o Brasil como potencial protagonista no mercado global emergente de hidrogênio verde, com capacidade não apenas para atender à demanda interna, mas também para se tornar importante exportador.

Conforme destacado no primeiro capítulo, o Brasil apresenta vantagens competitivas significativas para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde, incluindo potencial excepcional de fontes renováveis, modelo regulatório e econômico favorável à expansão da geração elétrica, e infraestrutura portuária oceânica estratégica para exportação. Os diversos Memorandos de Entendimento mencionados no capítulo primeiro, que propõem investimentos substanciais em hidrogênio verde no Porto de Pecém (CE), Polo Industrial de Camaçari (BA), Porto do Açu (RJ), Porto de Suape (PE) e Rio Grande do Norte, evidenciam o reconhecimento das vantagens competitivas pelos agentes econômicos nacionais e internacionais. Os investimentos potenciais não apenas contribuirão para a diversificação da matriz energética brasileira, mas também para o desenvolvimento regional e a geração de empregos qualificados.

A diversificação da matriz energética proporcionada pelo hidrogênio verde manifesta-se não apenas na ampliação das fontes primárias de energia, mas também na multiplicidade de aplicações do vetor energético. Como analisado ao longo da dissertação, o hidrogênio verde pode ser utilizado como combustível em células a combustível para geração de eletricidade, como insumo em processos industriais, como combustível para veículos (especialmente de carga pesada e longa distância), e como meio de armazenamento de energia, entre outras aplicações. Com efeito, a versatilidade de usos potencializa sua contribuição para a redução da dependência de combustíveis fósseis em diversos setores da economia. No setor de transportes, por exemplo, o hidrogênio verde pode complementar a eletrificação direta em segmentos onde as baterias apresentam limitações, como no transporte de cargas pesadas, marítimo e ferroviário. Na indústria, pode substituir o gás natural e outros combustíveis fósseis em processos de alta temperatura, contribuindo para a descarbonização de setores como o cerâmico, o cimenteiro e o metalúrgico.

A confirmação desta segunda hipótese adquire relevância especial quando consideramos o princípio constitucional da soberania nacional, também estabelecido no art. 170 da Constituição Federal como elemento norteador da ordem econômica. A diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis importados contribuem para o fortalecimento da autonomia energética nacional, elemento crucial da soberania em um contexto geopolítico marcado por tensões e incertezas relacionadas ao acesso a recursos energéticos. Adicionalmente, a consolidação do Brasil como protagonista na produção e exportação de hidrogênio verde pode fortalecer a posição do país nas negociações internacionais sobre clima e energia, conferindo-lhe maior capacidade de influência na definição de padrões, normas e acordos relacionados à transição energética global. Essa dimensão geopolítica, analisada no primeiro capítulo, evidencia a relevância não apenas como tecnologia de mitigação climática, mas também como elemento estratégico para a inserção internacional do Brasil na nova economia de baixo carbono que se delineia.

A confirmação de ambas as hipóteses permite responder afirmativamente ao problema de pesquisa central: o hidrogênio verde atende ao princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988, tanto por sua contribuição à redução de emissões de GEE quanto por seu potencial de diversificação da matriz energética brasileira. A conclusão fundamenta-se na compreensão multidimensional da sustentabilidade, que abrange aspectos

ambientais, econômicos, sociais e intergeracionais, todos contemplados na análise realizada ao longo da dissertação.

Na dimensão ambiental, o hidrogênio verde contribui para a mitigação das mudanças climáticas, a preservação da qualidade do ar (pela ausência de emissões de poluentes como material particulado, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre) e a conservação de recursos naturais não renováveis. Na dimensão econômica, promove a inovação tecnológica, a diversificação da matriz energética e a criação de novas cadeias produtivas. Na dimensão social, potencializa a geração de empregos qualificados, o desenvolvimento regional (especialmente em áreas com alto potencial renovável) e a melhoria da qualidade de vida. Na dimensão intergeracional, contribui para a preservação das condições climáticas e ambientais para as futuras gerações, alinhando-se ao conceito de desenvolvimento sustentável consagrado no Relatório Brundtland e incorporado implicitamente ao texto constitucional.

A análise realizada ao longo da dissertação evidenciou, contudo, que a plena realização do potencial do hidrogênio verde como vetor de sustentabilidade no Brasil depende da superação de desafios técnicos, econômicos, regulatórios e institucionais significativos. Entre estes desafios, destacam-se os custos ainda elevados da tecnologia, a necessidade de investimentos substanciais em infraestrutura e a ausência de um marco regulatório específico e abrangente. Os custos da produção, embora em trajetória declinante, ainda superam consideravelmente os do hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis. Como analisado no primeiro capítulo, o custo dos eletrolisadores e da eletricidade renovável representa componente significativo do custo total do hidrogênio verde. Projeções internacionais indicam, contudo, que o contínuo avanço tecnológico e o aumento da escala de produção deverão reduzir substancialmente estes custos nas próximas décadas, tornando-o progressivamente mais competitivo.

A infraestrutura necessária para a produção, armazenamento, transporte e distribuição do hidrogênio representa outro desafio significativo. O desenvolvimento desta infraestrutura requer investimentos vultosos e planejamento de longo prazo, especialmente considerando as características físico-químicas do hidrogênio, que exigem materiais e técnicas específicas para seu manuseio seguro. A adaptação da infraestrutura existente de gás natural para acomodar misturas com hidrogênio, conforme proposto no Projeto de Lei nº 725/2022, representa alternativa intermediária promissora, mas ainda insuficiente para o pleno desenvolvimento de uma economia específica da tecnologia.

No âmbito regulatório, embora este não seja um ponto elementar de investigação do tema proposto, por uma questão de recorte metodológico, mas importante para a compreensão dos desafios enfrentados, foi abordado apenas com o objetivo de demonstrar que a ausência de um marco específico para o hidrogênio verde constitui obstáculo relevante. Como destacado no primeiro capítulo, diferentemente de outros países, o Brasil ainda não estabeleceu uma estratégia específica para regulação, produção, consumo, transporte, armazenamento e exportação do hidrogênio, integrando-o adequadamente ao planejamento e à matriz energética nacional.

Superados esses desafios, o hidrogênio verde apresenta potencial para se consolidar como elemento central da transição energética brasileira, contribuindo significativamente para a concretização do princípio constitucional da defesa do meio ambiente no contexto da ordem econômica, que se manifesta nas múltiplas dimensões da sustentabilidade, conforme analisado ao longo da dissertação.

A análise realizada permite identificar implicações teóricas e práticas relevantes, tanto para o campo jurídico quanto para as políticas públicas relacionadas à energia e ao meio ambiente.

No plano teórico, a dissertação contribui para a compreensão da relação entre inovações tecnológicas sustentáveis, como o hidrogênio verde, e princípios constitucionais, especialmente o da defesa do meio ambiente no contexto da ordem econômica. Essa relação evidencia a abertura do texto constitucional às transformações tecnológicas e sociais, desde que orientadas pelos valores fundamentais consagrados na Constituição. A pesquisa contribui também para a compreensão da multidimensionalidade da sustentabilidade como princípio constitucional. Ao analisar as diversas facetas, evidencia-se a complexidade do conceito de sustentabilidade, que transcende a mera preservação de recursos naturais para abranger a promoção de um modelo de desenvolvimento qualitativamente distinto, capaz de harmonizar crescimento econômico, justiça social e equilíbrio ecológico.

No plano prático, a dissertação oferece subsídios para a formulação de políticas públicas e marcos regulatórios voltados ao desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil. A análise dos desafios técnicos, econômicos e institucionais, bem como das experiências internacionais relevantes, pode orientar a construção de um arcabouço normativo e institucional adequado à realidade brasileira, capaz de promover o desenvolvimento sustentável desta tecnologia. Entre as diretrizes que emergem da análise realizada, destacam-se a necessidade de políticas de incentivo

à pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias relacionadas ao hidrogênio verde; o estabelecimento de padrões e normas técnicas para produção, armazenamento, transporte e utilização segura do hidrogênio; a implementação de mecanismos de certificação de origem que garantam a sustentabilidade ambiental do hidrogênio produzido; e a integração do hidrogênio verde ao planejamento energético nacional de longo prazo.

Adicionalmente, a pesquisa evidencia a importância de instrumentos econômicos, como incentivos fiscais, linhas de financiamento específicas para viabilizar investimentos, de modo que esses instrumentos podem acelerar a transição para uma economia de baixo carbono, internalizando as externalidades ambientais negativas dos combustíveis fósseis e criando condições mais equitativas de competição para as tecnologias limpas.

Ao mesmo tempo, a pesquisa aponta para a necessidade de uma abordagem integrada e coerente das políticas energética, ambiental, industrial e de ciência e tecnologia relacionadas ao hidrogênio verde, sendo que essa integração pode potencializar sinergias entre diferentes objetivos de políticas públicas, como a redução de emissões de GEE e a promoção da segurança energética. É importante ressaltar que o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil não deve ser visto como solução isolada para os desafios da sustentabilidade energética, mas como componente de uma estratégia mais ampla e diversificada de transição para uma economia de baixo carbono, deve incluir, também, outras fontes renováveis, como a solar, a eólica e a biomassa.

A complementaridade entre diferentes tecnologias e abordagens é fundamental para garantir a resiliência, a eficiência e a equidade da transição energética. O hidrogênio verde, em particular, pode desempenhar papel estratégico na integração de diferentes fontes renováveis, no armazenamento de energia e na descarbonização de setores de difícil eletrificação, complementando outras soluções sustentáveis.

O contexto internacional da transição energética, marcado pela crescente competição por liderança tecnológica e posicionamento estratégico nos mercados emergentes de energia limpa, impõe desafios adicionais ao desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil. Como analisado no primeiro capítulo, países como China, Japão e nações europeias já desenvolveram vantagens competitivas iniciais na fabricação de equipamentos para a economia do hidrogênio. O fortalecimento da capacidade tecnológica nacional neste campo configura-se, portanto, como desafio

prioritário para garantir que o Brasil capture parcela significativa do valor agregado associado à cadeia produtiva do hidrogênio verde.

Ao mesmo tempo, o Brasil pode aproveitar a oportunidade representada pelo hidrogênio verde para promover uma "industrialização verde", atraindo investimentos e indústrias de uso energético intensivo, com base em suas vantagens competitivas em termos de recursos renováveis. A dimensão internacional do desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil manifesta-se também na necessidade de cooperação tecnológica e financeira com outros países e organismos multilaterais. Como destacado ao longo da dissertação, a modelagem do arcabouço normativo internacional para o mercado de hidrogênio verde apresenta-se como elemento decisivo para determinar se esta transição resultará em competição geopolítica acirrada ou em uma nova era de cooperação internacional aprimorada. O Brasil, como potencial protagonista neste mercado emergente, tem oportunidade de influenciar positivamente essa modelagem, promovendo princípios de cooperação, transferência de tecnologia e desenvolvimento sustentável.

A análise realizada ao longo da dissertação evidencia, assim, o potencial transformador do hidrogênio verde para a concretização do princípio constitucional da defesa do meio ambiente no contexto da ordem econômica brasileira. As evidências técnicas, econômicas e jurídicas examinadas confirmam as hipóteses inicialmente propostas, demonstrando que o hidrogênio verde contribui significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética nacional, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

O caminho a ser percorrido é complexo e multifacetado, envolvendo dimensões tecnológicas, econômicas, sociais, ambientais e geopolíticas interconectadas. A orientação do percurso pelos princípios constitucionais que regem a ordem econômica, especialmente a defesa do meio ambiente, a soberania nacional, a função social da propriedade e a redução das desigualdades regionais e sociais, mostra-se fundamental para garantir que o desenvolvimento do hidrogênio verde contribua efetivamente para a construção de um modelo de desenvolvimento sustentável no Brasil.

Este estudo, ao analisar o hidrogênio verde sob a perspectiva do princípio constitucional da sustentabilidade, busca contribuir para o esforço coletivo de transição para uma economia de baixo carbono, oferecendo subsídios teóricos e práticos para a compreensão e orientação dos processos. O hidrogênio verde, conforme evidenciado pela pesquisa realizada, apresenta-se como tecnologia

promissora para a concretização dos valores constitucionais relacionados à proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável, merecendo atenção prioritária na formulação de políticas públicas e marcos regulatórios voltados à transição energética.

Nesse sentido, a pesquisa, evidentemente, não pretende esgotar o tema, mas contribuir para um debate informado e fundamentado sobre o papel do hidrogênio verde na transição para uma economia sustentável no Brasil. Pesquisas futuras poderão aprofundar aspectos específicos abordados, como o detalhamento dos marcos regulatórios necessários, a análise de viabilidade econômica em diferentes contextos regionais, e o estudo dos impactos socioambientais potenciais da implementação em larga escala.

O desenvolvimento de uma economia baseada no hidrogênio verde no Brasil, orientada pelo princípio constitucional da defesa do meio ambiente e pelos demais valores que fundamentam nossa ordem econômica, representa oportunidade histórica para a consolidação de um novo paradigma de desenvolvimento, capaz de harmonizar crescimento econômico, preservação ambiental, justiça social e equidade intergeracional, o que se faz urgente e necessário.

Em síntese, a dissertação demonstrou que o hidrogênio verde atende ao princípio da sustentabilidade estabelecido no art. 170, VI, da Constituição Federal de 1988, tendo confirmado as hipóteses de que contribui para a redução de gases de efeito estufa, com a promoção de uma economia de baixo carbono, e de modo a possibilitar a diversificação e ampliação da matriz energética brasileira, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Essa inferência, fundamentada em evidências técnicas, econômicas e jurídicas, ressalta o potencial transformador do hidrogênio verde como vetor de sustentabilidade e desenvolvimento econômico, sempre pautando pela garantia de um ambiente equilibrado para presentes e futuras gerações, cumprindo, assim, de modo efetivo, os postulados da Constituição Econômica do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANCHES, S. **A era do imprevisto: a grande transição do século XXI**. São Paulo: Companhia das Letras, 2020.
- AMORIM, Letícia Balsamão. **A distinção entre regras e princípios segundo Robert Alexy: esboço e críticas**. Revista de Informação Legislativa, Brasília, a. 42, n. 165, p. 123-134, 2005.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>Acesso em: 15, abr. 2025.
- ANTUNES, Paulo de Bessa. **Direito Ambiental**. 19ª ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- ANTUNES, Paulo de Bessa. **Direito Ambiental**. 22. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- Aratangy, G. B. (2007). **Protocolo de Quioto: uma aplicação da teoria da ação coletiva**. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/05add3a3-d999-4c88-b3e7-daff9f4a6741>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018.
- AYALA, Patryck de Araújo. **Direito fundamental ao meio ambiente e a proibição de regresso nos níveis de proteção ambiental na Constituição brasileira**. In: SARLET, Ingo Wolfgang (Org.). Estado Socioambiental e Direitos Fundamentais. 3. ed. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2018.
- A Plataforma SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Conheça as emissões de gases de efeito estufa do Brasil**. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- BARBOSA, L.; COSTA, H. **Biocombustíveis e descarbonização da matriz energética brasileira**. Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo, v. 9, n. 1, p. 55-76, 2023.
- BARROSO, A. M. R. et al. **Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis**. Revista Arte, Ciência e Tecnologia, 2021.
- BARROSO, Luís Roberto. **Curso de Direito Constitucional Contemporâneo: os conceitos fundamentais e a construção do novo modelo**. 7. ed. São Paulo: Saraiva, 2018.
- BENJAMIN, Antonio Herman. **Constitucionalização do ambiente e ecologização da Constituição brasileira**. In: CANOTILHO, José Joaquim Gomes; LEITE, José

Rubens Morato (Org.). *Direito Constitucional Ambiental Brasileiro*. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

BERCOVICI, Gilberto. **Constituição Econômica e Desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: Almedina, 2022.

BERMANN, Célio. **Crise Ambiental e as Energias Renováveis**. *Ciência e Cultura*, v. 60, p. 20-29, 2012.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. **Dispõe sobre a política energética nacional**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 7 ago. 1997.

BRASIL. Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. **Dispõe sobre a educação ambiental**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 abr. 1999.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 out. 2001.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 29 abr. 2002.

BRASIL. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. **Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 mar. 2004.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 mai. 2012.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 dez. 2017.

BRASIL. Lei nº 14.829, de 13 de dezembro de 2024. **Estabelece as bases para um mercado regulado de carbono no Brasil**. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 dez. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Descarbonização, um processo que pode ajudar o meio ambiente**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/descarbonizacao-um-processo-que-pode-ajudar-o-meio-ambiente>. Acesso em: 05 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Comissão Especial sobre transição energética e produção de hidrogênio verde**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/evento-legislativo/74909>. Acesso em: 15 mai. 2025.

BRASIL. **Rumo à Cop30**. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/agenda-internacional/missoes-internacionais/cop28/cop-30-no-brasil>. Acesso em: 22 mai. 2025.

CANOTILHO, José Joaquim Gomes. **O princípio da sustentabilidade como princípio estruturante do Direito Constitucional**. Revista de Estudos Politécnicos, v. 8, n. 13, p. 7-18, 2010.

CARDOSO, Diego Brito. **Colisão de direitos fundamentais, ponderação e proporcionalidade na visão de Robert Alexy**. Revista Digital Constituição e Garantia de Direitos, v. 9, n. 1, p. 137-155, 2016.

CARNEIRO, C. C. **Descarbonização no Brasil é uma realidade que mira novas tecnologias e áreas de exploração**. Jornal da USP, 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/descarbonizacao-no-brasil-e-uma-realidade-que-mira-em-novas-tecnologias-e-areas-de-exploracao/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Matriz energética brasileira se destaca no cenário mundial por sua renovabilidade**. 2024. Disponível em: <https://energialivre.cemig.com.br/blog/matriz-energetica-brasileira-mundial-renovabilidade/>. Acesso em: 12 set. 2024.

DERANI, Cristiane. **Direito Ambiental Econômico**. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2019.

DUBEUX, R. **Mercado de carbono no Brasil: potencialidades e desafios**. Revista de Direito Ambiental, v. 28, n. 3, p. 201-225, 2023.

DUTRA, Ricardo Marques. **Energia e Direito: Perspectivas para um diálogo de saberes**. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2019.

ENEL. **O futuro do hidrogênio verde**. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/midias/news/2022/05/informe-irena-hidrogeno>. Acesso em 15 jun. 2024.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 05 ago. 2024.

EPE. **Relatório final do balanço energético nacional**. 2021. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/energia/epe-divulga-relatorio-final-do-balanco-energetico-nacional-2021/>. Acesso em: 10 mai. 2025.

EXAME. **Brasil investiu US\$ 34,8 bilhões em transição energética em 2023.** 2024. Disponível em: <https://exame.com/esferabrasil/brasil-investiu-us-348-bilhoes-em-transicao-energetica-em-2023/>. Acesso em: 05 mai. 2025.

FGV Energia. **Dados - Matriz Energética.** 2020. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica>. Acesso em: 04 nov. 2024.

FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro.** 19ª ed. São Paulo: Saraiva, 2019.

FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro.** 20. ed. São Paulo: Saraiva, 2020.

FREITAS, G. M. T. **Hidrogênio verde: estudo de caso sobre o potencial brasileiro como exportador para união europeia utilizando programação linear.** 2022. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/26070>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GNPW Group. **Matriz energética brasileira: entenda a evolução ao longo dos anos.** 2024. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/mercado-de-energia/matriz-energetica-brasileira-entenda-a-evolucao-ao-longo-dos-anos/>. Acesso em: 10 mar. 2025.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energias Renováveis e Descarbonização no Brasil.** São Paulo: Blucher, 2020.

GRAU, Eros Roberto. **A Ordem Econômica na Constituição de 1988.** 20. ed. São Paulo: Malheiros, 2022.

Gullo, M. F. (2012). **Protocolo de Quioto e o comércio internacional dos créditos de carbono no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo: oportunidades, possibilidades e perspectivas para o Brasil.** Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7a697c34-eeca-44d3-861d-dc11335fc57d>. Acesso em: 18 out. 2024.

Hisamoto, B. H. T. (2022). A ambição climática sob o Acordo de Paris: as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e a governança híbrida. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/101/101131/tde-29082022-162920/pt-br.php>. Acesso em: 18 out. 2024.

IBERDROLA. **Princípios e ações regulatórias da descarbonização energética que contribuem para um marco sustentável.** 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/transicao-energetica/descarbonizacao-economia-principios-acoes-regulacao>. Acesso em: 28 ago. 2024.

IRENA - International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2019.** Abu Dhabi: IRENA, 2019. Disponível em:

https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf. Acesso em: 24 set. 2024.

KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. Disponível em: <https://www.usp.br/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/pt-br.php>. Acesso em: 24 set. 2025.

Lehmen, A. (2006). **Mudança do clima e direito: uma abordagem jurídica do mecanismo de desenvolvimento limpo criado pelo protocolo de Quioto e do mercado de créditos de carbono**. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12725>. Acesso em: 19 jan. 2025.

LEITE, J. R. M.; AYALA, P. A. **Dano Ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial**. 8. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2020.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito Ambiental Brasileiro**. 27. ed. São Paulo: Malheiros, 2019.

MACHADO, P. A. L. **Direito Ambiental Brasileiro**. 29. ed. São Paulo: Malheiros, 2021.

Magalhães, A. S. (2013). **Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa**. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/AMSA-9GXQ2U>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MARQUES, D. Secretária especial de Produtividade e Competitividade do Ministério da Economia. Mercado regulado brasileiro de carbono. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/novembro/regulamentacao-do-mercado-de-carbono-no-brasil-passa-na-camara-e-segue-para-sancao>. Acesso em: 10 abr. 2025.

MENDES, Gilmar Ferreira; BRANCO, Paulo Gustavo Gonet. **Curso de Direito Constitucional**. 17. ed. São Paulo: Saraiva, 2022.

MILARÉ, É. **Direito do Ambiente**. 13. ed. São Paulo: Thomson Reuters Brasil, 2020.

Monzoni, M., & Biderman, R. (2010). **Propostas empresariais de políticas públicas para uma economia de baixo carbono no Brasil: energia, transporte e agropecuária**. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/items/83a1f086-ce74-45e1-a898-dd3b54a85ebb>. Acesso em: 03 ago. 2024.

Monzoni, M. (2011). **Propostas empresariais de políticas públicas para uma economia de baixo carbono no Brasil: processos industriais e tratamento de resíduos**. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em:

<https://repositorio.fgv.br/items/82483201-7cfa-47fa-8abf-e7fd02568968>. Acesso em: 04. ago. 2024.

MORAES, Alexandre de. **Direito Constitucional**. 37. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MOTTA, R. S. **Instrumentos econômicos para a gestão ambiental no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA, 2022.

NAÇÕES UNIDAS. BRASIL. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 28 jun. 2025.

NUSDEO, Fábio. **Curso de Economia: introdução ao Direito Econômico**. 10. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2018.

NUSDEO, A. M. O. **Pagamento por Serviços Ambientais: do debate de política ambiental à implementação jurídica**. In: LAVRATTI, P.; TEJEIRO, G. (Orgs.). **Direito e Mudanças Climáticas**. São Paulo: Instituto O Direito por um Planeta Verde, 2018.

OLIVA JÚNIOR, José Roberto. **Hidrogênio Verde, Perspectivas e Regulamentação no Brasil**. Artigo. In: Revista Brasil Alemanha, edição outubro de 2021.

Oliveira, S. A. de. (2023). **Sustentabilidade, economia e segurança: explorando a transição do Brasil para um futuro energético baseado em energias hidrelétrica, eólica e solar**. Disponível em: <https://www.repositorio.unb.br/handle/10482/49930>. Acesso em: 15 jan. 2025.

PAIVA, S. S. M. **Produção de hidrogênio verde ambientalmente sustentável**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/b9606ba8-548c-4a86-a91d-fac327e5a1d6>. Acesso em: 13 ago. 2024.

PEREIRA E SILVA, S. T. **Direito Ambiental Internacional: emergência, obrigações e responsabilidades**. 4. ed. Belo Horizonte: Del Rey, 2019.

PERIM, M. A. **Energias renováveis e incentivos fiscais no Brasil**. *Revista de Direito Ambiental*, v. 27, n. 2, p. 145-168, 2022.

PUCRS. **Energia do futuro? Entenda o que é hidrogênio verde**. 2022. Disponível em: <https://portal.pucrs.br/noticias/inovacao/hidrogenio-verde/>. Acesso em: 05 abr. 2025.

REI, F. A. **Contribuição do Acordo de Paris para a Governança Global do Clima**. In: MENEZES, W. (Org.). **Direito Internacional no cenário contemporâneo**. Curitiba: Juruá, 2019.

Roda Viva/André Corrêa do Lago. 31/03/2025. **A 30ª Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas – COP30**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=mvzAXChSN_0. Acesso em: 22 mai. 2025.

- SABBAG, B. K. **Governança Climática e Sistema Nacional de Políticas sobre Mudança do Clima**. In: GRANZIERA, M. L. M.; REI, F. (Orgs.). *Direito Ambiental Internacional: avanços e retrocessos*. São Paulo: Atlas, 2019.
- SANTOS, V. M.; CHAVES, A.C. **O papel do hidrogênio na transição energética mundial e seus desdobramentos no sistema energético brasileiro**. In: GOES, S. (org.). *A geopolítica da energia do século XXI*. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2021. p. 384-392.
- SARLET, Ingo Wolfgang; FENSTERSEIFER, Tiago. **Direito Constitucional Ecológico**. 7. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2021.
- SARLET, I. W.; FENSTERSEIFER, T. **Curso de Direito Ambiental**. 2. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2021.
- SARLET, Ingo Wolfgang. **A eficácia dos direitos fundamentais: uma teoria geral dos direitos fundamentais na perspectiva constitucional**. 12. ed. rev. atual. e ampl. Porto Alegre: Livraria do Advogado, p. 47-52, 2015.
- SEROA DA MOTTA, R. **Instrumentos econômicos para a gestão ambiental: a experiência brasileira e perspectivas futuras**. Rio de Janeiro: IPEA, 2021.
- Silva, B. S. da. (2022). **Mercado de carbono no Brasil: uma abordagem sistêmica para integração de políticas**. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/jspui/handle/10482/43955>. Acesso em: 21 jul. 2024.
- SILVA, José Afonso da. **Curso de Direito Constitucional Positivo**. 43. ed. São Paulo: Malheiros, 2020.
- SMINK, V. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro'**. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>. Acesso em: 15 de abr. 2025.
- SOARES, G. F. S.; JURAS, I. A. G. M. **Sustentabilidade e instrumentos jurídicos**. Brasília: Senado Federal, 2019.
- Souza, J. F. T. de. (2023). **Um futuro de baixo carbono para os setores de aço e cimento no Brasil: avaliação intersetorial sob o olhar da economia circular**. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100136/tde-13032023-141950/pt-br.php>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- TAVARES, André Ramos, FARACO L. G., Marina. **O STF e a Constituição Econômica: casos e funções**. 1 ed. Curitiba: InterSaberes, 2022.
- VEIGA, L. E. T. **Hidrogênio Verde e sua Implementação no Sistema Elétrico Nacional**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/server/api/core/bitstreams/7b00a474-ec0f-4a75-a2a1-6faf660666d5/content>. Acesso em: 11 jan. 2025.

WEDY, G. **O Acordo de Paris e seus principais aspectos normativos**. Revista de Direito Ambiental, v. 23, n. 92, p. 91-111, 2018. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Acordo-de-Paris-Um-guia-para-os-perplexos>. Acesso em: 02 jun. 2024.