

**VIII ENCONTRO VIRTUAL DO
CONPEDI**

**DIREITO AMBIENTAL, AGRÁRIO E
SOCIOAMBIENTALISMO III**

Todos os direitos reservados e protegidos. Nenhuma parte destes anais poderá ser reproduzida ou transmitida sejam quais forem os meios empregados sem prévia autorização dos editores.

Diretoria - CONPEDI

Presidente - Profa. Dra. Samyra Haydêe Dal Farra Naspolini - FMU - São Paulo

Diretor Executivo - Prof. Dr. Orides Mezzaroba - UFSC - Santa Catarina

Vice-presidente Norte - Prof. Dr. Jean Carlos Dias - Cesupa - Pará

Vice-presidente Centro-Oeste - Prof. Dr. José Querino Tavares Neto - UFG - Goiás

Vice-presidente Sul - Prof. Dr. Leonel Severo Rocha - Unisinos - Rio Grande do Sul

Vice-presidente Sudeste - Profa. Dra. Rosângela Lunardelli Cavallazzi - UFRJ/PUCRio - Rio de Janeiro

Vice-presidente Nordeste - Prof. Dr. Raymundo Juliano Feitosa - UNICAP - Pernambuco

Representante Discente: Prof. Dr. Abner da Silva Jaques - UPM/UNIGRAN - Mato Grosso do Sul

Conselho Fiscal:

Prof. Dr. José Filomeno de Moraes Filho - UFMA - Maranhão

Prof. Dr. Caio Augusto Souza Lara - SKEMA/ESDHC/UFMG - Minas Gerais

Prof. Dr. Valter Moura do Carmo - UFERSA - Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Fernando Passos - UNIARA - São Paulo

Prof. Dr. Edinilson Donisete Machado - UNIVEM/UENP - São Paulo

Secretarias

Relações Institucionais:

Prof. Dra. Claudia Maria Barbosa - PUCPR - Paraná

Prof. Dr. Heron José de Santana Gordilho - UFBA - Bahia

Profa. Dra. Daniela Marques de Moraes - UNB - Distrito Federal

Comunicação:

Prof. Dr. Robison Tramontina - UNOESC - Santa Catarina

Prof. Dr. Liton Lanes Pilau Sobrinho - UPF/Univali - Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Lucas Gonçalves da Silva - UFS - Sergipe

Relações Internacionais para o Continente Americano:

Prof. Dr. Jerônimo Siqueira Tybusch - UFSM - Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa Ramos - UFMA - Maranhão

Prof. Dr. Felipe Chiarello de Souza Pinto - UPM - São Paulo

Relações Internacionais para os demais Continentes:

Profa. Dra. Gina Vidal Marcilio Pompeu - UNIFOR - Ceará

Profa. Dra. Sandra Regina Martini - UNIRITTER / UFRGS - Rio Grande do Sul

Profa. Dra. Maria Claudia da Silva Antunes de Souza - UNIVALI - Santa Catarina

Educação Jurídica

Profa. Dra. Viviane Coêlho de Séllos Knoerr - Unicuritiba - PR

Prof. Dr. Rubens Beçak - USP - SP

Profa. Dra. Livia Gaigher Bosio Campello - UFMS - MS

Eventos:

Prof. Dr. Yuri Nathan da Costa Lannes - FDF - São Paulo

Profa. Dra. Norma Sueli Padilha - UFSC - Santa Catarina

Prof. Dr. Juraci Mourão Lopes Filho - UNICHRISTUS - Ceará

Comissão Especial

Prof. Dr. João Marcelo de Lima Assafim - UFRJ - RJ

Profa. Dra. Maria Creusa De Araújo Borges - UFPB - PB

Prof. Dr. Antônio Carlos Diniz Murta - Fumec - MG

Prof. Dr. Rogério Borba - UNIFACVEST - SC

D597

Direito ambiental, agrário e socioambientalismo III [Recurso eletrônico on-line] organização CONPEDI

Coordenadores: Carolina Medeiros Bahia; Francielle Benini Agne Tybusch; Rogério Borba. – Florianópolis: CONPEDI, 2025.

Inclui bibliografia

ISBN: 978-65-5274-188-2

Modo de acesso: www.conpedi.org.br em publicações

Tema: Direito Governança e Políticas de Inclusão

1. Direito – Estudo e ensino (Pós-graduação) – Encontros Nacionais. 2. Direito ambiental. 3. Socioambientalismo. VIII Encontro Virtual do CONPEDI (2; 2025; Florianópolis, Brasil).

CDU: 34



VIII ENCONTRO VIRTUAL DO CONPEDI

DIREITO AMBIENTAL, AGRÁRIO E SOCIOAMBIENTALISMO III

Apresentação

Durante o VIII Encontro Virtual do CONPEDI, o Grupo de Trabalho “DIREITO AMBIENTAL, AGRÁRIO E SOCIOAMBIENTALISMO III” reuniu uma ampla diversidade de estudos que abordam questões centrais como governança ambiental, justiça climática, responsabilidade civil, energias limpas, proteção de comunidades tradicionais e desafios jurídicos contemporâneos. Os trabalhos apresentados refletem a multiplicidade de olhares acadêmicos sobre a crise ecológica global e as possíveis respostas normativas no contexto brasileiro e internacional.

A seguir, apresentam-se os artigos, seus respectivos autores e os objetivos de cada pesquisa, contribuindo para o fortalecimento do diálogo interdisciplinar e da construção de soluções jurídicas sustentáveis.

No artigo “Governança Urbana e Regulação de Áreas Mistas: Proteção de Espaços Verdes e Mediação de Conflitos Socioambientais”, Cristian Kiefer da Silva e Rafaela Cristina Alves Lisboa analisam os desafios da governança urbana em territórios de uso misto, com foco na proteção de áreas verdes e na mediação de conflitos socioambientais cotidianos.

Em “Hidrogênio Verde como Fonte de Energia Sustentável e sua Utilização no Agronegócio Brasileiro”, Marcia Andrea Bühring e Amanda Stringari discutem o potencial do hidrogênio verde como alternativa energética limpa e sua viabilidade técnica e econômica para aplicação no setor agroindustrial do Brasil.

No trabalho “A Preservação Ambiental no Contrato de Arrendamento Rural: Limites e Obrigações Legais”, Marcia Andrea Bühring e Alena do Nascimento Arbo investigam como a legislação brasileira regula os aspectos ambientais desses contratos, propondo uma conciliação entre produção agrícola e sustentabilidade.

O artigo “A Problemática Jurídica da Utilização do Punitive Damage no Processo Coletivo Brasileiro: Um Estudo Crítico do Dano Ambiental no Caso Brumadinho”, de Fabrício Veiga Costa, Fernanda Resende Severino e Barbara Campolina Paulino, propõe uma análise sobre a aplicabilidade de sanções punitivas no processo coletivo ambiental brasileiro, com base no desastre de Brumadinho/MG.

Em “Comunicação de Risco no Plano de Contingência de Santa Maria/RS: Lições Nacionais e Internacionais para Desastres Climáticos”, Francielle Benini Agne Tybusch e Júlia Nobre Colnaghi defendem a importância da comunicação de risco como elemento estratégico na gestão de desastres, com propostas de aprimoramento baseadas em experiências comparadas.

No artigo “Empreendimentos Hidrelétricos e Efeitos Socioeconômicos Locais: A UHE Garibaldi e o Princípio do Poluidor-Pagador em Cerro Negro/SC”, Rogerio Borba e Fernanda Caroline Conrado analisam os impactos socioeconômicos da usina hidrelétrica Garibaldi, à luz do princípio do poluidor-pagador e dos direitos constitucionais à reparação e justiça ambiental.

Em “A Viabilidade da Gestão Compartilhada da Amazônia como Instrumento na Luta contra as Mudanças Climáticas”, Joyciane Ferreira Cavalcante Marques propõe a gestão ambiental compartilhada da Amazônia como modelo alternativo de governança frente à crise climática global, inspirado em experiências europeias.

No artigo “Educação Ambiental para um Futuro Sustentável: Fortalecendo a Cidadania Planetária e Moldando uma Sociedade Consciente”, Diana Sales Pivetta, Roselma Coelho Santana e Samya de Oliveira Sanches ressaltam o papel da educação ambiental, formal e não formal, na formação cidadã voltada à proteção ambiental e justiça social.

Em “Inteligência Artificial, Provas Tecnológicas e Responsabilidade Ambiental: Comentários ao Recurso Especial nº 1.778.729/PA”, Rachel De Paula Magrini Sanches, Deise Marcelino da Silva e Andre Luiz de Paula Magrini analisam a admissibilidade de imagens de satélite como prova judicial em processos de responsabilidade ambiental, com base em decisão do STJ.

O artigo “Aspectos Jurídicos da Energia Nuclear e do Hidrogênio como Fontes Energéticas no Brasil”, de Rodrigo Toledo da Silva Rodrigues e Monique Maria de Oliveira Dall’Acqua, examina o marco regulatório nacional e sua adequação à promoção do desenvolvimento sustentável por meio dessas fontes energéticas.

Em “A Ecosofia e os Instrumentos Jurídicos Financeiros da Gestão Inteligente do Meio Ambiente na Guiné-Bissau: O Fundo Ambiental”, Justo José de Pina discute o papel dos instrumentos financeiros ecológicos no contexto africano, propondo a ecosofia como paradigma para políticas ambientais sustentáveis.

No artigo “Os Desafios e Perspectivas da Sucessão Rural na Região de Tomé-Açu/PA”, Natalia Altieri Santos de Oliveira e Gabrielle Cristina Freitas da Silva exploram os entraves jurídicos, sociais e econômicos da sucessão rural, destacando a necessidade de políticas públicas adequadas à realidade amazônica.

Em “Sucessão Familiar Rural no Direito Brasileiro: Especificidades Jurídicas em Face da Sucessão Civil Tradicional”, Natalia Altieri Santos de Oliveira e Gabrielle Cristina Freitas da Silva comparam os regimes sucessórios rural e urbano, destacando as implicações da sucessão em propriedades agrárias familiares.

O artigo “Gestão de Resíduos de Serviços de Saúde”, de Rivanne Santos Lins e Heron José de Santana Gordilho, avalia o marco legal aplicável ao gerenciamento de resíduos hospitalares, suas interfaces com a Política Nacional de Resíduos Sólidos e os ODS da Agenda 2030.

Em “Transformação e Permanência: A Concentração Fundiária e as Raízes Históricas da Escravidão Contemporânea no Brasil”, Gabriela Ataides Almeida e Eduardo Gonçalves Rocha analisam as continuidades estruturais da escravidão moderna, relacionando-a à concentração fundiária, ausência de fiscalização e vulnerabilidade social.

No trabalho “O PMI como Propulsor de Desenvolvimento da Área Rural via PPP”, Débora Bervig e Julio Mariano Fernandes Praseres exploram o Procedimento de Manifestação de Interesse como ferramenta jurídica de fomento à infraestrutura rural por meio de parcerias público-privadas.

O artigo “Direito Ambiental: Responsabilidade Civil diante da Degradação do Meio Ambiente”, de Julio Mariano Fernandes Praseres e Débora Bervig, trata da responsabilidade civil ambiental à luz da CF/88, abordando as formas de poluição, os mecanismos preventivos e as vias de reparação dos danos causados.

Por fim, no artigo “A Tutela Jurídica do Patrimônio Genético da Pessoa Humana no Brasil: A Constitucionalidade das Pesquisas com Células-Tronco Embrionárias”, Kátia Gattás Corrêa analisa a proteção jurídica do patrimônio genético humano e a constitucionalidade do art. 5º da Lei de Biossegurança (Lei nº 11.105/2005), com foco nos princípios da dignidade humana e legalidade.

Desejamos a todas e todos uma excelente leitura!

Carolina Medeiros Bahia – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Francielle Benini Agne Tybusch – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Rogério Borba – Centro Universitário FACVEST / Centro Universitário Carioca

ASPECTOS JURÍDICOS DA ENERGIA NUCLEAR E DO HIDROGÊNIO COMO FONTES ENERGÉTICAS NO BRASIL

LEGAL ASPECTS OF NUCLEAR ENERGY AND HYDROGEN AS ENERGY SOURCES IN BRAZIL

Rodrigo Toledo da Silva Rodrigues ¹
Monique Maria de Oliveira Dall "Acua" ²

Resumo

A crescente demanda por fontes de energia limpa e segura impulsiona o debate sobre a diversificação da matriz energética global. Neste contexto, o hidrogênio verde e a energia nuclear emergem como alternativas estratégicas para a descarbonização e segurança energética. O presente estudo analisa o marco regulatório brasileiro aplicável a essas duas fontes, avaliando sua suficiência e adequação para promover um desenvolvimento sustentável. A metodologia adotada envolve uma abordagem jurídico-analítica, com revisão de literatura especializada, exame da legislação nacional e comparação com experiências internacionais. Identifica-se que o Brasil possui uma base normativa robusta para a energia nuclear, reforçada pela criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), e que o arcabouço regulatório para o hidrogênio verde avançou significativamente com a promulgação da Lei nº 14.948/2024. Contudo, persistem desafios relacionados à implementação prática das normas, modernização tecnológica e criação de mecanismos econômicos de incentivo. Conclui-se que, embora promissor, o cenário regulatório brasileiro ainda requer aperfeiçoamentos para consolidar sua liderança no setor de energia limpa.

Palavras-chave: Direito ambiental, Energia nuclear, Hidrogênio verde, Sustentabilidade, Transição energética

Abstract/Resumen/Résumé

The growing demand for clean and secure energy sources drives the debate on the diversification of the global energy matrix. In this context, green hydrogen and nuclear energy emerge as strategic alternatives for decarbonization and energy security. This study analyzes the Brazilian regulatory framework applicable to these two energy sources, assessing its sufficiency and adequacy to promote sustainable development. The methodology adopted involves a legal-analytical approach, with a review of specialized literature, examination of national legislation, and comparison with international experiences. It is identified that Brazil has a robust normative base for nuclear energy, strengthened by the creation of the Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), and that the regulatory framework for green hydrogen has significantly advanced with the enactment of Law No. 14,948/2024. However, challenges persist related to the practical implementation of

¹ Mestrando em Direito, Bolsista CAPES modalidade II.

² Mestranda em Direito

regulations, technological modernization, and the creation of economic incentive mechanisms. It is concluded that, although promising, the Brazilian regulatory scenario still requires improvements to consolidate its leadership in the clean energy sector.

Keywords/Palabras-claves/Mots-clés: Environmental law, Nuclear energy, Green hydrogen, Sustainability, Energy transition

INTRODUÇÃO

A transição energética é uma das pautas centrais da agenda internacional voltada ao desenvolvimento sustentável. A crescente preocupação com os impactos das mudanças climáticas e a necessidade de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa impulsionaram governos, empresas e instituições científicas a buscar alternativas energéticas mais limpas, seguras e eficientes. Nesse contexto, o hidrogênio verde e a energia nuclear ganham destaque como potenciais vetores para uma matriz energética menos dependente de combustíveis fósseis e mais compatível com os compromissos ambientais assumidos pelo Brasil e pela comunidade internacional.

O Brasil enfrenta o desafio de diversificar sua matriz energética, reduzindo a dependência de fontes fósseis e ampliando a participação de energias limpas. A energia nuclear, apesar de controversa, é uma fonte de baixa emissão de carbono e alta eficiência (Immich et al., 2023). Já o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, é considerado essencial para a descarbonização de setores industriais e de transporte (Fernandes et al., 2023).

O hidrogênio verde, obtido por meio da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia, apresenta-se como uma solução promissora para setores onde a eletrificação direta é complexa, como o transporte de longa distância e algumas cadeias industriais. Por sua vez, a energia nuclear, apesar dos debates que envolve quanto à segurança e aos resíduos, é reconhecida por sua elevada capacidade de geração contínua com baixa emissão de carbono. Ambas as fontes energéticas, portanto, podem exercer papel estratégico na trajetória rumo à neutralidade climática.

O Brasil, por suas características naturais e técnicas, reúne condições privilegiadas para liderar o desenvolvimento dessas tecnologias. A abundância de recursos renováveis, o domínio do ciclo do combustível nuclear e a infraestrutura científica existente constituem bases sólidas. No entanto, a realização desse potencial depende de um arcabouço jurídico adequado, que proporcione segurança jurídica, estimule investimentos e oriente políticas públicas coerentes com os princípios da sustentabilidade.

Neste artigo, propõe-se a análise do marco regulatório brasileiro aplicado ao hidrogênio e à energia nuclear, com o objetivo de responder à seguinte questão: o Brasil possui um sistema legal suficiente e adequado para o desenvolvimento sustentável dessas fontes? Parte-se de uma abordagem jurídico-analítica, com revisão de literatura especializada, legislação nacional e documentos técnicos, além de referência a experiências internacionais. A estrutura do trabalho contempla a fundamentação teórica sobre as duas fontes, a descrição do

arcabouço normativo vigente, uma comparação com modelos internacionais e, por fim, os desafios e perspectivas para a consolidação dessas tecnologias no cenário brasileiro.

A Matriz Energética Brasileira e a Transição em Curso

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com alta participação de fontes renováveis, especialmente hidrelétricas, biomassa, solar e eólica. De acordo com dados recentes do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cerca de 48% da matriz energética total brasileira é composta por fontes renováveis, índice bastante superior à média global, que gira em torno de 14%. Essa condição confere ao país uma posição de destaque no cenário internacional, especialmente no que se refere ao cumprimento de metas climáticas e à atração de investimentos em energias limpas.

A matriz elétrica, que corresponde à geração de energia destinada ao abastecimento do sistema interligado nacional, é ainda mais dependente de renováveis. Mais de 80% da energia elétrica produzida no país tem origem em fontes renováveis, com forte predominância das usinas hidrelétricas. Em seguida, ganham relevância crescente as fontes eólica e solar, que têm ampliado sua participação com o avanço tecnológico e os programas de incentivo à geração distribuída e centralizada. A biomassa, sobretudo proveniente do setor sucroenergético, também representa parcela significativa da oferta de energia.

Apesar desses avanços, a dependência hidrelétrica tem se revelado um ponto sensível, especialmente diante de eventos climáticos extremos, como estiagens prolongadas e alterações no regime de chuvas. Tais eventos afetam diretamente os reservatórios das usinas e comprometem a estabilidade do sistema. Nesse contexto, torna-se urgente diversificar a matriz com fontes capazes de garantir segurança energética e baixa emissão de carbono.

O país também vem assistindo a uma gradual eletrificação de setores tradicionalmente dependentes de combustíveis fósseis, como o transporte e a indústria de base. Esse movimento, aliado ao crescimento populacional e econômico, exige expansão da capacidade instalada e modernização da infraestrutura de transmissão e distribuição. Por isso, o conceito de transição energética no Brasil deve ser compreendido como um processo de transformação ampla, que inclui, além da mudança das fontes primárias, uma reconfiguração institucional, normativa e tecnológica.

Nesse cenário, o hidrogênio verde e a energia nuclear despontam como soluções complementares de médio e longo prazo. Ambos apresentam atributos importantes para a sustentabilidade do sistema energético brasileiro: o hidrogênio como vetor de armazenamento e exportação de energia limpa, e a energia nuclear como fonte firme e previsível, capaz de

operar continuamente sem emissão de gases de efeito estufa. Integrar essas fontes à matriz exige, no entanto, um esforço coordenado de planejamento, regulação e inovação, que seja capaz de transformar vantagens naturais e tecnológicas em efetiva liderança no campo da energia limpa.

Na matriz elétrica, subconjunto que trata da geração de eletricidade, a predominância é ainda mais expressiva: mais de 80% da energia gerada no país provém de fontes renováveis, sendo a hidrelétrica a principal, seguida por eólica, solar e biomassa. Essa característica confere ao Brasil uma posição estratégica na transição energética global, pois reduz sua dependência de combustíveis fósseis e o torna competitivo em setores que demandam eletricidade limpa, como o da produção de hidrogênio verde.

Entretanto, essa configuração também apresenta vulnerabilidades. A elevada dependência da hidroeletricidade torna o sistema suscetível a períodos de estiagem, como os que ocorreram nos últimos anos, exigindo maior diversificação da matriz. Além disso, a eletrificação de setores como transporte e indústria, associada ao crescimento econômico, demandará expansão da geração, transmissão e distribuição de energia, em consonância com os objetivos de sustentabilidade.

Nesse cenário, o papel de fontes complementares e de transição, como a energia nuclear e o hidrogênio verde, torna-se cada vez mais relevante. Ambas podem contribuir para a segurança energética e para a estabilidade do sistema, além de apoiar os compromissos climáticos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris. A transição energética no país, portanto, passa pela consolidação de uma governança normativa que integre planejamento estratégico, regulação moderna e estímulo à inovação tecnológica.

Energia Nuclear e Sustentabilidade

A energia nuclear ocupa um espaço ambíguo no debate sobre fontes sustentáveis. Por um lado, é criticada por riscos associados à segurança das usinas e à gestão de rejeitos radioativos. Por outro, é defendida como fonte de energia de base com baixíssima emissão de gases de efeito estufa, capaz de complementar fontes intermitentes como solar e eólica. A Agência Internacional de Energia (IEA) reconhece que a meta de neutralidade de carbono até 2050 é praticamente inalcançável sem a participação da energia nuclear na matriz global. A energia gerada por esse meio apresenta alta densidade energética, o que permite grande produção com baixa ocupação territorial, característica relevante em contextos urbanos e industriais.

De acordo com Immich et al. (2023), a geração de eletricidade tradicionalmente baseada em combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, acarreta elevados impactos ambientais, incluindo a emissão de poluentes atmosféricos e a ocupação extensiva de grandes áreas. Em contraste, a energia nuclear, ao ser operada por meio do processo de fissão de núcleos atômicos, proporciona geração contínua de energia elétrica com emissões diretas praticamente nulas de gases de efeito estufa.

A energia nuclear pode ser obtida, em tese, através de dois processos, o de fusão e o de fissão nuclear, sendo o último o mais bem desenvolvido até o momento, utilizando-se de urânio enriquecido como energia térmica para gerar energia elétrica. (Immich *et al.* 2023)

No Brasil, a energia nuclear é explorada pela Eletronuclear, com duas usinas em operação (Angra 1 e Angra 2) e uma terceira em construção (Angra 3). A operação e fiscalização do setor são atribuídas à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), instituída pela Lei nº 4.118/1962, com competências atualizadas por normas infralegais e tratados internacionais. O papel da CNEN vai além da geração de energia, envolvendo também pesquisa, desenvolvimento e aplicações médicas e industriais da tecnologia nuclear.

Estudos recentes indicam que a aceitação social da energia nuclear é um fator determinante para sua expansão. A comunicação transparente sobre riscos, benefícios e medidas de segurança é essencial para construir confiança pública. Além disso, a atualização do marco legal, incorporando boas práticas internacionais e novos modelos de governança, pode contribuir para a superação de resistências e o aproveitamento sustentável da tecnologia nuclear no Brasil.

Um dos fatores mais relevantes na instalação e operação de fontes energéticas, é, sem dúvida, o fator ambiental, tanto relacionado à implementação dos projetos, onde podem ser necessárias grandes áreas desmatadas, o deslocamento de animais e da própria população, como, por exemplo, quando se implementam hidrelétricas, quanto, também, à própria operação das usinas de energia, que podem depender da queima de combustíveis, despejar dejetos e contribuir com o aumento da produção de gases do efeito estufa.

Entretanto, a energia nuclear também apresenta desafios, principalmente relacionados à gestão dos rejeitos radioativos e aos riscos potenciais de acidentes. Conforme destacado por Immich et al. (2023), o armazenamento seguro dos resíduos de alta atividade requer cuidados de longo prazo, podendo ultrapassar 10.000 anos. A legislação brasileira impõe que o licenciamento ambiental de instalações nucleares envolva a atuação conjunta do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), assegurando fiscalização rigorosa (Immich et al., 2023).

Conforme Gonçalves e Ruiz (2016) apud. Immich *et al.* (2023) a instalação de usinas nucleares depende de um espaço relativamente pequeno, a demanda por desapropriações e pelo desmatamento de áreas é dispensável, não se alterando de forma significativa o meio ambiente ao redor.

A título de comparação, a usina de Itaipu possui área alagada de 1.359 km², com capacidade instalada de 14.000 MW, com índice de produção de 10,4MW/km², enquanto as usinas nucleares de Angra 1 e 2 ocupam uma área de 3,5 km², com capacidade instalada de 1.990 MW e índice de produção de 570MW/km². (Immich et al., 2023, p. 147)

Conforme explica Guena (2007) apud. Immich et al. (2023) um dos principais fatores de poluição relacionado à energia nuclear está na mineração, com riscos para o solo, água e a saúde dos trabalhadores, isso por conta da radioatividade envolvida na atividade de extração, sendo sua operação relativamente segura no que concerne à emissão de radioatividade, em geral, ficando abaixo do considerado seguro para o ser humano.

Ainda há que se observar os rejeitos oriundos das usinas, os quais, mesmo depois de utilizados, podem conservar calor e radioatividade, sendo que, deverão ser classificados pelo tempo em que permanecem radioativos, separados em classes. No caso, combustível nuclear, ao perder a eficiência, ainda se conserva quente e radioativo e é armazenado em piscinas com água borada. (Immich et al, 2023)

Romanato (2005) apud. Immich *et al* (2023) cita como exemplo os LWR - Light Water Reactor, onde uma tonelada de combustível queimado de 600 MWe de potência, gera aproximadamente 2000 kW de calor de decaimento ao ser retirado e após um ano diminui para 10 kW e após 10 anos para 1kW, sendo, segundo o autor, o modelo utilizado no Brasil.

No comparativo de emissões de carbono por fonte energética, a energia nuclear apresenta uma média de 58,2 kgCO₂eq/MWh, inferior à de fontes fósseis e próxima à de fontes renováveis, como a solar (44 kgCO₂eq/MWh) e a eólica (37,6 kgCO₂eq/MWh) (Immich et al., 2023). Essa característica reforça o potencial da energia nuclear como componente de uma matriz energética de baixo carbono, havendo, ainda, potenciais vantagem quanto à intermitência em relação à energia eólica ou solar, ou à sazonalidade da energia hidrelétrica.

Hidrogênio Verde como Vetor Energético

O hidrogênio verde representa uma das apostas mais promissoras para o futuro energético sustentável. Sua produção depende da eletrólise da água com uso de eletricidade oriunda de fontes renováveis, o que garante emissões líquidas nulas de carbono. Trata-se,

portanto, de uma alternativa energética limpa, versátil e com capacidade de armazenamento e transporte, podendo ser aplicada em setores como transporte, indústria química e siderúrgica, bem como em sistemas integrados de energia.

A busca pela descarbonização da economia mundial tem impulsionado o interesse por fontes energéticas limpas e sustentáveis. Nesse cenário, o hidrogênio verde emerge como uma das alternativas mais promissoras para substituir os combustíveis fósseis e promover a redução das emissões de gases de efeito estufa (Bezerra, 2021).

Segundo Lara e Richter (2023), o hidrogênio verde desponta como elemento central na agenda global de transição energética, especialmente no contexto da descarbonização dos setores industriais e de transportes. Segundo os autores, o hidrogênio é um recurso abundante na natureza, mas sua obtenção em estado livre requer processos que tradicionalmente demandam elevadas quantidades de energia. A utilização de energia renovável para a eletrólise da água permite a geração de hidrogênio com praticamente zero emissões de carbono, caracterizando o chamado hidrogênio verde.

Já para Fernandes et al. (2023), a transição energética global tem impulsionado investimentos expressivos em fontes alternativas e sustentáveis de energia, entre elas o hidrogênio verde. A tensão geopolítica recente, como a guerra entre Rússia e Ucrânia, acelerou programas como o REPowerEU e o Inflation Reduction Act nos Estados Unidos, reforçando o hidrogênio verde como elemento estratégico para a segurança energética e a descarbonização econômica.

Além do hidrogênio verde, existem outras classificações, como o hidrogênio azul (produção fóssil com captura e armazenamento de carbono) e o hidrogênio turquesa (produzido pela pirólise do metano), embora o hidrogênio verde permaneça como o mais sustentável (Lara; Richter, 2023).

Segundo Bezerra (2021), o hidrogênio verde desponta como a solução energética para setores de difícil descarbonização, como a indústria pesada, o transporte de longa distância, a siderurgia e a aviação. O mercado mundial de hidrogênio verde, conforme projeções do Hydrogen Council, poderá alcançar US\$ 2,5 trilhões até 2050, representando cerca de 20% da demanda global de energia.

As aplicações do hidrogênio são amplas, abrangendo a geração estacionária de energia, a indústria, o transporte e o armazenamento energético de longo prazo. Destaca-se que setores como o transporte marítimo, a aviação e a indústria siderúrgica encontram no hidrogênio uma alternativa eficaz para alcançar a neutralidade de carbono (Mueller de Lara; Richter, 2023).

O panorama internacional revela um crescimento acelerado da produção e do mercado de hidrogênio verde. Em 2020, a produção mundial de hidrogênio atingiu cerca de 90 milhões de toneladas, com projeções de duplicação até 2040 ou, segundo estimativas mais otimistas, até 2030 (Chiappini, 2021 apud Fernandes et al., 2023). Todavia, apenas 2% da produção atual corresponde ao hidrogênio de baixo carbono ou renovável, destacando o vasto espaço para expansão.

No Brasil, a região Nordeste desponta como polo natural para a produção de hidrogênio verde, dada a abundância de recursos solares e eólicos. Já existem iniciativas concretas, como os projetos-piloto no Porto do Pecém, no Ceará, que contam com investimentos nacionais e estrangeiros. Entretanto, esse avanço técnico e econômico ainda carece de amparo normativo consolidado, o que dificulta a escalabilidade da tecnologia.

Contudo, a viabilização da economia do hidrogênio enfrenta desafios significativos. O principal obstáculo reside nos altos custos de produção do hidrogênio verde, ainda muito superiores ao hidrogênio obtido de fontes fósseis (hidrogênio cinza e azul). A redução desses custos depende de avanços tecnológicos na produção de eletrolisadores, no armazenamento, no transporte e na ampliação de escala (Bezerra, 2021).

Ele obtido pela eletrólise da água utilizando energia de fontes renováveis, como solar e eólica, caracterizando-se como uma fonte de energia limpa, armazenável e extremamente versátil. Apesar dos atributos positivos, essa tecnologia ainda enfrenta desafios como alto custo de produção, elevada volatilidade do hidrogênio e rigorosos requisitos de segurança (Fernandes et al. 2023).

A produção de hidrogênio pode ocorrer de diversas maneiras: reforma de gás natural, gaseificação de biomassa, processos termoquímicos e, de forma mais sustentável, pela eletrólise da água com fontes renováveis (Lara; Richter, 2023). Ainda que atualmente a maior parte do hidrogênio seja proveniente de fontes fósseis, que resulta no chamado hidrogênio cinza, a expectativa é de crescimento acelerado da participação do hidrogênio verde, impulsionado por políticas públicas e metas climáticas.

A viabilidade do hidrogênio verde está diretamente relacionada à redução dos custos de produção e à existência de infraestrutura adequada, como redes de gasodutos para transporte e armazenamento (Lara; Richter, 2023). O Brasil, em razão de sua matriz elétrica majoritariamente renovável e condições naturais favoráveis, é apontado como um potencial protagonista na produção e exportação de hidrogênio verde.

O desenvolvimento da cadeia produtiva do hidrogênio requer políticas públicas coordenadas, marcos regulatórios claros e incentivos econômicos que garantam a viabilidade

de longo prazo. Isso inclui a criação de mecanismos de certificação de origem, diretrizes de segurança para o transporte e armazenamento, bem como estratégias de integração com o sistema elétrico nacional. Em outras palavras, o potencial energético do hidrogênio verde só será plenamente explorado se houver condições institucionais e legais adequadas para orientar seu uso de forma estratégica e sustentável.

Em termos de governança, o Brasil já começou a estruturar a base normativa para o hidrogênio verde com a criação do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), instituído pela Resolução CNPE nº 6/2022, além do Projeto de Lei nº 725/2022, que visa consolidar a inserção do hidrogênio verde na matriz energética nacional e atribuir competências regulatórias à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (Fernandes et al., 2023). O Projeto em questão, originou, no ano de 2024 a Lei 14.948, que Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997.

MARCO REGULATÓRIO BRASILEIRO

Regulação da Energia Nuclear

O marco regulatório da energia nuclear no Brasil é fruto de um processo de construção jurídica e institucional que visa garantir a utilização pacífica, segura e sustentável da energia nuclear no território nacional. Desde a década de 1960, o país vem desenvolvendo uma estrutura normativa sólida, que foi sendo aperfeiçoada à luz das necessidades de segurança, soberania e desenvolvimento tecnológico.

A base do ordenamento jurídico nacional para a energia nuclear é a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, que estabelece a Política Nacional de Energia Nuclear. Essa norma define a responsabilidade exclusiva do Estado sobre o aproveitamento da energia nuclear e cria órgãos centrais para sua administração e fiscalização, como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (Brasil, 1962). Entre seus objetivos, destacam-se o incentivo à pesquisa científica, a promoção do desenvolvimento de aplicações pacíficas da energia nuclear e a preservação da segurança nacional.

De acordo com a Lei nº 4.118/1962, compete à União, por meio da CNEN, controlar as atividades nucleares no país, abrangendo desde a pesquisa científica até a produção e comercialização de materiais nucleares. O monopólio estatal foi reafirmado posteriormente pela Constituição Federal de 1988, em seu artigo 177, inciso V.

A evolução do setor demandou a criação de estruturas mais especializadas, especialmente no campo da segurança nuclear. Nesse sentido, a Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021, instituiu a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), desmembrando a função regulatória da CNEN (Brasil, 2021). A ANSN passou a ser o órgão regulador independente responsável pela regulação, fiscalização e controle das atividades que envolvam riscos radiológicos e nucleares no país.

Com essa inovação, o Brasil adequou-se às melhores práticas internacionais de governança nuclear, como recomendadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), que preconiza a separação entre as funções de promoção e de regulação da energia nuclear. A criação da ANSN fortalece o compromisso nacional com a segurança nuclear e aumenta a confiança pública e internacional na gestão das atividades nucleares (Brasil, 2021).

Outro pilar importante do arcabouço jurídico é a Lei nº 14.514, de 29 de dezembro de 2022, que trata da organização da empresa pública Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) (Brasil, 2022). A norma regula a pesquisa, lavra, beneficiamento e comercialização de minérios nucleares e seus derivados. A INB detém o monopólio sobre essas atividades estratégicas, sendo essencial para garantir a autonomia nacional no ciclo do combustível nuclear.

A Lei nº 14.514/2022 introduziu inovações significativas, como a possibilidade de a INB celebrar parcerias com o setor privado, mediante licitação, para a exploração de jazidas de minérios nucleares, desde que mantido o controle estatal sobre o produto final. Essa flexibilização visa fomentar o desenvolvimento da indústria mineral nuclear e atrair investimentos para modernizar a cadeia produtiva do combustível nuclear no Brasil (Brasil, 2022).

Ademais, o Brasil é signatário de tratados internacionais relevantes, como o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP) e o Tratado de Tlatelolco, que asseguram a utilização exclusivamente pacífica da energia nuclear no país. O Sistema de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (SCCC), administrado conjuntamente pela Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC) e pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), garante a transparência das atividades nucleares brasileiras.

O recente fortalecimento institucional com a criação da ANSN e a modernização da gestão da INB indicam a intenção do Brasil de consolidar seu protagonismo na utilização segura e sustentável da energia nuclear. Em síntese, podemos afirmar que o marco regulatório brasileiro da energia nuclear é robusto e alinhado às práticas internacionais, abrangendo aspectos de segurança, fiscalização, exploração de recursos minerais e incentivo à pesquisa e inovação.

Regulação do Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde surge como vetor estratégico para a transição energética global, e no Brasil, iniciativas legislativas recentes buscam estabelecer bases sólidas para o seu desenvolvimento. Com a crescente necessidade de descarbonizar a economia e atender aos compromissos climáticos internacionais, a regulamentação da cadeia produtiva do hidrogênio tornou-se imprescindível.

Inicialmente, o hidrogênio no Brasil carecia de um arcabouço jurídico robusto, contando apenas com orientações fragmentadas e programas setoriais, como o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), instituído pela Resolução CNPE nº 6/2022 (Fernandes et al., 2023). Esse programa delineou uma estratégia de governança, mapeando ações necessárias para estruturar o mercado nacional de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Conforme Fernandes et al. (2023), as dificuldades enfrentadas pelo setor incluíam a falta de regulamentação sobre certificação da origem renovável do hidrogênio, ausência de incentivos fiscais adequados e insegurança jurídica para investimentos privados. Iniciativas como a certificação de hidrogênio pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) foram passos importantes para rastrear a origem da energia usada na produção, em alinhamento com exigências internacionais como a Renewable Energy Directive II da União Europeia.

O Brasil avançou significativamente com a promulgação da Lei nº 14.948, de 28 de abril de 2024, que instituiu a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono. Essa lei estabelece princípios, objetivos e instrumentos para o desenvolvimento, produção, comercialização e uso do hidrogênio de baixa emissão no país, integrando o hidrogênio verde como prioridade estratégica nacional (Brasil, 2024).

Entre os principais avanços trazidos pela Lei nº 14.948/2024, podem-se destacar a definição jurídica de diferentes tipos de hidrogênio (verde, azul, turquesa e outros); a criação do Sistema Nacional de Certificação de Hidrogênio para garantir rastreabilidade e padrões de sustentabilidade; a atribuição de competências à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para regulamentar e fiscalizar o setor; o fomento à pesquisa,

desenvolvimento e inovação tecnológica; a promoção da infraestrutura logística, armazenamento e transporte de hidrogênio.

Complementarmente, a Lei nº 14.990, de 23 de maio de 2024, dispõe sobre incentivos econômicos, fiscais e financeiros para estimular a produção e o consumo de hidrogênio verde no Brasil (Brasil, 2024). Essa norma criou mecanismos como: a redução tributária para projetos certificados de hidrogênio de baixa emissão; linhas de crédito especiais via BNDES e outras instituições financeiras; prioridade na contratação pública para produtos oriundos da cadeia do hidrogênio; apoio à exportação de derivados de hidrogênio verde, como amônia e metanol.

Segundo Mueller de Lara e Richter (2023), a regulamentação nacional é fundamental para que o Brasil possa explorar seu potencial competitivo na produção de hidrogênio, dado seu elevado fator de capacidade solar e eólico. Fernandes et al. (2023) ressaltam que a criação de hubs de produção e exportação, como os localizados nos portos de Pecém (CE), Suape (PE) e Açu (RJ), dependerá de um ambiente regulatório estável e atrativo para investidores nacionais e estrangeiros.

Bezerra (2021) também pontua que o hidrogênio verde poderá se tornar um ativo estratégico brasileiro, tanto para atender à demanda interna de descarbonização quanto para conquistar mercados internacionais, particularmente europeus, onde políticas como a H2Global incentivam a importação de produtos sustentáveis.

Neste cenário, percebe-se que o marco regulatório do hidrogênio verde no Brasil passou por uma profunda evolução, especialmente no ano de 2024, com a promulgação de normas específicas, programas estruturados e incentivos econômicos.

COMPARAÇÃO INTERNACIONAL

A transição energética mundial impôs uma nova dinâmica ao papel da energia nuclear e do hidrogênio verde na matriz energética global. Ambos os vetores energéticos são considerados estratégicos para a descarbonização da economia e para o enfrentamento das mudanças climáticas, objetivos consagrados em tratados e compromissos multilaterais como o Acordo de Paris (2015) e as agendas de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) (Lara; Richter, 2023).

Energia Nuclear

O desenvolvimento da energia nuclear no cenário internacional é orientado por organismos multilaterais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), fundada

em 1957. A AIEA estabelece padrões de segurança, promove a cooperação técnica e fiscaliza o uso pacífico da energia nuclear em seus Estados-Membros (Immich et al., 2023).

A energia nuclear é reconhecida como uma fonte de geração elétrica de baixa emissão de carbono, com papel relevante para a segurança energética e o atingimento das metas climáticas globais. Segundo Immich et al. (2023), o ciclo de vida da energia nuclear gera emissões comparáveis às das fontes renováveis, como solar e eólica.

Países como França, Estados Unidos, Rússia e China lideram a utilização da energia nuclear, desenvolvendo também tecnologias inovadoras, como os pequenos reatores modulares (SMRs). Além disso, acordos internacionais como o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP) e o Tratado de Tlatelolco fortalecem o regime de não proliferação e o uso exclusivamente pacífico da tecnologia nuclear (Immich et al., 2023).

Hidrogênio Verde

No campo do hidrogênio verde, a dinâmica internacional é marcada por planos ambiciosos para estruturar um novo mercado global baseado em energia limpa e sustentável. A União Europeia, por exemplo, estabeleceu a “Estratégia Europeia para o Hidrogênio” em 2020, visando produzir 10 milhões de toneladas de hidrogênio renovável até 2030 (Fernandes et al., 2023).

A crise geopolítica decorrente da guerra entre Rússia e Ucrânia acelerou ainda mais a adoção de estratégias de diversificação energética. O plano REPowerEU, lançado em 2022, destinou cerca de 300 bilhões de euros para reduzir a dependência de combustíveis fósseis russos, sendo parte expressiva desse montante alocado para o hidrogênio renovável (Fernandes et al., 2023).

Nos Estados Unidos, o Inflation Reduction Act (IRA), aprovado em 2022, prevê incentivos fiscais robustos para a produção de hidrogênio limpo, chegando a subsídios de até 3 dólares por quilo de hidrogênio produzido (Fernandes et al., 2023). Essa medida visa posicionar os EUA como um dos principais produtores e exportadores de hidrogênio verde no mundo.

O panorama internacional é ainda caracterizado pela formação de parcerias e programas de fomento, como o H2Global, mecanismo alemão que destina 900 milhões de euros para subsidiar a importação de hidrogênio e seus derivados (como amônia verde e e-metanol), fomentando a demanda e promovendo preços competitivos (Fernandes et al., 2023).

A produção mundial de hidrogênio verde, embora ainda incipiente, projeta crescimento acelerado. Em 2020, o mercado de hidrogênio verde movimentou cerca de 300 milhões de dólares, com estimativas de atingir 10 bilhões de dólares até o final da década

(Fernandes et al., 2023). Contudo, o hidrogênio verde ainda enfrenta desafios globais como a necessidade de infraestrutura para armazenamento e transporte, custo de produção e padronização internacional de certificação de origem renovável.

Nesse sentido, a certificação ambiental do hidrogênio é tema central de discussão, com normas como a Renewable Energy Directive II (RED II) da União Europeia, que define critérios rigorosos para considerar o hidrogênio como renovável, exigindo comprovação da origem da eletricidade utilizada (Fernandes et al., 2023).

Inserção do Brasil no Cenário Global

O Brasil, graças à sua matriz elétrica predominantemente renovável e ao seu potencial competitivo, é visto como candidato natural a liderar a produção e exportação de hidrogênio verde (Lara; Richter, 2023). A implementação da Política Nacional do Hidrogênio (Lei nº 14.948/2024) e dos incentivos previstos na Lei nº 14.990/2024 colocam o país em sintonia com as tendências globais.

A certificação de hidrogênio lançada pela CCEE alinha-se às exigências internacionais de rastreamento e autenticidade ambiental, essencial para inserir o produto brasileiro em mercados exigentes como o europeu (Fernandes et al., 2023).

Já no setor nuclear, o Brasil mantém posição de destaque como membro fundador da AIEA e como signatário dos principais tratados de não proliferação, além de desenvolver projetos inovadores como o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), voltado para a produção de radioisótopos e pesquisa científica.

Assim, observa-se que o panorama internacional é de forte estímulo para a expansão das tecnologias de hidrogênio verde e energia nuclear, consolidando tais fontes como pilares da nova matriz energética sustentável global.

DESAFIOS E PERSPECTIVAS

A energia nuclear representa uma fonte de alta densidade energética, com baixa emissão de gases de efeito estufa em seu ciclo de vida (Immich et al., 2023). No entanto, enfrenta obstáculos históricos relacionados à aceitação pública, aos riscos associados a acidentes nucleares e à gestão segura de rejeitos radioativos de longa duração.

O Brasil possui um marco regulatório consolidado, iniciado pela Lei nº 4.118/1962, que estabeleceu a Política Nacional de Energia Nuclear, e atualizado com a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) pela Lei nº 14.222/2021 (Brasil, 1962; Brasil, 2021). A separação entre as funções de promoção e de regulação da energia nuclear

atende às melhores práticas internacionais, mas a implementação efetiva da ANSN ainda demanda investimentos em capacitação técnica e autonomia operacional.

Outro desafio reside na modernização do parque nuclear brasileiro. As usinas de Angra 1 e Angra 2 utilizam tecnologia de reatores pressurizados convencionais. Avanços internacionais, como os pequenos reatores modulares (SMRs), ainda não foram incorporados no Brasil, exigindo atualização regulatória e incentivos à inovação (Immich et al., 2023).

Além disso, a reestruturação da Indústrias Nucleares do Brasil (INB), pela Lei nº 14.514/2022, busca fomentar a competitividade na cadeia produtiva do combustível nuclear, mas ainda depende de parcerias público-privadas bem estruturadas e da expansão de capacidades tecnológicas internas (Brasil, 2022).

No campo do hidrogênio verde, embora o Brasil tenha vantagens naturais, como abundância de energia renovável e potencial de exportação, a cadeia produtiva ainda está em estágio inicial (Bezerra, 2021; Fernandes et al., 2023).

O principal desafio é econômico: o custo de produção do hidrogênio verde permanece elevado, variando entre 5 a 7 dólares por quilo, enquanto o hidrogênio obtido de fontes fósseis (cinza) custa cerca de 1,4 dólar por quilo (Chiappini, 2022 apud Fernandes et al., 2023). A superação dessa barreira depende da redução do custo da eletricidade renovável e do avanço tecnológico nos processos de eletrólise.

Do ponto de vista regulatório, a criação da Política Nacional do Hidrogênio pela Lei nº 14.948/2024 e dos incentivos previstos na Lei nº 14.990/2024 representam avanços significativos (Brasil, 2024). Todavia, ainda é necessário detalhar normas específicas sobre certificação de origem, padrões técnicos de segurança e integração do hidrogênio à matriz energética nacional.

A infraestrutura logística e a disponibilidade de financiamento também são gargalos críticos. A cadeia do hidrogênio exige investimentos pesados em plantas de eletrólise, sistemas de armazenamento, transporte e exportação. Modelos de financiamento misto, com apoio público e capital privado, serão essenciais para viabilizar esses projetos (Fernandes et al., 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo analisar a suficiência e a adequação do marco regulatório brasileiro para o desenvolvimento sustentável das fontes energéticas representadas pela energia nuclear e pelo hidrogênio verde. A partir da revisão da legislação nacional e da literatura especializada, bem como do exame do panorama internacional, foi possível identificar

avanços importantes, mas também lacunas significativas que precisam ser enfrentadas para a consolidação de uma matriz energética diversificada, limpa e segura no Brasil.

Em relação à energia nuclear, o Brasil dispõe de uma tradição normativa sólida, iniciada com a Lei nº 4.118/1962, e fortalecida mais recentemente com a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) pela Lei nº 14.222/2021 e a reestruturação das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) pela Lei nº 14.514/2022. Essas medidas aproximam o país das melhores práticas internacionais de governança nuclear, assegurando a separação entre funções de promoção e fiscalização e reforçando o controle sobre o ciclo do combustível nuclear. Ainda assim, persiste a necessidade de atualização regulatória para incorporar novas tecnologias, como pequenos reatores modulares, e para fomentar o investimento privado na cadeia produtiva (Immich et al., 2023).

No que se refere ao hidrogênio verde, o cenário regulatório evoluiu de forma significativa com a edição da Lei nº 14.948/2024, que instituiu a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, e da Lei nº 14.990/2024, que criou incentivos econômicos e fiscais para o setor. Essas normas representam um marco inicial robusto para estruturar o mercado nacional de hidrogênio verde, abrangendo aspectos de certificação de origem, estímulo à pesquisa, desenvolvimento tecnológico e facilitação de investimentos (Fernandes et al., 2023; Lara; Richter, 2023).

Entretanto, apesar dos avanços, o marco regulatório brasileiro ainda não pode ser considerado plenamente suficiente e adequado para o pleno desenvolvimento sustentável dessas fontes. A implementação efetiva das novas legislações, a regulamentação de detalhes técnicos, a criação de mecanismos de financiamento, a definição de padrões ambientais e a estruturação da infraestrutura logística e comercial são etapas que precisam ser concretizadas para transformar o potencial em realidade (Bezerra, 2021; Fernandes et al., 2023).

A experiência internacional demonstra que a energia nuclear e o hidrogênio verde requerem regulação clara, estável e eficiente para atrair investimentos e garantir competitividade global. Iniciativas como o REPowerEU e o H2Global evidenciam a importância de políticas públicas integradas e de incentivos contínuos para fomentar novos mercados energéticos sustentáveis (Fernandes et al., 2023).

Assim, conclui-se que o marco regulatório brasileiro para a energia nuclear e o hidrogênio verde encontra-se em processo de amadurecimento. Existem bases promissoras, mas também desafios relevantes que demandam ações coordenadas entre governo, setor privado, centros de pesquisa e sociedade civil para consolidar um ambiente regulatório seguro, inovador e alinhado às metas de desenvolvimento sustentável.

A efetiva superação dessas barreiras tem o condão de permitir ao Brasil não apenas diversificar sua matriz energética, mas também ocupar posição de destaque no cenário global da nova economia verde.

REFERÊNCIAS

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

BRASIL. Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) e altera a Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 18 out. 2021.

BRASIL. Lei nº 14.514, de 29 de dezembro de 2022. Dispõe sobre as Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB), a pesquisa, a lavra e a comercialização de minérios nucleares, de seus concentrados e derivados, e de materiais nucleares. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 28 de abril de 2024. Institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 29 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962. Estabelece a Política Nacional de Energia Nuclear e cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 ago. 1962.

FERNANDES, Gláucia; AZEVEDO, João Henrique de; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. *FGV Energia*, Coluna Opinião, jan. 2023.

IMMICH, Vinicius; WEBER, Fernanda Hart; CLASEN, Barbara Estevas; LANZANOVA, Luciane Sippert; LANZANOVA, Mastrângello Enívar. Energia nuclear: uma opinião da sua relação com a sustentabilidade. *Revista Eletrônica Científica da UERGS*, v. 9, n. 2, p. 143-153, 2023. DOI: [10.21674/2448-0479.92.143-153](https://doi.org/10.21674/2448-0479.92.143-153).

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 1, p. 413-436, jan.-abr. 2023. DOI: [10.18542/ncn.v26i1.12746](https://doi.org/10.18542/ncn.v26i1.12746).