



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 2, p. 249–263
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p249-263>

Revisão dos avanços normativos e aspectos regulatórios sobre hidrogênio verde, combustíveis sintéticos e captura de carbono no Brasil
Review of normative advances and regulatory aspects on green hydrogen, synthetic fuels and carbon capture in Brazil

Maria Cecilia Costa Lima¹, Danielly Norberto Araújo^{2,*}, Ricardo Cerqueira Medrado³,
Vinícius Bastos Resende⁴

^{1, 2, 3} Pesquisador(a), SENAI CIMATEC - Salvador, BA, Brasil

⁴ Engenheiro, ENGIE BRASIL ENERGIA - Florianópolis, SC, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: danielly.araujo@fieb.org.br

Received: 29 November 2024 | Accepted: 18 December 2024 | Published online: 26 December 2024

Resumo: Os combustíveis sintéticos têm ganhado destaque como alternativa promissora para a transição energética global. No entanto, os altos custos de produção, a necessidade de avanços técnicos para melhorar a eficiência, e a falta de políticas governamentais e incentivos de apoio, além de barreiras regulatórias, dificultam a implementação desses combustíveis. No Brasil, avanços regulatórios como o Marco Legal do Hidrogênio Verde começam a surgir, abrindo caminho para que o país desenvolva políticas públicas que favoreçam tecnologias de combustíveis sintéticos e promovendo a diversificação da matriz energética. Dessa forma, este artigo apresenta uma revisão dos avanços normativos e de políticas relacionadas ao desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis no Brasil, com foco em três áreas: hidrogênio verde, combustíveis sintéticos e captura de carbono. Foram analisadas iniciativas governamentais, políticas estaduais, incentivos financeiros, apoio à pesquisa, padronização e certificação do hidrogênio verde, normas e incentivos para combustíveis sintéticos, além de aspectos regulatórios da captura de carbono. Por serem temas relativamente novos no Brasil, o artigo aborda as iniciativas já em curso para viabilizar o desenvolvimento dessas tecnologias no país. Além disso, são apresentados exemplos de regulamentações e políticas adotadas em outros países.

Palavras-chave: normas; regulamentações; hidrogênio verde; combustíveis sintéticos; captura de carbono.

Abstract: Synthetic fuels have gained prominence as a promising alternative for the global energy transition. However, high production costs, the need for technical advancements to improve efficiency, along with the lack of supportive government policies, incentives, and regulatory frameworks, delay the implementation of these fuels. In Brazil, regulatory advances such as the Green Hydrogen Legal Framework are beginning to emerge, paving the way for the country to develop public policies that promote synthetic fuel technologies and foster diversification of the energy matrix. Thus, this article presents an analysis of regulatory and policy advances related to the development and implementation of sustainable technologies in Brazil, focusing on three areas: green hydrogen, synthetic fuels, and carbon capture. Government initiatives, state policies, financial incentives, research support, standardization and certification of green hydrogen, regulations and incentives for synthetic fuels, as well as regulatory aspects of carbon capture were analyzed. Since these are relatively new topics in Brazil, the article addresses ongoing initiatives to enable the development of these technologies in the country. Additionally, examples of regulations and policies adopted in other countries are presented.

Keywords: standards; regulations; green hydrogen; synthetic fuels; carbon capture.

1 Introdução

Os combustíveis sintéticos, ou *e-fuels*, estão emergindo como componentes cruciais na transição para uma matriz energética mais sustentável e são alternativas promissoras ao uso de combustíveis fósseis, especialmente em setores que enfrentam regulamentações rigorosas sobre emissões de gases de efeito estufa (Dell'Aversano et al., 2024). A alta densidade energética desses combustíveis e sua compatibilidade com a infraestrutura existente os tornam substitutos viáveis para os combustíveis fósseis tradicionais (Huey, 2023). Eles são provenientes da combinação do hidrogênio com o nitrogênio ou insumos de carbono (CO₂ ou CO) (IEA, 2023), sendo a sustentabilidade desses combustíveis intrinsecamente relacionada com a obtenção do hidrogênio e da fonte de carbono utilizada. Quando o hidrogênio e o carbono utilizados são obtidos da eletrólise da água com o uso de fontes renováveis e de uma fonte neutra em carbono, respectivamente, o combustível sintético é considerado sustentável (Huang, 2022; Dell'Aversano et al., 2024).

O hidrogênio verde, produzido a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis de energia, é caracterizado como um vetor energético importante, que pode ajudar a alcançar as metas globais de descarbonização e cumprir os compromissos climáticos até 2050 (Pantskhava et al, 2024), sendo essencial para a transição para uma economia de baixo carbono. Outro aspecto crucial é a captura de carbono, que visa mitigar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) de fontes industriais e de geração de energia. As leis e normas que regulam a captura, transporte, armazenamento e utilização do CO₂ são fundamentais para orientar práticas seguras e eficazes no contexto da mitigação das mudanças climáticas (Jang, 2024).

Os combustíveis sintéticos produzidos a partir de dióxido de carbono (CO₂) capturado e hidrogênio verde tem aplicações diversas, especialmente no contexto da descarbonização de setores difíceis de eletrificar. Essas aplicações incluem o setor de transporte, indústria, geração de energia, marítimo e aviação (Wood Mackenzie, 2024). Nesse sentido, projetos e plantas pilotos que possuem como produto final a síntese de combustíveis sintéticos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de alternativas energéticas sustentáveis, pois permitem avaliar a viabilidade técnica de novos processos antes da aplicação em larga escala. Assim, alguns projetos internacionais estão em desenvolvimento, no entanto no Brasil as iniciativas ainda são limitadas, o que evidencia a dificuldade em implementá-las no país.

A dificuldade na implementação de projetos de combustíveis sintéticos no Brasil se deve a diferentes fatores, incluindo econômicos, técnicos, normativos e regulatórios (Dell'Aversano et al., 2024; Viscardi, 2021). Apesar disso, o país tem realizado diversas iniciativas para fomentar a normatização e regulação quanto à produção e utilização de combustíveis sintéticos. Dessa forma, considerando os combustíveis sintéticos produzidos a partir do hidrogênio verde e CO₂, esse artigo fará uma revisão sobre os esforços realizados no Brasil, incluindo iniciativas governamentais, políticas estaduais e apoio à pesquisa, com foco na padronização e certificação do hidrogênio verde, nos incentivos para combustíveis sintéticos e nos aspectos regulatórios da captura de carbono.

2 Avanços normativos para o hidrogênio verde

O Brasil está dando passos concretos para se posicionar como líder na produção e utilização de hidrogênio verde, uma vez que o governo e a sociedade estão compreendendo seu potencial como um importante vetor energético para a descarbonização da matriz energética brasileira e o desenvolvimento sustentável.

Para impulsionar o desenvolvimento e a utilização do hidrogênio verde no país, o governo brasileiro vem implementando um conjunto de leis, decretos e resoluções a nível nacional e estadual que criam um ambiente regulatório propício e oferecem incentivos para toda a cadeia de valor do hidrogênio verde, incentivando sua produção, transporte, armazenamento e utilização. Essas leis, decretos e resoluções serão discutidos a seguir.

2.1 Principais iniciativas governamentais para o desenvolvimento do H₂

Desde 1995, o Brasil empreende esforços significativos para desenvolver iniciativas relacionadas ao hidrogênio e suas tecnologias e, resumidamente, algumas das iniciativas governamentais serão apresentadas nesta seção.

Em 1995, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) iniciou sua atuação na temática da Energia do Hidrogênio, e um dos primeiros grandes marcos foi a implementação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), em 1998. Em 2002, houve o estabelecimento do Programa Brasileiro de Células a Combustível (ProCaC), que possuía como objetivo “organizar e promover ações de

pesquisa e desenvolvimento tecnológico, por intermédio de projetos associados entre entidades de pesquisa e a iniciativa privada”. O ProCaC contou com a participação de empresas e universidades e, em 2005, passou por uma reformulação, recebendo o nome de “Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio” (ProH2).

Em 2003, o País tornou-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia – IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy), que visa trocar informações governamentais, industriais e acadêmicas e é uma colaboração composta por diversos países focada no desenvolvimento e implementação de tecnologias de hidrogênio com ênfase no uso comercial do hidrogênio e das células a combustível. Originalmente, a representação oficial na parceria era de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), tendo sido alterada para o MCTI em 2017. A Parceria reúne-se semestralmente, e o Brasil envia informações atualizadas sobre o assunto, contando com apoio do governo, da academia e da indústria.

Já em 2005, foi publicado o “Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil” pelo MME, com metas ao longo de 20 anos apontando a importância das diferentes rotas tecnológicas nas quais o Brasil pudesse ter vantagens competitivas, o papel do gás natural na transição até o predomínio do hidrogênio verde e a difusão nos mercados de geração distribuída, regiões isoladas e ônibus urbanos. Em 2012, no Workshop Internacional sobre Hidrogênio e Células a Combustível (WICaC), o MCTI apresentou questões importantes após 10 anos de investimentos em projetos na área. Já em 2017 foi criada a Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2), uma iniciativa que visa organizar as ações e recursos (públicos e privados) envolvendo o H2V.

Em 2018, o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis, publicado pelo MCTI, apresentou uma análise detalhada do potencial do hidrogênio. O documento destacou que o uso de energias renováveis no Brasil oferece uma oportunidade para a produção de hidrogênio por meio da eletrólise, especialmente quando há um excedente de energia elétrica disponível. Em 2020, o hidrogênio verde foi incluído no Plano Nacional de Energia até 2050 (PNE 2050) pelo Ministério de Minas e Energia (MME), prevendo investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a produção de hidrogênio no país, além de incentivos para a utilização dessa fonte de energia em diferentes setores da economia (Ministério de Minas e Energia, 2021).

Com isso em vista, em 2022 foi publicada a Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), que institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e estabelece a estrutura de governança do programa. O PNH2 tem como objetivo promover o desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio verde no Brasil, incluindo a pesquisa, desenvolvimento, demonstração, industrialização e comercialização da tecnologia. O programa também prevê a criação de um observatório do mercado de hidrogênio verde e a realização de estudos para identificar oportunidades e desafios para o setor.

Além disso, antes da Resolução CNPE nº 6, de 2022, outras decisões do colegiado de ministros já identificavam o papel estratégico que o hidrogênio pode desempenhar num futuro de economias descarbonizadas, como a Resolução CNPE nº 2, de 2021, que definiu o hidrogênio como um dos temas prioritários para investimentos em pesquisa e desenvolvimento da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e ANEEL, e a Resolução CNPE nº 6 de 2021, que orientou a definição de diretrizes para o Programa (Ministério de Minas e Energia, 2022).

Ainda em 2022, o MCTI publicou uma portaria que formaliza a Iniciativa Brasileira do Hidrogênio (IBH2), com o objetivo de promover ações governamentais relacionadas ao hidrogênio e suas aplicações. Como parte dessa iniciativa, o MCTI também instituiu o Sistema Brasileiro de Laboratórios de Hidrogênio (SisH2-MCTI), que visa impulsionar o avanço científico, tecnológico e empreendedor na área do hidrogênio, além de promover parcerias entre instituições científicas e o setor privado. Além disso, o MCTI lançou uma chamada pública de subvenção econômica da FINEP no valor de R\$ 50 milhões para incentivar o desenvolvimento e/ou adaptação de plantas piloto para combustíveis sustentáveis, como bioquerosene para aviação, biometano e hidrogênio (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024). Além disso, o Ministério de Minas e Energia (MME) divulgou o Plano de Trabalho Trienal (2023-2025) do PNH2 para as ações que devem ser implementadas, a nível federal, para promover o desenvolvimento da economia do hidrogênio no país nos próximos anos (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Já em 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) abriu para consulta pública a chamada estratégica de Hidrogênio Verde (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2023). A Chamada Estratégica de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) n.º 23/2024 possui foco no "Hidrogênio no Contexto do Setor Elétrico Brasileiro" e busca explorar o potencial do hidrogênio como vetor energético para descarbonizar a economia brasileira e promover inovações tecnológicas no setor elétrico. Em 2024, a ANEEL realizou a

Chamada Estratégica, em que foram submetidos 24 projetos, sendo 19 propostas para plantas piloto (totalizando mais de 100 MW) e 5 para desenvolvimento de peças e componentes. O investimento total declarado nos projetos submetidos foi de R\$ 2,7 bilhões, com R\$ 1,16 bilhões de contrapartidas de empresas. Os projetos aprovados devem melhorar a qualidade da energia elétrica, aumentar a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro e possibilitar o uso do hidrogênio armazenado para geração de energia. Além disso, espera-se que a iniciativa impulse a demanda por eletricidade a partir de fontes de baixo carbono e promova novas oportunidades de negócios no setor (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024).

Em junho de 2024, o Senado Federal aprovou o Projeto de Lei 2.308/2023, o "Marco Legal do Hidrogênio Verde". Após sua aprovação pela Câmara dos Deputados, o projeto foi sancionado no início de agosto de 2024, tornando-se a Lei nº 14.948/2024 e tem como objetivo estabelecer um marco regulatório abrangente para o hidrogênio verde no Brasil, definindo diretrizes para sua produção, transporte, armazenamento, comercialização e uso. O marco legal também prevê a criação de um Conselho Nacional do Hidrogênio Verde e a instituição de incentivos fiscais e financeiros para estimular o investimento no setor (Planalto, 2024).

Pela Lei nº 14.948/2024, entende-se como hidrogênio verde no Brasil aquele que é produzido por eletrólise da água, utilizando fontes renováveis como a solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público. Além do hidrogênio verde, o documento também define o hidrogênio de baixa emissão de carbono, como sendo produzido a partir de fontes diversas que possuam emissões de gases de efeito estufa e que, conforme análise do ciclo de vida, apresentem uma emissão menor ou igual a 7 kgCO₂eq/kgH₂. O documento também menciona o hidrogênio renovável, que é o hidrogênio de baixa emissão de carbono, obtido a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis (Planalto, 2024).

A sustentabilidade é outro aspecto da Lei nº 14.948/2024. A legislação prevê minimizar os impactos ambientais da produção e uso do hidrogênio verde, assegurando que a expansão desse setor contribua para a redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Além disso, a lei estabelece a Política Nacional do Hidrogênio Verde, que define metas e prioridades do governo para o desenvolvimento do setor, com revisões periódicas para ajustar as diretrizes conforme as evoluções tecnológicas e de mercado.

Pelo projeto, caberá à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) autorizar a produção, importação, transporte, exportação e armazenagem de hidrogênio. A produção, no entanto, só poderá ser permitida a empresas brasileiras sediadas no país (Planalto, 2024).

2.2 Políticas e incentivos ao hidrogênio a nível estadual

Alguns estados brasileiros estão implementando leis e decretos para incentivar o desenvolvimento do hidrogênio verde. Os estados que se destacam nesse contexto são: Ceará, Pernambuco, Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo.

O Ceará foi o primeiro estado brasileiro a ter uma lei específica para o hidrogênio verde, a Lei nº 18.459/2023, que cria um programa estadual de desenvolvimento do hidrogênio verde e prevê a criação de um conselho estadual de governança e desenvolvimento da produção de hidrogênio verde, sustentável e seus derivados (ALECE, 2023). O estado de Pernambuco também possui uma lei específica para o hidrogênio verde, a Lei nº 17.976, que visa fomentar a produção, armazenamento, distribuição e uso do hidrogênio verde, incentivando projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. A lei estabelece diretrizes para a criação de um ambiente regulatório favorável e a promoção de parcerias público-privadas para viabilizar a transição energética do estado, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental (Alepe Legis, 2022).

No Rio de Janeiro, o Projeto de lei nº 1460/2023 institui a política da inserção do hidrogênio verde como fonte de energia renovável no âmbito do estado. Além disso, o PL 1245/2023 altera a Lei Nº 6.979 de 31 de março de 2015 que trata sobre tratamentos tributários especiais a estabelecimentos industriais. Na prática, o projeto em questão amplia o escopo de redução do ICMS para 2% a fim de contemplar todos os estabelecimentos cujas atividades ou processos industriais tenham como matriz energética o uso do hidrogênio (ALERJ, 2023). Em São Paulo, o Programa de Hidrogênio de baixo Carbono visa fomentar a demanda, produção, pesquisa, desenvolvimento e inovação no mercado de hidrogênio produzido via eletrólise e biomassa. O estado também lançou um pacote de medidas de R\$ 500 milhões para projetos de descarbonização e transição energética nos municípios paulistas por meio do programa Desenvolve SP (Brasil, M., 2023). Já no Espírito Santo, houve a instituição do Programa GERAR Hidrogênio, cujo objetivo é impulsionar o uso sustentável do hidrogênio para fortalecer a economia local (SEAMA, 2023).

2.3 Apoio financeiro e fomento à pesquisa e desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil

Para impulsionar o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil, diversos mecanismos de apoio financeiro e instrumentos de fomento à pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) estão sendo disponibilizados em âmbito federal, estadual e municipal.

No contexto federal, o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) oferece linhas de financiamento para projetos de PD&I em diversas áreas incluindo o hidrogênio verde, em que empresas, instituições de pesquisa e ensino e ONGs podem se candidatar aos recursos disponibilizados. Já o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) disponibiliza linhas de crédito específicas para projetos relacionados ao hidrogênio verde, com taxas de juros atrativas e prazos flexíveis. Empresas da cadeia produtiva, desde a produção até o uso final, podem se beneficiar para financiar seus investimentos. A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), agência pública que apoia projetos de PD&I em áreas estratégicas, oferece diversas modalidades de financiamento para o hidrogênio verde, como bolsas de estudo e linhas de crédito direcionadas a pesquisadores, empresas e instituições que desenvolvam projetos inovadores.

Os programas governamentais proporcionam um suporte estruturado e contínuo para o avanço do hidrogênio verde no país. O Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), mencionado anteriormente e promovido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), apoia projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação por meio de editais de chamada pública e incentivo a projetos piloto, tem como objetivo impulsionar a cadeia de valor do hidrogênio verde no Brasil, e prevê a criação do Fundo Nacional do Hidrogênio Verde para financiar projetos de pesquisa, desenvolvimento, demonstração e comercialização dessa tecnologia.

Além disso, o programa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) financia projetos de PD&I em energias renováveis, incluindo hidrogênio verde, por meio de chamadas públicas e recursos destinados ao desenvolvimento de novas tecnologias. Ademais, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) apoia projetos científicos e tecnológicos com a concessão de bolsas de pesquisa e auxílios financeiros, enquanto a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) promove a formação de recursos humanos de alto nível por meio de bolsas de estudo para mestrado, doutorado e pós-doutorado, além de programas de cooperação internacional que facilitam o intercâmbio de conhecimento e tecnologia.

No âmbito estadual, diversos estados brasileiros estão lançando seus próprios programas de fomento ao hidrogênio verde, com medidas como leis de incentivo, já mencionadas anteriormente. Além disso, programas de parcerias entre governos estaduais, universidades e empresas privadas são estabelecidos para financiar e desenvolver projetos conjuntos de PD&I em hidrogênio verde.

Instituições de pesquisa e universidades também desempenham um papel importante no desenvolvimento e implementação de tecnologias de hidrogênio verde. Universidades federais e estaduais também contribuem significativamente por meio de programas de pós-graduação, que formam pesquisadores e desenvolvem teses e dissertações focadas no hidrogênio verde.

Além dos mecanismos de financiamento e suporte técnico, as parcerias público-privadas (PPP) são instrumentos importantes para a promoção do hidrogênio verde. Essas parcerias permitem o compartilhamento de riscos e recursos entre governos e empresas privadas, facilitando a cooperação no financiamento e execução de projetos, bem como o desenvolvimento conjunto de infraestrutura para produção e uso de hidrogênio verde.

2.4 Padronização e certificação da qualidade do hidrogênio verde

A padronização e a certificação da qualidade do hidrogênio verde são ferramentas essenciais para o desenvolvimento seguro, confiável e sustentável dessa fonte de energia renovável no Brasil.

2.4.1 Certificação

Por se tratar de um vetor energético que contribuirá para o cumprimento das metas de descarbonização, a certificação do hidrogênio produzido depende da quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitido durante sua obtenção para ser considerado hidrogênio dito renovável, ou limpo, ou de baixo carbono.

Segundo o padrão proposto pelo parlamento europeu, o hidrogênio certificado enquanto renovável é aquele produzido a partir da eletrólise da água ou da reforma do biogás, onde pelo menos 90% da energia elétrica utilizada no processo deve ser proveniente de uma fonte renovável local. Entretanto, nos momentos

de intermitência das fontes renováveis, a rede pode ser suprida pela energia da rede de distribuição, conquanto que possua baixa emissão de CO₂, ou a partir de contrato de compra de energia renovável direto da rede¹ (Europa.eu, 2018).

O padrão de certificação chinês apresenta duas outras definições além do hidrogênio dito renovável, são o “hidrogênio de baixo carbono” e o “hidrogênio limpo” (Li et al., 2021). O hidrogênio produzido a partir de qualquer via tecnológica que tenha uma intensidade de carbono inferior à da via de produção fóssil existente (<29.02 kgCO₂eq/kgH₂) é denominado por hidrogênio de baixo carbono (produzido a partir de gás natural ou carvão com captura e armazenamento de carbono, e a reforma do metano). Já o hidrogênio dito limpo, é o H₂ obtido através da gaseificação do carvão com o padrão de índice de emissão de GEE de <13.99 kgCO₂eq/kgH₂ (CGEP, 2021; IRENA, 2019; IEA, 2021).

No ano de 2022, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) lançou seu programa de Certificação de Hidrogênio a partir do padrão europeu estabelecido na Diretiva de Energia Renovável (RED II/III), no qual o produtor de hidrogênio pode ter sua produção enquadrada enquanto “hidrogênio de fonte renovável”, fabricado a partir de energia eólica, solar ou hidrelétrica e “hidrogênio de fonte parcialmente renovável”, que contam com o complemento de outra fonte, de empreendimentos termelétricos (CCEE, 2022a; CCEE, 2022b).

Entre as plantas-piloto certificadas pela CCEE, estão a planta de hidrogênio verde da EDP no Complexo Termelétrico do Pecém, em São Gonçalo do Amarante, no Ceará. A planta produziu 295 kg de hidrogênio de fonte renovável, a partir de eletrólise PEM com fonte fotovoltaica, no período avaliado de 01/07/2023 a 14/07/2023. Já a planta de hidrogênio renovável (H₂V) da Eletrobras Furnas, instalada na usina hidrelétrica de Itumbiara (MG/GO) foi certificada pela produção de 730 kg de hidrogênio de fonte renovável, a partir de eletrólise alcalina com fonte fotovoltaica e hidráulica, no período avaliado de 10/10/2023 a 24/10/2023 (CCEE, 2023).

O artigo 15 da Lei 14.948, de 2 de agosto de 2024 instituiu o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂), para promover a utilização do hidrogênio de forma sustentável a partir das informações contidas em certificado emitido por empresa certificadora ao produto hidrogênio e derivados. A certificação do hidrogênio pelo SBCH₂ adotará a intensidade de emissões de GEE relacionada ao hidrogênio produzido no território nacional como atributo, com base em análise do ciclo de vida (Planalto, 2024).

2.4.2 Padronização

A padronização do hidrogênio verde é essencial para assegurar que sua produção, armazenamento, transporte e utilização sigam procedimentos uniformes e consistentes. No contexto internacional, a *International Organization for Standardization* (ISO) tem um comitê técnico dedicado ao hidrogênio, o ISO/TC 197, que desenvolve normas internacionais abrangendo todos os aspectos da cadeia de valor do hidrogênio, desde sua produção até o uso final. Algumas normas relevantes incluem:

- ISO 14687: Especifica as características mínimas de qualidade do combustível de hidrogênio distribuído para utilização em aplicações veiculares e estacionárias (International Standard, 2019).
- ISO 16111: Define os requisitos aplicáveis ao material, projeto, construção e teste de sistemas transportáveis de armazenamento de gás hidrogênio, denominados “conjunto de hidretos metálicos” (International Standard, 2018).

Já a *International Electrotechnical Commission* (IEC) tem o comitê técnico IEC TC 105, que estabelece normas para tecnologias de células a combustível e sistemas de energia a hidrogênio. Essas normas são fundamentais para garantir a interoperabilidade e a segurança dos sistemas de energia baseados em hidrogênio (IEC, 2023).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a principal entidade responsável pela padronização. A ABNT adota e adapta normas internacionais para o contexto brasileiro e desenvolve normas nacionais específicas. Entre as normas desenvolvidas e adotadas pela ABNT estão:

- ABNT NBR ISO 14687-1: referente a combustível de hidrogênio – especificação do produto – parte 1: todas as aplicações, exceto células a combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos rodoviários automotores (Normas, 2010a).
- ABNT ISO/TR 15916: fornece diretrizes para o uso de hidrogênio em suas formas gasosa e líquida,

¹ Comumente denominado como *Power Purchase Agreement – PPA*, neste caso, a energia contratada será proveniente de uma fonte renovável.

bem como o seu armazenamento em uma dessas ou outras formas (hidretos). Identifica as preocupações básicas de segurança, perigos e riscos e descreve as propriedades do hidrogênio que são relevantes para a segurança (Normas, 2010b).

- ABNT NBR ISO 16110-1: trata a respeito de geradores de hidrogênio que utilizam tecnologias de processamento de combustível, aplica-se a sistemas de geração de hidrogênio, embalados, autocontidos ou compatíveis de fábrica com uma capacidade menor que 400 m³/h a 0°C e 101,325 kPa, referidos como geradores de hidrogênio, que convertem um combustível de entrada em uma corrente rica em hidrogênio de composição e condições adequadas para o tipo de dispositivo que utilizará o hidrogênio (por exemplo, um sistema de geração de energia tipo célula de combustível ou um sistema de compressão, armazenamento e distribuição de hidrogênio) (Normas, 2010c).
- NBR ISO 17268: trata de dispositivos de conexão para reabastecimento de veículos terrestres com hidrogênio gasoso, aplica-se à verificação do projeto, da segurança e da operação de dispositivos de conexão para reabastecimento de veículos terrestres com hidrogênio gasosos (VTHG) (Normas, 2014).
- Resolução nº 5.947, de 1º de junho de 2021, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT): referente a transporte de produtos perigosos e a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, que atualiza o regulamento para o transporte rodoviário de produtos perigosos (ANTT, 2021).

3 Legislação para combustíveis sintéticos

No Brasil, a legislação que aborda a produção e utilização de combustíveis sintéticos derivados de fontes renováveis está inserida em um contexto de políticas energéticas e ambientais voltadas para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a promoção da sustentabilidade no setor de energia. Um dos principais pilares dessa legislação é o *RenovaBio*, instituído pela Lei nº 13.576/2017, que visa ampliar a produção e o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. O *RenovaBio* não se restringe apenas aos biocombustíveis tradicionais como etanol e biodiesel, mas também reconhece e incentiva a produção de biocombustíveis avançados e combustíveis sintéticos derivados de fontes renováveis, que possam contribuir significativamente para a redução das emissões de carbono (MME, 2017). O *RenovaBio* também introduziu o Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis (CBIO), incentivando a produção e o consumo de biocombustíveis avançados e promovendo a competitividade e sustentabilidade do mercado.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável por regulamentar e fiscalizar o setor de biocombustíveis no país. A ANP estabelece normas técnicas e de qualidade para os biocombustíveis e combustíveis sintéticos, garantindo que atendam aos requisitos de desempenho e segurança necessários para o uso nos veículos e na infraestrutura de transporte brasileira. Essas normas incluem especificações quanto ao teor de componentes, características de combustão, estabilidade e outras propriedades essenciais para o funcionamento adequado e seguro dos produtos no mercado nacional. Entre os principais normativos emitidos pela ANP, destacam-se aqueles relacionados ao biodiesel, etanol e ao programa *RenovaBio*.

O biodiesel, por exemplo, é regulamentado pela Resolução ANP nº 14/2012 (Legisweb, 2012), que estabelece rigorosas especificações de qualidade, incluindo teor de éster metílico, teor de água, contaminantes e índice de acidez. Essas normas garantem que o biodiesel atenda aos padrões exigidos para ser utilizado de forma segura e eficiente, contribuindo para a redução das emissões de poluentes. Já o etanol hidratado combustível (EHC) é regulado pela Resolução ANP nº 58/2014 (Legisweb, 2014), que define critérios como teor de etanol anidro, teor de água, impurezas e metanol. Essas especificações são essenciais para garantir a qualidade do etanol utilizado como combustível nos veículos brasileiros, promovendo maior eficiência energética e redução de emissões.

Além das especificações técnicas e dos programas de certificação, a ANP realiza o Programa de Monitoramento da Qualidade Combustível (PMQC), que consiste na fiscalização e no controle da qualidade dos biocombustíveis comercializados no país. Esse programa inclui a coleta de amostras e análises laboratoriais para verificar se os biocombustíveis estão em conformidade com as normas estabelecidas, garantindo a segurança e a confiabilidade dos produtos disponíveis no mercado brasileiro.

Já a Resolução ANP 856/2021 estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional. Esta norma regula as misturas de biocombustíveis com querosene de

aviação (QAV) fóssil, com o objetivo de garantir a qualidade e a segurança dos combustíveis utilizados em aeronaves comerciais de grande porte (ANP, 2024).

A resolução define os tipos de biocombustíveis permitidos, os quais podem ser misturados ao QAV em até 50% em volume, incluindo o SPK (querosene parafínico sintético), SPK hidroprocessado por Fischer-Tropsch (SPK-FT), SPK de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA), SPK com aromáticos (SPK/A) e SPK por álcool (SPK-ATJ). Além disso, permite a mistura de SIP (querosene isoparafínico) em até 10% em volume (ANP, 2020; EPE, 2023).

Essas especificações visam assegurar que os biocombustíveis atendam aos mesmos parâmetros de segurança e desempenho dos combustíveis fósseis, facilitando a transição para fontes de energia mais sustentáveis na aviação.

No Brasil, a regulamentação da legislação para combustíveis sintéticos ainda está em desenvolvimento, mas já há algumas iniciativas voltadas para estimular sua produção e uso. Essas iniciativas serão abordadas a seguir.

3.1 Incentivo ao uso de combustíveis sintéticos no Brasil

O Projeto de Lei do Combustível do Futuro foi apresentado pelo governo brasileiro em setembro de 2023 e tem como objetivo principal descarbonizar a matriz energética dos transportes no Brasil e promover a mobilidade sustentável (Câmara dos Deputados, 2023a). O texto do projeto, que substitui o Projeto de Lei 528/2020 e tem como base o PL 4516/23, foi aprovado pela Câmara dos Deputados em setembro de 2024 (Câmara dos Deputados, 2023b) e sancionado pelo presidente em outubro de 2024, dando origem à Lei 14.933/2024. De acordo com a lei, o novo percentual de mistura de etanol à gasolina será de 27%, com variação entre 22% e 35%. Atualmente, a mistura pode chegar a 27,5%, sendo, no mínimo, de 18% de etanol. O biodiesel poderá ser acrescentado ao diesel derivado de petróleo em um ponto percentual de mistura anualmente a partir de março de 2025 até atingir 20% em março de 2030. Caberá ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) definir o percentual da mistura, que poderá ficar entre 13% e 25% (Senado Federal, 2024b).

Por meio do Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (Probioqav), a lei também incentiva a pesquisa, a produção e a adição no querosene das aeronaves do chamado combustível sustentável de aviação (*Sustainable Aviation Fuel* - SAF, na sigla em inglês). Em 2027 e 2028, as companhias aéreas deverão diminuir a emissão de gases do efeito estufa em no mínimo 1% ao ano. A partir de 2029, a meta de redução aumenta um ponto percentual anualmente até 2037, quando deverá atingir pelo menos 10%.

A redução da emissão de gases de efeito estufa poderá ser feita por meio da mistura do SAF ao combustível regular da aviação ou por outros meios alternativos. A Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) poderá dispensar da obrigação empresas sem acesso ao combustível sustentável nos aeroportos que operam.

O texto cria ainda o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano, para incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso do biometano e do biogás na matriz energética brasileira.

O CNPE definirá metas anuais para redução da emissão de gases do efeito estufa pelo setor de gás natural por meio do uso do biometano. A meta entrará em vigor em janeiro de 2026, com valor inicial de 1% e não poderá ultrapassar 10%.

Ainda de acordo com a lei, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) vai regular e fiscalizar os combustíveis sintéticos, produzidos a partir de rotas tecnológicas, a exemplo de processos termoquímicos e catalíticos, e que podem substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Senado Federal, 2024b).

4 Aspectos regulatórios da captura de carbono

A captura e armazenamento de carbono (*Carbon Capture and Storage* – CCS) é uma tecnologia essencial para reduzir gases de efeito estufa. Mundialmente, alguns países já possuem regulamentações consolidadas em relação a esse assunto, no entanto, no Brasil o tema é recente, com debates ainda em desenvolvimento para estruturar um marco regulatório adequado. Esta seção apresenta um panorama geral, abordando o contexto nacional e referências internacionais.

4.1 Leis e normas que tratam da captura, transporte, armazenamento e utilização do dióxido de carbono (CO₂)

As leis e normas que regulam a captura, transporte, armazenamento e utilização do dióxido de carbono (CO₂) são fundamentais para orientar práticas seguras e eficazes no contexto da mitigação das mudanças climáticas. Essas regulamentações variam amplamente de país para país e podem incluir diretivas específicas, legislação ambiental geral e políticas de mercado de carbono.

4.1.1 União Europeia

Na União Europeia, a Diretiva de Armazenamento Geológico de CO₂ (2009/31/CE) estabelece um quadro regulatório detalhado para o armazenamento seguro de CO₂ em formações geológicas. Essa diretiva define critérios rigorosos para a seleção de locais de armazenamento, procedimentos de licenciamento, monitoramento contínuo das instalações e encerramento seguro dos projetos (EUR-Lex, 2009). Além disso, o Sistema de Comércio de Emissões da UE (EU ETS) influencia indiretamente as práticas de captura e armazenamento de carbono (*carbon capture and storage – CCS*) ao criar um mercado para a negociação de permissões de emissão, incentivando as empresas a reduzirem suas emissões de gases de efeito estufa.

4.1.2 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (*Environmental Protection Agency - EPA*) regula diversos aspectos relacionados à CCS, desde os padrões de engenharia para a captura de CO₂ até os requisitos para o armazenamento seguro. Essas regulamentações abrangem monitoramento de longo prazo, planos de contingência e relatórios para garantir a conformidade com normas ambientais e de segurança.

A EPA criou um quadro regulatório para garantir o armazenamento seguro do CO₂, minimizando riscos para a água potável, saúde humana e ecossistemas. Os projetos de sequestro geológico devem obter uma licença específica da EPA para operar poços da Classe VI, destinados ao armazenamento permanente de CO₂. O processo de licenciamento envolve uma avaliação detalhada do local, modelagem da área de revisão (AoR) e planos de monitoramento, além de relatórios contínuos para garantir que os padrões sejam cumpridos (EPA, 2017).

As regulamentações da EPA também exigem planos de contingência e monitoramento a longo prazo. Por exemplo, a regulação dos poços da Classe VI inclui medidas rigorosas para prevenir migração de CO₂ para fontes de água potável, e o monitoramento dessas áreas é contínuo para detectar possíveis falhas ou vazamentos. Em caso de qualquer problema, há ações corretivas obrigatórias para minimizar o impacto ambiental e garantir a segurança (Mayer Brown, 2022).

4.1.3 Brasil

O Brasil avança na construção de um marco regulatório robusto e abrangente para a CCS. O Projeto de Lei nº 1425/2022, em tramitação na Câmara dos Deputados, desponta como um marco legal para o armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos, visando a descarbonização da economia. A iniciativa, aprovada pela Comissão de Minas e Energia, aguarda análise pelo Plenário e representa um passo crucial para a viabilização de projetos de CCS em larga escala (Câmara dos Deputados, 2022).

Em paralelo, o Projeto de Lei nº 528/2020 deu origem à Lei nº 14.993 de 08 de outubro de 2024, que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, aborda a captura e a estocagem geológica de CO₂, além de outras medidas para descarbonizar a matriz energética. A Lei consolida o compromisso do Brasil com a transição para uma economia de baixo carbono (Câmara dos Deputados, 2020; Senado Federal, 2024a).

A Política Nacional sobre Mudança do Clima também se insere nesse contexto, definindo diretrizes para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, incluindo a captura e o armazenamento de CO₂. Esse direcionamento estratégico demonstra a visão de longo prazo do país na busca por um futuro mais verde e resiliente (Ministério da Fazenda, 2023).

Vale ressaltar que a legislação brasileira sobre o tema ainda está em desenvolvimento. Esse cenário dinâmico reflete a relevância crescente da CCS para a agenda ambiental do Brasil, impulsionando a busca por soluções inovadoras para o combate às mudanças climáticas.

4.2 Mecanismos de precificação do carbono e sua influência na viabilidade da captura de carbono

Os mecanismos de precificação do carbono representam uma abordagem estratégica e econômica para lidar com as emissões de gases de efeito estufa, sendo essenciais para a viabilidade econômica da captura de carbono (CCS) e outras tecnologias de mitigação. Esses mecanismos, como os sistemas de comércio de emissões (ETS) e a taxação de carbono, são projetados para internalizar os custos ambientais das emissões de carbono na economia, incentivando a redução dessas emissões e a adoção de práticas mais limpas.

4.2.1 Sistemas de Comércio de Emissões (ETS)

Os ETS funcionam estabelecendo um limite máximo de emissões permitidas e distribuindo permissões equivalentes a essa quantidade entre as empresas. Essas permissões podem ser compradas e vendidas no mercado, criando um valor econômico para as emissões de carbono. Empresas que conseguem reduzir suas emissões abaixo do limite podem vender suas permissões excedentes, enquanto aquelas que excedem o limite precisam comprar permissões adicionais. Para a CCS, isso significa que empresas que capturam e armazenam CO₂ podem gerar créditos de carbono vendáveis, que ajudam a compensar os custos associados à implementação da tecnologia.

4.2.2 Taxação de Carbono

A taxação de carbono impõe um preço direto sobre cada tonelada de CO₂ emitida. Empresas e consumidores pagam uma taxa proporcional às suas emissões de carbono, criando um incentivo econômico para reduzir essas emissões. Para a CCS, isso significa que empresas que investem em tecnologias de captura de carbono podem evitar ou reduzir o montante de impostos sobre o carbono que precisam pagar, tornando a tecnologia mais atrativa financeiramente.

4.2.3 Influência na Viabilidade da Captura de Carbono

Os mecanismos de precificação do carbono têm várias influências positivas na viabilidade da CCS:

- **Incentivos Financeiros:** Proporcionam incentivos claros para as empresas investirem em tecnologias de CCS, pois podem gerar receita através da venda de créditos de carbono ou evitar custos de taxação de carbono.
- **Desenvolvimento de Mercado:** Estimulam o desenvolvimento de um mercado para tecnologias de baixo carbono, incluindo a CCS. Isso promove investimentos em pesquisa e desenvolvimento, melhoria da eficiência e redução de custos na captura de carbono, e desenvolvimento de infraestrutura para armazenamento seguro de CO₂.
- **Planejamento Estratégico:** Empresas e governos podem fazer planos estratégicos de longo prazo, baseados em preços previsíveis de carbono, para cumprir metas de redução de emissões e se preparar para futuras regulamentações climáticas.

4.3 Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões

O PL 412/2022 é um projeto de lei que propõe a regulamentação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), criando um mercado de carbono no Brasil com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e estimular inovações tecnológicas voltadas para a descarbonização (Ministério da Fazenda, 2023).

O projeto estabelece um sistema de comércio de emissões que define um limite máximo para as emissões de carbono permitidas e distribui permissões equivalentes a esse limite entre as empresas, mecanismo explicado anteriormente na seção 4.2.1. Atualmente, o PL 412/2022 aguarda votação no Senado (Câmara dos Deputados, 2022).

Paralelamente, o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima instituiu um grupo de trabalho temporário, co-presidido pelos Ministérios da Fazenda e do Meio Ambiente, para regulamentar e implementar o SBCE. Este grupo é coordenado pela Secretaria-Executiva do Comitê e pelo Ministério da Fazenda, e será responsável pela criação das normas e diretrizes necessárias para a operação do sistema.

O PL 412/2022 representa um avanço significativo na política climática do Brasil, alinhando o país com as políticas internacionais e reforçando o compromisso com a redução das emissões de gases de efeito estufa por meio de mecanismos de mercado e inovação tecnológica.

5 Conclusão

O debate sobre transição para fontes energéticas mais limpas é de grande importância, tendo em vista a necessidade de diversificar as matrizes energéticas, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo a redução de emissão de gases de efeito estufa, responsáveis pela mudança climática. Assim, dentre as tecnologias emergentes que se destacam como promissoras nesse contexto, estão a produção de hidrogênio verde e de combustíveis sintéticos e o processo de captura de carbono. Essas soluções trazem grandes chances de impulsionar a descarbonização de áreas estratégicas, diversificar a fonte de energia e estimular a inovação tecnológica. A disseminação dos combustíveis sintéticos enfrenta diversos obstáculos, que incluem desafios tecnológicos, econômicos e regulatórios. Para superá-los, diversas iniciativas estão sendo realizadas tanto no Brasil quanto mundialmente, buscando viabilizar e aumentar o uso desses combustíveis.

No Brasil, a Lei nº 14.948/2024, o “Marco Legal do Hidrogênio Verde”, foi sancionada em agosto de 2024 e estabelece diretrizes para a produção, transporte, armazenamento, comercialização e uso do hidrogênio verde no Brasil, além de incluir a criação de um Conselho Nacional do Hidrogênio Verde, incentivos fiscais e financeiros, e a Política Nacional do Hidrogênio Verde, que estipula metas e prioridades para o setor. Além disso, a Lei criou o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2) para promover o uso sustentável do hidrogênio no país.

A legislação sobre combustíveis sintéticos derivados de fontes renováveis está alinhada com as políticas energéticas e ambientais que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade. O RenovaBio, estabelecido pela Lei nº 13.576/2017, incentiva a produção e uso de biocombustíveis avançados e combustíveis sintéticos. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamenta e fiscaliza o setor, garantindo a qualidade e segurança dos biocombustíveis.

A Lei nº 14.933/2024, conhecida como Lei dos Combustíveis do Futuro, promove a descarbonização do setor de transportes no Brasil, estabelecendo regras para a mistura de combustíveis, incentivando o uso de biometano e combustível sustentável de aviação (SAF). A regulamentação de combustíveis sintéticos pela ANP também reforça o compromisso do Brasil com a transição energética e a redução de emissões de gases de efeito estufa.

As regulamentações sobre captura, transporte, armazenamento e utilização do dióxido de carbono (CO₂) são cruciais para mitigar mudanças climáticas. Na União Europeia e nos Estados Unidos, existem quadros regulatórios detalhados que garantem segurança e eficácia nas práticas de CCS (captura e armazenamento de carbono). No Brasil, a Lei nº 14.993/2024 aborda a captura e a estocagem geológica de CO₂, promovendo segurança e eficiência nessas operações.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à ENGIE pelo financiamento do projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) intitulado “PD 00403-0058/2024 - Rotas Tecnológicas para Produção de Combustíveis Sintéticos”, que resultou nesse artigo.

Referências bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2023) *Chamada para projetos de hidrogênio renovável entra em consulta pública*. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/> (Acesso em 3 de julho de 2024).

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2024). *ANEEL aprova Chamada para projetos de hidrogênio no contexto do Setor Elétrico*. [online] Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aneel-aprova-chamada-para-projetos-de-hidrogenio-no-contexto-do-setor-eletrico> (Acesso em 22 de julho de 2024).

ALECE (2024). *LEI Nº 18.459, DE 07.09.23 (D.O. 11.09.23)*. [online] Ce.gov.br. Disponível em: <https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/8476-lei-n-18-459-de-07-09-23-d-o-11-09-23> (Acesso em 08 de julho de 2024).

- Alepe Legis (2022). *Alepe Legis - Portal da Legislação Estadual de Pernambuco*. [online] Disponível em: <https://legis.alepe.pe.gov.br/texto.aspx?id=70452> (Acesso em 8 de julho de 2024).
- ALERJ (2023) *ALERJ – Projeto de Lei nº 1245/2023*. [online] Disponível em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/scpro2327.nsf/e00a7c3c8652b69a83256cca00646ee5/93aa658e02bd2753032589c6005c543c?OpenDocument> (Acesso em 22 de julho de 2024).
- ALERJ (2023). *ALERJ - Assembléia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro*. [online] Disponível em: http://www3.alerj.rj.gov.br/lotus_notes/default.asp?id=161&url=L3NjcHJvMjMyNy5uc2YvMThjMWRkNjhmOTZiZTNiNzgzMjU2NmVjMDAxOGQ4MzMvZTlmOTJkZmNiMjBkMWExYjAzMjU4OWRiMDA2MjAzNWE/T3BlbkRvY3VtZW50 (Acesso em 22 de julho de 2024).
- ANP (2020). *Biocombustíveis de aviação*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis-de-aviacao> (Acesso em 25 de julho de 2024).
- ANP (2024). *Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF): novos desafios para a regulação*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2024/arquivos/2024-02-21-fabio-vinhado-workshopibp.pdf> (Acesso em 25 de julho de 2024).
- ANTT (2021). *Resolução nº 5.947, de 1º de junho de 2021*. Disponível em: https://anttlegis.antt.gov.br/action/ActionDatalegis.php?acao=detalharAto&tipo=RES&numeroAto=00005947&seqAto=000&valorAno=2021&orgao=DG/ANTT/MI&codTipo=&desItem=&desItemFim=&cod_menu=5408&cod_modulo=161&pesquisa=true (Acesso em 09 de julho de 2024).
- Brasil, M. (2023). *Programa paulista para o hidrogênio deve incentivar reforma do etanol e biogás | eixos*. [online] eixos. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/programa-paulista-para-o-hidrogenio-deve-incentivar-reforma-do-etanol-e-biogas/> (Acesso em 23 de julho de 2024).
- Câmara dos Deputados (2020). *PL 528/2020*. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2238434> (Acesso em 23 jul. 2024).
- Câmara dos Deputados (2022). *PL 1425/2022*. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2388818&fichaAmigavel=nao> (Acesso em 23 jul. 2024).
- Câmara dos Deputados (2022). *PL 412/2022*. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2397761&fichaAmigavel=nao> (Acesso em 23 jul. 2024).
- Câmara dos Deputados (2023a). *PL 4516/2023*. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2388242> (Acesso em 22 de julho de 2024).
- Câmara dos Deputados (2023b). *Projeto do governo incentiva uso de combustíveis sustentáveis no setor de transportes*. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/999000-projeto-do-governo-incentiva-uso-de-combustiveis-sustentaveis-no-setor-de-transportes#:~:text=O%20projeto%20estabelece%20que%20a,pe%C3%A7as%20dos%20motores%20a%20combust%C3%A3o> (Acesso em 22 de julho de 2024).
- Carolyn, Huey., Hameed, Metghalchi., Yiannis, A., Levendis. (2023). *E-Fuels as Reduced Carbon Emission Options*. ASME open journal of engineering, 3 Available from: 10.1115/1.4065731
- CCEE (2022a). *Certificação de energia*. Disponível em: https://www.ccee.org.br/en/web/guest/certificacao_de_energia (Acesso em 24 de julho de 2024).
- CCEE (2022b). *CCEE lança primeira certificação brasileira de hidrogênio renovável*. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/ccee-lanca-primeira-certificacao-brasileira-de-hidrogenio-renovavel> (Acesso em 24 de julho de 2024).
- CCEE (2023). *Registros dos certificados de hidrogênio de baixo carbono*. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/certificadas-h2> (Acesso em 25 de julho de 2024).
- CGEP (2021). *Hydrogen Fact Sheet: Production of Low Carbon Hydrogen*. Disponível em: https://www.energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/pictures/HydrogenProduction_CGEP_FactSheet_052621.pdf (Acesso em 24 de julho 2024).

- Elene, Pantskhava., Maka, Jishkariani. (2024). *Green hydrogen - the key to a sustainable energy future: (socio-economic benefits)*. GEORGIAN SCIENTISTS, Available from: 10.52340/gS.2024.06.02.36
- EPA (2017). *Carbon Dioxide Capture and Sequestration: Storage Safety and Security*. Disponível em: https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/carbon-dioxide-capture-and-sequestration-storage-safety-and-security_.html (Acesso em 17 de julho de 2024).
- EPE (2023). *Combustíveis Sustentáveis de Aviação - SAF*. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-746/FS-EPE-DPG-SDB-2023-03-SAF_PT.pdf (Acesso em 25 de julho de 2024).
- EUR-Lex (2009). *Directive 2009/31/EC*. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009L0031> (Acesso em 17 de julho de 2024).
- Europa.eu. (2018). *Diretiva - 2018/2002 - EN - EUR-Lex*. [online] Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32018L2002> (Acesso em 24 de julho 2024).
- GSGA (2024). *Projeto de Lei “Combustíveis do Futuro” aprovado na Câmara dos Deputados*. Disponível em: <https://gsga.com.br/projeto-de-lei-combustiveis-do-futuro-aprovado-na-camara-dos-deputados/> (Acesso em 22 de julho de 2024).
- Huang, Zhen et al. (2022). Renewable synthetic fuel: turning carbon dioxide back into fuel. *Frontiers in Energy*, v. 16, n. 2, p. 145-149.
- Hyewon, Jang. (2024). International Legal Regulation of Carbon Capture and Storage(CCS): Focusing on the London Protocol. *Gugje beob pyeong'ron*, 68, 155-180. Available from: 10.25197/kilr.2024.68.155
- IEA (2021). *Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes*. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021> (Acesso em 24 de julho 2024).
- IEA (2023). *The Role of E-fuels in Decarbonising Transport – Analysis* [online] Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-e-fuels-in-decarbonising-transport> (Acesso em 22 de novembro de 2024).
- IEC (2023). *TC 105 – Fuel Cell technologies*. Disponível em: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:417365329730097:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1309,25 (Acesso em 09 de julho de 2024).
- International Standard (2018). *ISO 16111*. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/67952/220967facc3b4263815b3302f1e7cfe4/ISO-16111-2018.pdf> (Acesso em 09 de julho de 2024).
- International Standard (2019). *ISO 14687*. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/69539/4adc159648da4454a4b39d0b87ac348e/ISO-14687-2019.pdf> (Acesso em 09 de julho de 2024).
- IRENA (2019). *Hydrogen: A renewable energy perspective*. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf (Acesso em 24 de julho de 2024).
- Legisweb (2012). *Resolução ANP nº 14 de 11/05/2012*. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=274067> (Acesso em 16 de julho de 2024).
- Legisweb (2014). *Resolução ANP nº 58 de 17/10/2014*. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=252438> (Acesso em 16 de julho de 2024).
- Li, Y., Phoumin, H. e Kimura, S. (2021). *Hydrogen Sourced from Renewables and Clean Energy: A Feasibility Study of Achieving Large-Scale Demonstration*. [online] Disponível em: https://www.eria.org/uploads/media/Research-Project-Report/RPR-2021-19/Hydrogen-Sourced-from-Renewables-and-Clean-Energy_A-Feasibility-Study-of-Achieving-Large-scale-Demonstration.pdf. (Acesso em 24 de julho de 2024).
- Mayer Brown (2022). *Carbon capture, utilization, and storage: class VI wells and US state primacy*. Disponível em: <https://www.mayerbrown.com/en/insights/publications/2022/06/carbon-capture-utilization-and-storage-class-vi-wells-and-us-state-primacy> (Acesso em 17 jul. 2024).

Ministério da Fazenda (2023). *Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões*. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/orgaos/spe/desenvolvimento-economico-sustentavel/sistema-brasileiro-de-comercio-de-emissoes> (Acesso em 23 jul. 2024).

Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (2022) *Iniciativa Brasileira de Hidrogênio (IBH2) é publicada pelo MCTI*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/> (Acesso em 3 de julho de 2024).

Ministério de Minas e Energia. (2021). *Programa Nacional do Hidrogênio: Proposta de Diretrizes*. [online] Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/> (Acesso em 3 de julho de 2024).

Ministério de Minas e Energia. (2022). *Resolução institui o Programa Nacional do Hidrogênio*. [online] Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias (Acesso em 3 de julho de 2024).

Ministério de Minas e Energia. (2023) *Plano Trienal 2023-2025*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanoTrabalhoTrienalPNH2.pdf> (Acesso em 3 de julho de 2024).

MME (2017). *RenovaBio*. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1#:~:text=A%20Lei%20n%C2%BA%2013.576%2C%20de,biocombust%C3%ADveis%20na%20matriz%20energ%C3%A9tica%20brasileira> (Acesso em 16 de julho de 2024).

Normas (2010a). *ABNT NBR ISO 14687-1*. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29404/nbriso14687-1-combustivel-de-hidrogenio-especificacao-do-produto-parte-1-todas-as-aplicacoes-exceto-celulas-a-combustivel-de-membrana-de-troca-de-protons-pem-para-veiculos-rodoviaros-automotores> (Acesso em 09 de julho de 2024).

Normas (2010b). *ABNT ISO/TR 15916*. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29409/abnt-iso-tr15916-consideracoes-basicas-para-a-seguranca-dos-sistemas-de-hidrogenio> (Acesso em 09 de julho de 2024).

Normas (2010c). *ABNT NBR ISO 16110-1*. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29129/nbriso16110-1-geradores-de-hidrogenio-que-utilizam-tecnologias-de-processamento-de-combustivel-parte-1-seguranca> (Acesso em 09 de julho de 2024).

Normas (2014). *ABNT NBR ISO 17268*. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/29160/nbriso17268-dispositivos-de-conexao-para-reabastecimento-de-veiculos-terrestres-com-hidrogenio-gasoso> (Acesso em 09 de julho de 2024).

Planalto (2009). *Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/12187.htm (Acesso em 23 de julho de 2024).

Planalto (2024). *L14948*. [online] Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14948.htm. (Acesso em 24 de agosto de 2024).

SEAMA (2023). *Programa GERAR Hidrogênio vai possibilitar novos investimentos para enfrentamento às mudanças climáticas*. [online] SEAMA. Disponível em: <https://seama.es.gov.br/Not%C3%ADcia/programa-gerar-hidrogenio-vai-possibilitar-novos-investimentos-para-enfrentamento-as-mudancas-climaticas> (Acesso em 23 de julho de 2024).

Senado Federal (2024a). *Legislação Federal - Senado Federal*. [online] Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/39738545> (Acesso em 22 de novembro de 2024).

Senado Federal (2024b). *Lei que incentiva 'combustíveis do futuro' é sancionada com vetos*. [online] Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/10/10/lei-que-incentiva-combustiveis-do-futuro-e-sancionada-com-vetos> (Acesso em 22 de novembro de 2024).

Sonia, Dell'Aversano., Carlo, Villante., Katia, Gallucci., Giuseppina, Vanga., Andrea, Di, Giuliano. (2024). *E-Fuels: A Comprehensive Review of the Most Promising Technological Alternatives towards an Energy Transition*. *Energies*, 17(16), 3995-3995. Available from: 10.3390/en17163995

U.S. Department of Energy (2021). *Energy EarthShots – Hydrogen*. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot> (Acesso em 12 de julho de 2024).

Viscardi, Rosanna et al. (2021). *The potential of E-fuels as future fuels*. ENEA Energ. Ambiente Innov, v. 1, p. 112-116.

WoodMackenzie. (2024). *Adding fire to e-fuels: Are synthetic fuels the key to unlocking growth in hydrogen?* Disponível em: https://www.woodmac.com/siteassets/horizons/2024/june-2024/horizons_june-2024-whitepaper_1706.pdf (Acesso 22 de novembro de 2024).