

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO - UFRJ
CENTRO DE CIÊNCIAS JURÍDICAS E ECONÔMICAS - CCJE
FACULDADE NACIONAL DE DIREITO - FND**

**DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

GABRIELLE MEDEIROS DA SILVA

**Rio de Janeiro
2024**

GABRIELLE MEDEIROS DA SILVA

**DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

Monografia de final de curso, elaborada no âmbito da graduação em Direito da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Direito, sob a orientação da **Professora Carolina Pizoeiro Gerolimich**.

**Rio de Janeiro
2024**

CIP - Catalogação na Publicação

S586d Silva, Gabrielle Medeiros da
Desafios para a implementação do sistema de
certificação de Hidrogênio Verde no Brasil /
Gabrielle Medeiros da Silva. -- Rio de Janeiro,
2024.
63 f.

Orientadora: Carolina Pizoeiro Gerolimich.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade
Nacional de Direito, Bacharel em Direito, 2024.

1. Certificação. 2. Hidrogênio de Baixo Carbono.
3. Hidrogênio Verde. 4. Transição Energética. I.
Pizoeiro Gerolimich, Carolina, orient. II. Título.

GABRIELLE MEDEIROS DA SILVA

**DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO DE
HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

Monografia de final de curso, elaborada no âmbito da graduação em Direito da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel em Direito, sob a orientação da **Professora Carolina Pizoeiro Gerolimich**.

Data da Aprovação: 09/12/2024

Banca Examinadora:

Carolina Pizoeiro Gerolimich
Orientadora

Alberto Lopes da Rosa
Membro da Banca

Rio de Janeiro
2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter estado ao meu lado em todos os momentos, iluminando meu caminho e fortalecendo minha fé nos dias mais difíceis.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pela força e pelo exemplo de vida que me guiam. Sua presença e suporte foram fundamentais para que eu seguisse em frente e não desistisse, mesmo nos momentos mais difíceis. Ao meu pai, que agora olha por mim do céu, minha eterna gratidão por continuar cuidando de mim de onde está. À minha família, que é a base do meu ser, minha fonte de equilíbrio e inspiração.

Aos meus professores, mestres que iluminaram minha trajetória acadêmica com seu conhecimento e dedicação. Em especial, agradeço à minha brilhante orientadora, a professora Carolina Pizoeiro, cuja orientação e apoio incondicional têm tornado possível a realização deste trabalho e a conclusão de minha graduação. Sua paciência e sabedoria foram inestimáveis ao longo desse processo.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas que encontrei ao longo dessa caminhada, pela companhia e pelo apoio nos momentos compartilhados. Cada um de vocês, de forma única, tornou esta jornada mais leve e prazerosa, tecendo comigo os laços que marcaram essa etapa da minha vida.

RESUMO

Esta monografia aborda os desafios para a implementação de um sistema eficiente de certificação de hidrogênio de baixo carbono (H2V) no Brasil, considerando sua relevância no contexto da transição energética global e do compromisso com a descarbonização. O estudo analisa o Marco Legal do Hidrogênio no Brasil, instituído pela Lei nº 14.948/2024, e as estruturas regulatórias associadas, com foco no Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio (SBCH2). Além disso, são identificadas lacunas e obstáculos regulatórios que dificultam a consolidação do país como líder na produção e exportação de hidrogênio sustentável. A pesquisa incluiu uma análise comparativa com sistemas de certificação internacionais, explorando as exigências de sustentabilidade de mercados potenciais, como a União Europeia. Conclui-se que o sucesso da certificação depende de uma governança robusta, da harmonização com padrões internacionais e da criação de incentivos econômicos que fomentem a adesão ao sistema. A implementação de políticas claras e de uma base de dados nacional interoperável são apontadas como medidas essenciais para garantir a rastreabilidade e a competitividade do hidrogênio brasileiro no mercado global.

Palavras-chave: Certificação; Hidrogênio de Baixo Carbono; Hidrogênio Verde; Transição Energética.

ABSTRACT

This monograph addresses the challenges in implementing an efficient certification system for low-carbon hydrogen (H2V) in Brazil, considering its relevance within the global energy transition context and the commitment to decarbonization. The study analyzes Brazil's Hydrogen Legal Framework, established by Law No. 14,948/2024, and its associated regulatory structures, with a focus on the Brazilian Hydrogen Certification System (SBCH2). Furthermore, it identifies regulatory gaps and obstacles that hinder the country's consolidation as a leader in the production and export of sustainable hydrogen. The research includes a comparative analysis of international certification systems, exploring the sustainability requirements of potential markets such as the European Union. It concludes that the success of certification depends on robust governance, alignment with international standards, and the creation of economic incentives to encourage system adoption. The implementation of clear policies and an interoperable national database are identified as essential measures to ensure traceability and the competitiveness of Brazilian hydrogen in the global market.

Keywords: Certification; Low-Carbon Hydrogen; Sustainability; Regulation; Energy Transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da cadeia de H2V.....	30
Figura 2 – Taxonomia internacional do Hidrogênio de Baixo Carbono	33
Figura 3 – Governança do sistema brasileiro de certificação de hidrogênio.....	41
Figura 4 – Macrofluxo da jornada da certificação e aplicações da base de dados nacional conforme lei.....	42
Figura 5 – Estrutura geral de contabilização de emissões, conforme o Certiphy	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Projetos com portarias emitidas reconhecendo a viabilidade de conexão à rede ..	45
Quadro 2 – Versão inicial de certificação e próximos passos estipulados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) – 2023	53
Quadro 3 – Versão inicial de certificação do Bureau Veritas – 2023	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização do Tema.....	10
1.2 Justificativa	10
1.3 Objetivos e Metodologia.....	11
2. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA	11
2.1. Transição energética no cenário global.....	11
2.1.1. Acordo de Paris	12
2.1.2. Desafios	13
2.1.3. REPowerEU e Estratégia Nacional do Hidrogênio na Alemanha	15
2.2. Transição energética no Brasil.....	17
2.2.1. A matriz energética brasileira.....	19
2.2.2. Principais fontes de energia renováveis.....	20
3. O HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO.....	25
3.1. Conceitos iniciais.....	26
3.1.1. Classificação da Comissão Europeia.....	26
3.1.2. Classificação por cores.....	28
3.1.3. A utilização na indústria.....	28
3.2. Histórico da regulação do hidrogênio no Brasil	30
3.3. Marco legal do hidrogênio no Brasil	32
3.3.1. Classificação	32
3.3.2. Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono	35
3.3.3. Programa Nacional do Hidrogênio	35
3.3.4. PHBC e a Lei nº 14.990/2024	36
3.3.5. Rehidro	39
3.4. Projetos de hidrogênio em desenvolvimento	44
4. A CERTIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LIMPOS	47
4.1 Metodologias de estudo de pegadas de carbono	48
4.2. O sistema de certificação no Brasil.....	53
5. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema

O avanço das mudanças climáticas e o compromisso global com a descarbonização têm levado governos e organizações a priorizarem a transição energética. O Acordo de Paris, firmado em 2015, é um marco nesse esforço, estabelecendo metas para limitar o aquecimento global a menos de 2°C em comparação aos níveis pré-industriais. Nesse contexto, o hidrogênio, especialmente o de baixo carbono (H2V), destaca-se como uma alternativa promissora para substituir combustíveis fósseis, especialmente em setores de difícil eletrificação, como o transporte marítimo, a aviação e a siderurgia.

O Brasil, devido à sua matriz energética predominantemente renovável, encontra-se em uma posição privilegiada para liderar a produção e exportação de H2V. Além de suas vantagens naturais, o país promulgou em 2024 a Lei nº 14.948, que estabeleceu o Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono, definindo diretrizes para produção, armazenamento e comercialização. Apesar disso, desafios regulatórios e operacionais, como a certificação de hidrogênio, ainda precisam ser superados para que o Brasil possa se destacar no mercado global e atender às exigências de sustentabilidade de potenciais importadores, como a União Europeia.

A implementação de um sistema eficiente de certificação de H2V no Brasil é central para assegurar a rastreabilidade, a sustentabilidade e a competitividade internacional. Esse sistema não só garante a conformidade ambiental, mas também responde à crescente demanda global por práticas sustentáveis e incentiva investimentos no setor.

1.2 Justificativa

A certificação do hidrogênio é essencial para consolidar o Brasil como protagonista no mercado internacional de energias renováveis e atender aos requisitos de sustentabilidade globais. Dada a crescente importância do hidrogênio no contexto da transição energética, torna-se imperativo que o país estabeleça um sistema robusto e harmonizado com padrões internacionais. Isso é particularmente relevante considerando o grande potencial brasileiro para produzir H2V a partir de sua matriz elétrica renovável.

Além disso, o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio no Brasil pode gerar benefícios econômicos e sociais significativos, como a criação de empregos, o estímulo à inovação tecnológica e o fortalecimento de setores estratégicos. No entanto, obstáculos como a ausência de regulamentação específica, custos elevados e a falta de infraestrutura adequada representam desafios que precisam ser enfrentados. Analisar esses aspectos e propor soluções é essencial para que o Brasil aproveite ao máximo seu potencial nesse mercado em expansão.

1.3 Objetivos e Metodologia

O objetivo geral desta monografia é analisar os desafios para a implementação de um sistema eficiente de certificação de H2V no Brasil, considerando os padrões globais e as particularidades do mercado nacional. Especificamente, busca-se contextualizar a importância do hidrogênio de baixo carbono no cenário da transição energética, avaliar os principais marcos regulatórios e iniciativas no Brasil relacionados ao H2V, identificar os desafios e lacunas no processo de certificação de hidrogênio no país e propor recomendações para a implementação de um sistema robusto e alinhado às exigências internacionais.

A pesquisa adota uma abordagem qualitativa, exploratória e documental. Para tanto, foi realizada uma revisão de literatura sobre o hidrogênio de baixo carbono e sua certificação, bem como uma análise comparativa entre os sistemas de certificação internacionais e as regulamentações brasileiras. A pesquisa baseou-se em fontes como legislações nacionais, relatórios de organizações internacionais e estudos acadêmicos. Adicionalmente, dados sobre o mercado de H2V no Brasil foram coletados a partir de documentos oficiais e estudos técnicos. Essa análise permitiu identificar as barreiras à implementação de um sistema de certificação eficiente e propor estratégias regulatórias e operacionais que possam fortalecer o papel do Brasil como líder na produção sustentável de hidrogênio.

2. A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

2.1. Transição energética no cenário global

A transição energética caracteriza-se como uma resposta urgente às crises climáticas e à insustentabilidade do uso prolongado de combustíveis fósseis em um mundo em constante evolução tecnológica e que demanda cada vez mais energia. Segundo estudos publicados pela

Agência Internacional de Energia (AIE) em 2019¹, estima-se que a demanda mundial de energia terá um aumento de 25 a 35% até 2040, o que significaria um agravamento do aquecimento global causado pelo efeito estufa, caso o mundo permanecesse no atual cenário de dependência de carvão, petróleo e gás natural para geração de energia.

O efeito estufa é um processo natural pelo qual certos gases na atmosfera da Terra retêm parte da radiação solar refletida pela superfície terrestre, impedindo que ela escape totalmente para o espaço, sendo esse um fenômeno essencial para a manutenção de temperaturas adequadas para a vida no planeta, uma vez que atua como um “isolante térmico” sem o qual a temperatura média da Terra seria muito baixa, tornando-a inabitável. Os principais Gases de Efeito Estufa (GEE) são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃) e os clorofluorocarbonos (CFCs).²

Dentre esses gases, embora o CH₄ represente um potencial de aquecimento cerca de 21 vezes maior, é o CO₂ que mais contribui para o efeito estufa em termos de volume, pois é o mais abundante na atmosfera devido à sua emissão especialmente na queima de combustíveis fósseis (como carvão, petróleo e gás natural)³. Desde a Revolução Industrial, a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou cerca de 35%, e hoje ele é responsável por aproximadamente 55% das emissões globais de GEE.⁴

2.1.1. Acordo de Paris

Diante do agravamento do aquecimento global e a pressão por uma economia de baixo carbono, diversos países se comprometeram em reestruturar suas matrizes energéticas para reduzir as emissões de GEE, com foco especial no CO₂. Esse esforço global foi formalizado em 2015, durante a 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês para *United Nations Framework Convention on Climate Change*), com a adoção do Acordo de Paris, um acordo cujos objetivos

¹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 25 nov. 2024.

² NOVAIS, Stéfano Araújo. **Gases do efeito estufa**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/gases-efeito-estufa.htm>. Acesso em 25 de novembro de 2024.

³ SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Gases de Efeito Estufa – GEE**. 23 jul. 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/gases-de-efeito-estufa-gee/#:~:text=Os%20principais%20Gases%20de%20efeito,para%20o%20efeito%20estufa%3A%20os>. Acesso em: 25 nov. 2024.

⁴ Idem.

centrais são o fortalecimento de uma resposta mundial à ameaça climática e o aprimoramento da capacidade dos países em lidar com os impactos dessas mudanças. O acordo foi aprovado por 196 países (incluindo o Brasil) que, com o propósito de reduzir as metas de emissões de GEE, comprometeram-se a manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços adicionais para limitá-lo a 1,5°C até o fim do século. Essa meta foi estabelecida com base em estudos que indicam que um aumento de temperatura acima desse limite poderia trazer impactos irreversíveis para os ecossistemas e a sociedade.⁵

À época, para que o Acordo entrasse em vigor, era necessário que ao menos 55 países, responsáveis por 55% das emissões globais de GEE, ratificassem o documento. Esse processo formal de assinatura foi iniciado em uma cerimônia em Nova York, conduzida pelo secretário-geral da ONU em 22 de abril de 2016, e encerrado em 21 de abril de 2017, contando com a adesão necessária. O Acordo previa que cada país deveria construir suas metas de redução de emissões a partir das chamadas Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDCs, sigla em inglês para *Intended Nationally Determined Contributions*), que refletiam os compromissos individuais de cada nação, considerando as suas condições sociais e econômicas locais, no contexto de um desenvolvimento sustentável e equitativo. Com a ratificação das iNDCs em cada país, as metas deixaram de ser apenas “pretendidas” e passam a ser compromissos oficiais, chamadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, sigla em inglês, *Intended Nationally Determined Contributions*).⁶

O Acordo de Paris também estabelece diretrizes para o financiamento climático, determinando que países desenvolvidos devem mobilizar 100 bilhões de dólares por ano para apoiar projetos de mitigação e adaptação nos países em desenvolvimento. Além disso, o Acordo introduz o conceito de “cooperação Sul-Sul”, permitindo que países em desenvolvimento também contribuam financeiramente com ações climáticas em outras nações em desenvolvimento, ampliando a base de suporte financeiro global.⁷

2.1.2. Desafios

⁵ MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 10 nov. 2024.

⁶ Idem.

⁷ Idem.

Segundo dados apresentados por Meinshausen⁸, para a manutenção da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, seria necessário que mais da metade das reservas economicamente viáveis de petróleo, gás e carvão permanecesse intocada no subsolo.

Adicionalmente, estudos recentes indicam que aproximadamente 33% das reservas de petróleo, 50% das de gás natural e 80% das de carvão não deveriam ser acessadas entre 2010 e 2050 para que fosse possível alcançar a meta climática de 2°C.⁹

Portanto, sendo ainda mais ousado, o objetivo de reduzir o aumento da temperatura para 1,5°C acima dos níveis pré-industriais estabelecido no Acordo de Paris, implicaria restrições adicionais ao “orçamento planetário” para emissões de carbono, sugerindo a necessidade de limitar substancialmente a exploração de combustíveis fósseis.¹⁰

Deste modo, mesmo que o cenário atual seja de uma matriz energética mundial altamente poluente em razão da dependência de carvão, petróleo e gás natural para suprimento da demanda energética – que por sua vez cresce em um ritmo contínuo, a perspectiva é que, caso consigamos atingir a descarbonização do planeta, tenhamos um mundo muito diferente até 2050: um mundo mais acessível, eficiente e sustentável, impulsionado por energias limpas e renováveis, como, por exemplo, o hidrogênio de baixo carbono.¹¹

Não há como desconsiderar que os esforços dispensados com o fim de reduzir as crescentes emissões de CO₂ ocorrem em concomitância com o emprego de medidas para superação de desafios socioeconômicos globais, que incluem pobreza, desigualdade, e o acesso limitado à energia, que afetam milhões de pessoas, principalmente em regiões da África, Ásia, América Latina e Caribe, áreas que, ao mesmo tempo que possuem recursos naturais e energéticos em abundância, enfrentam uma vulnerabilidade ainda maior às mudanças climáticas.

⁸ MEINSHAUSEN, M. et al. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, v. 458, n. 7242, p. 1158–1162, 2009.

⁹ MCGLADE, C.; EKINS, P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature*, v. 517, n. 7533, 2015.

¹⁰ GONZÁLEZ, Carlos Germán Meza. Transição energética global e desenvolvimento sustentável: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-03102018-100309/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

¹¹ DA SILVEIRA, Caroline Soares; DE OLIVEIRA, Letícia. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. Novos Cadernos NAEA, [S.I.], v. 24, n. 3, dez. 2021. ISSN 2179-7536. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/9354>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Deste modo, vale ressaltar o quanto essa mudança é complexa e requer não apenas intenções, mas também a ação conjunta de todos os países rumo a um objetivo comum, uma vez que a transição para uma matriz energética mundial menos dependente de combustíveis fósseis é fundamental para reduzir as emissões de CO₂ e controlar o aquecimento global.

2.1.3. REPowerEU e Estratégia Nacional do Hidrogênio na Alemanha

Além do Acordo de Paris, existem outras iniciativas menores que visam implementar a transição energética. A seguir veremos uma síntese do plano REPowerEU, da União Europeia e da Estratégia Nacional do Hidrogênio, da Alemanha.

O REPowerEU foi criado pela União Europeia em resposta à invasão da Ucrânia pela Rússia e aos impactos gerados no fornecimento de gás para diversos países, especialmente na Europa, onde o gás russo representa aproximadamente 40% do total importado pelo continente, com a maior parte sendo transportada por gasodutos, dos quais cerca de 25% atravessam a Ucrânia.¹²

Criado em contexto de uma crise política e humanitária, o plano REPowerEU, apresentado pela Comissão Europeia em 18 de maio de 2022, visa, entre outros objetivos, diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, diversificar fontes e rotas de abastecimento, fomentar o mercado europeu de hidrogênio, acelerar a implantação de energias renováveis e melhorar a eficiência energética e a segurança do aprovisionamento energético.¹³

Baseado na execução integral do pacote "Objetivo 55" – que estabelece a meta de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa em pelo menos 55% até 2030 e alcançar a neutralidade climática até 2050, em alinhamento com o Pacto Ecológico Europeu – o REPowerEU busca também fortalecer a autonomia energética da UE e apoiar a transição para

¹² Mapa dos principais gasodutos da Rússia para Europa. IBP. Disponível em: <https://www.ipb.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/mapa-dos-principais-gasodutos-da-russia-para-europa/#:~:text=A%20R%C3%BAssia%20%C3%A9%20a%20maior,para%20Europa%20passam%20pela%20Ucr%C3%A2nia>. Acesso em: 25 nov. 2024.

¹³ Comissão Europeia. **REPowerEU: política energética nos planos de recuperação e resiliência dos países da EU**. Conselho da Europa: 11 jan. 2024. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/eu-recovery-plan/repowereu/#:~:text=A%20Comiss%C3%A3o%20apresentou%20o%20plano,um%20sistema%20energ%C3%A9tico%20mais%20resiliente>. Acesso em: 25 nov. 2024.

energias limpas. Os principais focos do plano são a poupança de energia, a produção de energias renováveis e a diversificação das fontes energéticas da União Europeia.¹⁴

Para financiar o REPowerEU, os Estados-Membros da UE estão adicionando capítulos específicos de investimentos e reformas voltados para esses objetivos em seus Planos de Recuperação e Resiliência nacionais (PRR), sob o programa NextGenerationEU. As medidas incluem, entre outras, a melhoria das infraestruturas energéticas, a ampliação da produção e uso de biometano e hidrogênio renovável, o aumento da eficiência energética dos edifícios, o combate à pobreza energética e o apoio ao transporte de baixas emissões. O financiamento é realizado principalmente por meio do Mecanismo de Recuperação e Resiliência (MRR), que destina um montante total de até 225 bilhões de euros em empréstimos e até 20 bilhões de euros em subvenções provenientes do Fundo de Inovação e da venda de licenças de emissão do Sistema de Comércio de Licenças de Emissão (CELE).¹⁵

Por sua vez, a Estratégia Nacional do Hidrogênio da Alemanha, lançada inicialmente em 2020 e atualizada em 2023, foi estruturada com objetivo de desenvolver condições regulatórias para a expansão do mercado de hidrogênio no país, concentrando-se não apenas nas implicações climáticas no uso do H2 como combustível, mas também em sua importância para a segurança energética nacional, de modo a assegurar o suprimento de hidrogênio combustível ao mercado interno.¹⁶

No projeto, o hidrogênio é visto como um pilar essencial para a descarbonização de setores estratégicos, como indústria, transporte e geração de energia, com vistas à neutralidade climática até 2045. Diante das pressões globais por segurança energética, intensificadas pela crise geopolítica com a guerra na Ucrânia, a Alemanha aumentou sua meta para a produção de Hidrogênio Verde (H2V), planejando uma capacidade de eletrólise de 10 GW até 2030, além de fomentar uma infraestrutura completa para o hidrogênio, incluindo sistemas

¹⁴ Idem.

¹⁵ Idem.

¹⁶ VIDAL, Bruno. GALVÃO, Ana Carolina. **A atualização da Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde da Alemanha**. JOTA. Disponível em: <<https://www.jota.info/opiniao-e-analise/colunas/regula-euro/a-atualizacao-da-estrategia-nacional-do-hidrogenio-verde-da-alemanha>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

dedicados para o transporte, como o projeto europeu de gasodutos European Hydrogen Backbone.¹⁷

Isto pois, a Alemanha anunciou que o H2V é uma das fontes de energia renovável mais promissoras para que o país possa abandonar os combustíveis fósseis e obter 80% de energia limpa até 2030, conforme a Lei Alemã de Fontes Renováveis de Energia (EEG). Para tanto, será necessário que os alemães importem dois terços do H2V que deverão demandar, o que vem ensejando o patrocínio de projetos e pesquisas no exterior.¹⁸

Deste modo, o Brasil tem participado de diversas iniciativas de cooperação técnica com a Alemanha para o desenvolvimento deste mercado, sendo que as duas principais iniciativas consistiram no Programa H2 Brasil (*German-Brazilian Power-to-X Partnership Program*) e nas Forças-Tarefa de produção, logística e aplicação do H2V. Enquanto o primeiro destinou 34 milhões de euros entre 2021 e 2024¹⁹ para fomentar o desenvolvimento de uma economia verde de hidrogênio no Brasil, o segundo reuniu empresas e instituições com experiência em projetos relacionados a H2V para promover estudos e diálogo político entre Brasil e Alemanha.

Além das plantas da UFSC, da UFRJ e da Unifei, projetos na Universidade Federal de Goiás (UFG) e no parque tecnológico Itaipu também receberam financiamento do governo alemão, grande parte por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Giz), uma agência de cooperação técnica.²⁰

2.2. Transição energética no Brasil

No caso do Brasil, a NDC inicialmente acordada comprometia o país a reduzir suas emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, com uma meta subsequente de

¹⁷ VIDAL, Bruno Galvão Ana Carolina. **A atualização da Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde da Alemanha.** JOTA Jornalismo. Disponível em: <<https://www.jota.info/opiniao-e-analise/colunas/regula-euro/a-atualizacao-da-estrategia-nacional-do-hidrogenio-verde-da-alemanha>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

¹⁸ DYNIEWICZ, L. **Alemanha financia usinas de Hidrogênio Verde no Brasil.** Disponível em [¹⁹ WELLE, Deutsche. **Hidrogênio verde promete “turbinar” parceria entre Brasil e Alemanha.** Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/hidrogenio-verde-promete-turbinar-parceria-brasil-alemanha-060223>>.](https://www.abrema.org.br/2024/03/12/alemanha-financia-usinas-de-hidrogenio-verde-no-brasil/#:~:text=Para%20cumprir%20a%20meta%2C%20a,viabilizar%20o%20mercado%20de%20hidrog%C3%A3o,AAnio. Acesso em: 25 nov. 2024.</p>
</div>
<div data-bbox=)

²⁰ Idem.

43% de redução até 2030. Entre as medidas adotadas para atingir essas metas, o Brasil se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável para cerca de 18% de sua matriz energética até 2030, a restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas e a alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis em sua matriz energética. Esses objetivos correspondem a uma redução de 66% na intensidade de emissões (emissões por unidade do PIB) até 2025 e 75% até 2030, ambas em relação a 2005. Esses compromissos refletem uma expectativa ambiciosa, uma vez que o Brasil visa reduzir suas emissões no contexto de um cenário de aumento populacional, crescimento do PIB e melhoria da renda per capita.²¹

Em 2023, a NDC foi reajustada pela terceira vez, para aumentar as suas metas de redução de emissões líquidas de GEE para 48,4% até 2025 e para 53,1% em relação à 2030, ambos em comparação com 2005. Naquela oportunidade, o Governo do Brasil reiterou ainda seu objetivo de longo prazo de alcançar a neutralidade climática até 2050.²²

Nos termos da NDC de 27 de outubro de 2023:

Como país em desenvolvimento, a contribuição histórica do Brasil para o problema global das mudanças climáticas tem sido pequena se comparada à responsabilidade histórica dos países desenvolvidos pelo aumento da temperatura média global da superfície resultante das emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

[...]

A NDC brasileira é uma das mais ambiciosas do mundo. Além de suas metas, o Brasil é um dos poucos países que adotou um compromisso para 2025 bem como para 2030, que proporcionará para um melhor acompanhamento dos esforços de mitigação ao longo da década.

Deste modo, entende-se que o Brasil está firmemente se posicionando para alcançar o *net zero* nos próximos anos. Contudo, para que essa meta se torne realidade, será fundamental, além da publicação de marcos legais para as energias renováveis, como o Marco Legal do Hidrogênio

²¹ **BRASIL.** Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Versão 1.1., Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/08/NDC-1.1-Brasil-21-set-2016-portugues.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

²² **BRASIL.** Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) para o Acordo de Paris no âmbito da UNFCCC – Versão 1.4. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/NDC-1.4-Brasil-27-out-2023-portugues.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

e a Lei do Combustível do Futuro, que essas legislações sejam aplicadas de forma efetiva. Isso exigirá um trabalho intenso da administração pública, com políticas consistentes, fiscalização rigorosa e um esforço coordenado para superar desafios operacionais e regulatórios, garantindo que o país avance de forma sólida e comprometida rumo à neutralidade climática.

2.2.1. A matriz energética brasileira

A matriz energética brasileira é amplamente reconhecida por sua predominância de fontes renováveis, posicionando-se como uma das mais limpas do mundo. Enquanto a média global de energias renováveis na matriz é inferior a 15%, o Brasil conta com uma participação consideravelmente mais alta de fontes limpas, o que reforça o potencial do país para liderar a transição energética em escala global (EPE, 2024).²³

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2024 elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com Ministério de Minas e Energia (MME), aproximadamente 49% da matriz energética brasileira é composta por fontes renováveis, com destaque para a biomassa, energia hidrelétrica, eólica e solar. No setor elétrico, essa proporção é ainda mais expressiva: em números de 2021, cerca de 83% da eletricidade gerada no país provém de fontes renováveis. A principal fonte é a energia hidrelétrica, que representa cerca de 59% da eletricidade gerada, seguida pela energia eólica, com aproximadamente 13%, e pela solar, com cerca de 7%.²⁴

As fontes renováveis representam 89% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável.²⁵

A biomassa também contribui significativamente, correspondendo a cerca de 15,8% da geração de eletricidade no Brasil. O etanol, derivado da cana-de-açúcar, é outro exemplo da

²³ **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil).** Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 18 jun. 2024, 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

²⁴ **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil).** Matriz Energética e Elétrica, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

²⁵ **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil).** Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 18 jun. 2024, 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

integração de fontes renováveis à matriz energética, substituindo em grande parte a gasolina no setor de transportes e contribuindo para a redução de emissões de carbono.²⁶

Esses dados evidenciam que o Brasil não apenas supera a média global na adoção de fontes renováveis, mas também demonstra como a combinação de recursos naturais e políticas de incentivo pode posicionar o país como referência em sustentabilidade energética. A liderança brasileira na adoção de uma matriz predominantemente limpa fortalece seu papel em acordos internacionais de descarbonização e destaca o potencial do país para ampliar a geração e exportação de energias renováveis, incluindo o H2V, para atender à crescente demanda global por fontes de energia sustentáveis.²⁷

Já consolidado como um dos maiores produtores de energia renovável no mundo, o país possui condições ideais para despontar como um dos principais produtores e exportadores de H2V, graças à sua vasta oferta de recursos naturais e ao favorecimento de um clima ideal para energias renováveis. Com uma matriz predominantemente limpa e diversificada, o Brasil se encontra estrategicamente posicionado para desempenhar um papel de liderança na transição energética global, por conta das condições climáticas favoráveis e, portanto, de sua grande e plural oferta de fontes de energias renováveis.

2.2.2. Principais fontes de energia renováveis

As fontes de energia renováveis mais promissoras no Brasil atualmente incluem o Hidrogênio de Baixo Carbono, a Energia Solar, a Eólica *Offshore*, a Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) e os Biocombustíveis. Cada uma dessas alternativas contribui de forma única para a diversificação e a sustentabilidade da matriz energética nacional, aproveitando o grande potencial natural do país e possibilitando avanços rumo à descarbonização e à independência energética. A seguir, será apresentada uma breve explicação de cada uma dessas fontes.

Em primeiro lugar, a **energia solar** tem se consolidado no Brasil visto que o país apresenta um potencial único para a geração de eletricidade a partir da energia solar, tanto em larga escala quanto em sistemas de geração distribuída. O nível médio de irradiação solar no

²⁶ Idem.

²⁷ Idem.

Brasil é de cerca de 5,4 kWh/m²/dia, comparável aos maiores índices mundiais, o que proporciona uma eficiência elevada para os sistemas fotovoltaicos instalados em diferentes regiões do território nacional.

Nos últimos anos, o Brasil vem registrando uma rápida expansão de sua capacidade instalada de energia solar. Em 2023, a capacidade instalada de geração fotovoltaica alcançou 28.664MW, um salto significativo que coloca o país entre os líderes globais no desenvolvimento de energia solar. O crescimento reflete o investimento contínuo do setor privado, incentivado por políticas públicas, como a Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, que permite a micro e minigeração distribuída e concede descontos para consumidores que produzem e injetam energia solar na rede elétrica pública. Essa resolução foi fundamental para viabilizar a expansão da geração distribuída, incentivando residências e empresas a adotarem sistemas fotovoltaicos, o que também contribui para a descentralização do modelo de geração energética no país.²⁸

A importância da energia solar na matriz energética brasileira também é evidenciada pelo aumento de sua participação no total de eletricidade gerada. Em 2023, a geração solar fotovoltaica produziu cerca de 50,6 TWh, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis do país e contribuindo para que o Brasil mantenha uma matriz predominantemente limpa. Esse crescimento é estratégico para reduzir a dependência de fontes fósseis e avançar em direção às metas de descarbonização, com vistas a cumprir os compromissos internacionais firmados pelo Brasil para a mitigação das mudanças climáticas.

Entretanto, para que o Brasil alcance o pleno potencial de sua capacidade solar, alguns desafios tecnológicos ainda precisam ser superados. O país, embora possua grande produção de silício, ainda depende de tecnologias importadas para a fabricação de módulos e células fotovoltaicas, o que representa um entrave para a competitividade do setor. Avanços em pesquisa e desenvolvimento são necessários para que o Brasil possa não apenas produzir painéis solares em maior escala, mas também aprimorar a eficiência e a durabilidade desses equipamentos. A criação de centros de pesquisa dedicados à inovação tecnológica em energia

²⁸ SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 25 nov. 2024.

solar e o fortalecimento de parcerias internacionais podem ajudar a superar essas limitações e consolidar a capacidade industrial brasileira no setor fotovoltaico.²⁹

Por sua vez, a energia **eólica offshore** é uma tecnologia emergente no Brasil, mas já amplamente utilizada em diversas partes do mundo, como na Europa e Ásia, para a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Trata-se da instalação de turbinas eólicas no mar, onde os ventos são mais intensos e constantes, permitindo maior eficiência energética em comparação aos parques eólicos terrestres. Além disso, a eólica *offshore* é capaz de produzir uma grande quantidade de energia com menor impacto visual e territorial, visto que as turbinas são instaladas longe das áreas urbanas.

O Brasil, com sua extensa costa e excelentes condições de vento em alto-mar, apresenta um potencial de geração de até 700 GW em energia eólica *offshore*, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) curso poderia não apenas diversificar a matriz energética do país, mas também contribuir significativamente para a descarbonização de setores intensivos em energia, como o de petróleo e gás. Atualmente, os parques eólicos *offshore* estão localizados em águas não muito profundas (até 60 metros de calado) e afastados da costa, das rotas de tráfego marinho, das instalações estratégicas navais e dos espaços de interesse ecológico.

O Brasil ainda está em um processo de consolidação da legislação das eólicas *offshore*. Embora não exista uma regulamentação específica para o setor, o governo brasileiro já iniciou os debates e ações voltadas para a criação de um ambiente normativo que permita a atração de investimentos. A Portaria Interministerial MME/MMA nº 03/2022 e o Decreto nº 10.946/2022 foram importantes para a determinação de regras para cessão de uso de espaços para geração de energia elétrica *offshore*. Adicionalmente, há o Projeto de Lei nº 576/2021, que tramita no Congresso Nacional, e disciplina o aproveitamento de potencial energético *offshore*.

Outra fonte promissora é a tecnologia de **Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS)** envolve a captura de dióxido de carbono (CO₂) emitido por fontes industriais e de energia, o uso desse CO₂ em processos produtivos ou sua armazenagem segura em formações geológicas, evitando que seja liberado na atmosfera. O uso combinado de CCUS

²⁹ MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Revista Virtual de Química, 14 out. 2014, v. 7, n. 1, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150008. Disponível em: <https://rvq-sub.sbj.org.br/index.php/rvq/article/view/664>. Acesso em: 25 nov. 2024.

com hidrogênio azul, por exemplo, pode impulsionar a descarbonização das indústrias pesadas e do setor energético. A captura de CO₂ já é parte integrante de vários processos industriais e, portanto, tecnologias para separar ou capturar CO₂ já estão comercialmente disponíveis há muitas décadas.

O CO₂ capturado pode ser usado na própria operação local da indústria, ou transportado para uma variedade de aplicações, ou, ainda, encaminhado para um armazenamento permanente. A opção de armazenamento de CO₂ envolve a injeção de CO₂ capturado em um reservatório geológico subterrâneo profundo de rocha porosa, recoberto por uma camada impermeável de rochas, que sela o reservatório e evita o vazamento do gás para a atmosfera.

Em 08 de outubro de 2024, foi publicada a Lei nº 14.993/2024 (Lei do Combustível do Futuro)³⁰, que dispõe, dentre outros, sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono, oferecendo uma base legal para o setor.

Atualmente, o programa de CCUS desenvolvido pela Petrobras nos campos do pré-sal é o maior do mundo em volume, alcançando, em 2022, a marca de 10,6 milhões de toneladas reinjetadas — isso equivale a 5,8 bilhões de m³ de CO₂, o que é cerca de 25% de todo o volume reinjetado pela indústria global (Global CCS Institute, 2022).³¹

Entretanto, a implementação do CCUS enfrenta diversos desafios, como a rigidez locacional, que pode demandar adaptações na infraestrutura para conectar os pontos de captura, transporte e armazenamento; os riscos associados à implementação, particularmente relacionados ao tipo de reservatório utilizado; a necessidade de capacitação técnica para o licenciamento ambiental de projetos voltados à captura e ao armazenamento de carbono; a inexistência de um mercado regulado de carbono; e o elevado CAPEX.³²

³⁰ BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 08 out. 2024.

³¹ PETROBRAS. Programa de captura de carbono (CCUS) da Petrobras é o maior do mundo em volume. 11 nov. 2024. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/ccus>. Acesso em: 25 nov. 2024.

³² EY. Armazenamento de Carbono: oportunidades de mercado. Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/insights/climate-change-sustainability-services/armazenamento-de-carbono-oportunidades-de-mercado#:~:text=Os%20desafios%20para%20a%20implementa%C3%A7%C3%A3o,para%20o%20licenciamento%20ambiental%20de. Acesso em: 25 nov. 2024.

Além disso, a transição para uma matriz energética sustentável tem colocado os **biocombustíveis** no centro das discussões sobre descarbonização e segurança energética global. Os biocombustíveis são uma classe de combustíveis renováveis produzidos a partir de biomassa, que pode incluir resíduos agrícolas, óleos vegetais e gases provenientes de processos biológicos. No Brasil, os biocombustíveis têm um papel estratégico por sua vasta base agrícola.

Entre os principais biocombustíveis regulados pela Lei do Combustível do Futuro, destacam-se o etanol, o biodiesel, o diesel verde e o biometano. A nova legislação instituiu programas como o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural, com o objetivo de promover alternativas de baixo carbono em substituição aos combustíveis fósseis. Cada biocombustível possui características distintas, mas compartilham o propósito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumentar a sustentabilidade da matriz energética brasileira.

O etanol, produzido principalmente a partir da cana-de-açúcar e do milho, é um dos biocombustíveis mais consolidados no Brasil. A Lei do Combustível do Futuro estabeleceu novos percentuais de mistura com a gasolina, variando de 22% a 35%, ampliando sua utilização. Já o biodiesel, derivado de óleos vegetais e gorduras animais, tem sua mistura ao diesel fóssil planejada para crescer gradualmente até atingir 20% em 2030. Adicionalmente, a legislação permite a adição voluntária acima do percentual obrigatório para setores específicos, promovendo maior adesão ao biodiesel.

O diesel verde e o biometano representam inovações promissoras. O diesel verde, obtido por hidrogenação de óleos vegetais, é compatível com motores convencionais e conta com incentivos para sua produção e uso, com metas mínimas de mistura estabelecidas anualmente. O biometano, por sua vez, é produzido a partir do biogás e possui grande potencial em regiões agropecuárias. Com metas de adição progressiva à matriz energética, o biometano ainda contribui para a criação de Certificados de Garantia de Origem. Esses avanços mostram o compromisso do Brasil com uma transição energética sustentável e eficiente.

Os *Sustainable Aviation Fuels* (SAFs) são combustíveis de aviação sustentáveis, que podem ser usados em aeronaves como substitutos diretos do querosene fóssil, sem a necessidade de alterações nos motores ou sistemas de abastecimento das aeronaves. Isso se deve ao fato de

serem produtos drop-in, ou seja, quimicamente idênticos ao querosene tradicional, mas provenientes de fontes renováveis, como biomassa, resíduos ou até hidrogênio combinado com CO₂. O uso de SAFs pode reduzir as emissões de carbono em até 80% em comparação aos combustíveis fósseis.

A International Air Transport Association (IATA) destaca a importância do fato de serem combustíveis drop-in, pois isso evita a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura de abastecimento ou redesenho de aeronaves, algo que seria necessário em alternativas como hidrogênio ou eletrificação. Atualmente, a rota de produção mais utilizada é a de Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (HEFA), que utiliza óleos e gorduras como matérias-primas. Outras rotas, como o Fischer-Tropsch (FT-SPK), que usa resíduos sólidos, e o Alcohol-to-Jet (ATJ), que converte etanol em combustível de aviação, estão em desenvolvimento e devem ganhar mercado nos próximos anos.

O transporte aéreo é responsável por cerca de 2% das emissões globais de gases de efeito estufa, e a substituição do querosene fóssil por SAF é uma das principais estratégias identificadas para a descarbonização do setor. A IATA estima que, para alcançar emissões líquidas zero até 2050, 65% das reduções devem vir do uso de SAF. No entanto, o grande desafio está no custo: o SAF é, atualmente, de duas a quatro vezes mais caro que o querosene fóssil, representando uma barreira significativa à sua adoção em larga escala. Além disso, serão necessários US\$ 5 trilhões em investimentos globais até 2050 para que a aviação atinja suas metas de descarbonização.

3. O HIDROGÊNIO DE BAIXO CARBONO

Diante das pesquisas realizadas, foram encontrados vários motivos por que o hidrogênio deve ser a principal fonte de energia do futuro no planeta Terra: o hidrogênio é o mais abundante e mais leve dos elementos, além de ser inodoro e não tóxico, tornando-o mais fácil de armazenar. Em se tratando do H2V, é possível ainda afirmar que não emite gases poluentes nem durante a combustão nem durante o processo de produção.

Além disso, tem o maior teor energético de combustíveis comuns em peso - quase três vezes o da gasolina,³³ representando uma alternativa de combustível para setores difíceis de eletrificar, como a indústria pesada, o frete de longo curso, o transporte marítimo e a aviação. Tanto os governos quanto a indústria reconheçam o hidrogênio como um importante pilar de uma economia líquida zero.³⁴ Abaixo, uma exposição acerca do combustível em estudo.

3.1. Conceitos iniciais

O Hidrogênio (H_2), elemento número 1 na tabela periódica, é o mais abundante do universo, representando aproximadamente 75% de sua massa elementar. É um elemento químico gasoso, inodoro, insolúvel em água, é menos denso que o ar e é o mais leve de todos os elementos.

Suas características físico-químicas conferem-lhe grande versatilidade, permitindo que ele seja utilizado tanto como um portador de energia quanto como um insumo renovável e não-poluente para diversas indústrias. Em um contexto global de transição energética e pressões crescentes para descarbonização, o H_2 desonta como um recurso estratégico, com potencial para reduzir as emissões globais de GEE e promover uma matriz energética mais sustentável e resiliente (Carbon Tracker, 2022).

3.1.1. Classificação da Comissão Europeia

Para avaliar o impacto ambiental e a sustentabilidade do hidrogênio, diferentes classificações são utilizadas, levando em conta a tecnologia e a fonte de energia empregadas na sua produção. A Comissão Europeia, em 2020, estabeleceu conceitos para categorizar os tipos de hidrogênio de acordo com o processo produtivo e as emissões geradas.³⁵

³³ RODRIGUES, Robson Pereira. SOUZA, José Eduardo Silva Souza. TAMBOR, José Humberto Machado. As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente. 10 out. 2019. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607/pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

ANDRADE, T.N. DE; LORENZI, B.R.; Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil. Revista Sociedade e Estado – Set./Dez. 2015, Vol. 30, nº. 3.

³⁴ 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. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 25 nov. 2024.

³⁵ BEZERRA, Francisco Diniz. H2V: nasce um gigante no setor de energia. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 212, dez. 2021. Caderno Setorial ETENE. DOI: s1dspp01.dmz.bn:8443/s482-dspace/handle/123456789/1109.

Conforme a definição da Comissão Europeia (2020), o "hidrogênio baseado em eletricidade" é aquele produzido através da eletrólise da água em eletrolisadores alimentados por eletricidade, independentemente da origem dessa eletricidade. Nesse caso, as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do hidrogênio dependem diretamente da fonte de energia elétrica utilizada no processo. Se a eletricidade provém de fontes fósseis, o impacto ambiental do hidrogênio será elevado; caso seja proveniente de fontes renováveis, as emissões podem ser consideravelmente reduzidas.

O conceito de "hidrogênio renovável" refere-se ao hidrogênio produzido pela eletrólise da água utilizando renovável também pode ser obtido por meio de biogás ou pela conversão bioquímica de biomassa, desde que esses processos atendam aos critérios de sustentabilidade. Esse tipo de hidrogênio é frequentemente referido como "hidrogênio limpo".

Por outro lado, o "hidrogênio baseado em fósseis" é produzido por meio de processos que utilizam combustíveis fósseis como matéria-prima, tais como a reforma do gás natural e a gaseificação do carvão. Essa categoria representa a maior parte do hidrogênio produzido atualmente e está associada a emissões elevadas de gases de efeito estufa. Dentro dessa categoria, existe o "hidrogênio de base fóssil com captura de carbono", no qual as emissões resultantes do processo de produção são parcialmente capturadas e armazenadas. Embora essa técnica reduza as emissões de gases de efeito estufa, sua eficácia depende da eficiência do processo de captura, que pode variar, alcançando um máximo de cerca de 90%.

Além disso, o conceito de "hidrogênio de baixo teor de carbono" abrange tanto o hidrogênio baseado em fósseis com captura de carbono quanto o hidrogênio baseado em eletricidade, desde que ambos apresentem emissões significativamente reduzidas ao longo do ciclo de vida em comparação com os métodos convencionais de produção de hidrogênio fóssil. Esta categoria busca equilibrar a redução de emissões com a viabilidade econômica, oferecendo uma alternativa intermediária entre o hidrogênio totalmente renovável e o hidrogênio fóssil.

Outro conceito importante é o dos "combustíveis sintéticos derivados de hidrogênio", que englobam uma variedade de combustíveis líquidos e gasosos produzidos a partir de hidrogênio e carbono. Esses combustíveis, como o querosene sintético para aviação e o diesel sintético para automóveis, podem ser considerados renováveis, desde que o hidrogênio utilizado seja de

origem renovável. A sustentabilidade desses combustíveis depende da matéria-prima e do processo de produção utilizados, e sua queima pode resultar em níveis de poluição atmosférica semelhantes aos dos combustíveis fósseis.

3.1.2. Classificação por cores

Para simplificar a classificação do hidrogênio de acordo com a fonte de energia utilizada em sua produção, o setor passou a adotar um código de cores. Essa classificação, amplamente mencionada na literatura, facilita a identificação do nível de sustentabilidade ambiental do hidrogênio produzido, sendo as principais: cinza, branco, azul e verde. O hidrogênio cinza é produzido a partir de combustíveis fósseis sem captura de carbono, enquanto o hidrogênio azul também vem de combustíveis fósseis, mas com captura de carbono. Já o H2V é obtido a partir de fontes renováveis, sem emissão de carbono, sendo o mais promissor para atender às metas globais de redução de emissões.

Existe uma ampla gama de cores para classificar o nível de emissões e o processo de produção do hidrogênio, como o hidrogênio preto, marrom, turquesa etc. Contudo, neste estudo, iremos nos limitar às categorias já mencionadas, a fim de manter a objetividade.

3.1.3. A utilização na indústria

O hidrogênio tem inúmeras aplicações industriais e energéticas. No setor de energia, possui grande potencial como portador de energia para geração de eletricidade e em células de combustível para veículos. Na indústria agropecuária, é um insumo essencial para a produção de amônia (NH_3), que por sua vez é a matéria-prima principal para fabricação de fertilizantes, que atualmente são importados em sua maior. Na indústria petroquímica, é utilizado no refino de combustíveis fósseis, como, por exemplo, na remoção de enxofre durante os processos de refino de combustível. Já na indústria alimentícia, o hidrogênio é empregado na produção de alimentos hidrogenados, como margarinhas.

O Brasil, reconhecido como uma potência agrícola e atualmente dependente da importação de fertilizantes nitrogenados, além de ser um grande exportador de produtos agrícolas e minerais, ambos fortemente dependentes de transporte marítimo movido a

combustíveis fósseis, apresenta um grande potencial para desenvolver um mercado interno de H2V e seus derivados (SANTOS; CHAVES, 2021).³⁶

Mas, para além das funções já citadas e do grande potencial como gerador de energia elétrica, o H₂ é apontado como a principal alternativa para substituição dos combustíveis fósseis na indústria pesada de transporte, como as de aço, cimento, fertilizantes, transporte e aviação.³⁷

Além disso, o processo de redução direta (DRI, sigla em inglês para *Direct Reduced Iron*) é um método de produção de aço a partir de minério de ferro que constitui a quarta maior demanda de hidrogênio atualmente, após o refino do petróleo, da amônia e do metanol. Deste modo, o H2V surge como uma alternativa viável para diminuir o consumo de diesel e descarbonizar as operações de mineração, através do uso de tecnologias de células a combustível em instalações e na logística, especialmente em veículos pesados. A geração de energia elétrica diretamente nas minas, utilizando fontes renováveis combinadas à produção de H2V, é uma possibilidade que permitiria o uso do hidrogênio como combustível em veículos (*power-to-mobility*). Essa abordagem tornaria as minas energeticamente autossuficientes, eliminando a necessidade de transportar diesel para áreas remotas (GIZ, 2021).

Toda essa versatilidade posiciona o hidrogênio como um componente fundamental na busca por uma economia de baixo carbono, reforçando seu papel na mitigação das mudanças climáticas e na substituição de insumos poluentes. A expressão “economia do hidrogênio” tem sido adotada para descrever um novo modelo econômico que utiliza o hidrogênio como principal vetor energético, em contraste com a economia atual, amplamente dependente de recursos não-renováveis, como o petróleo e seus derivados (CGEE, 2010).³⁸

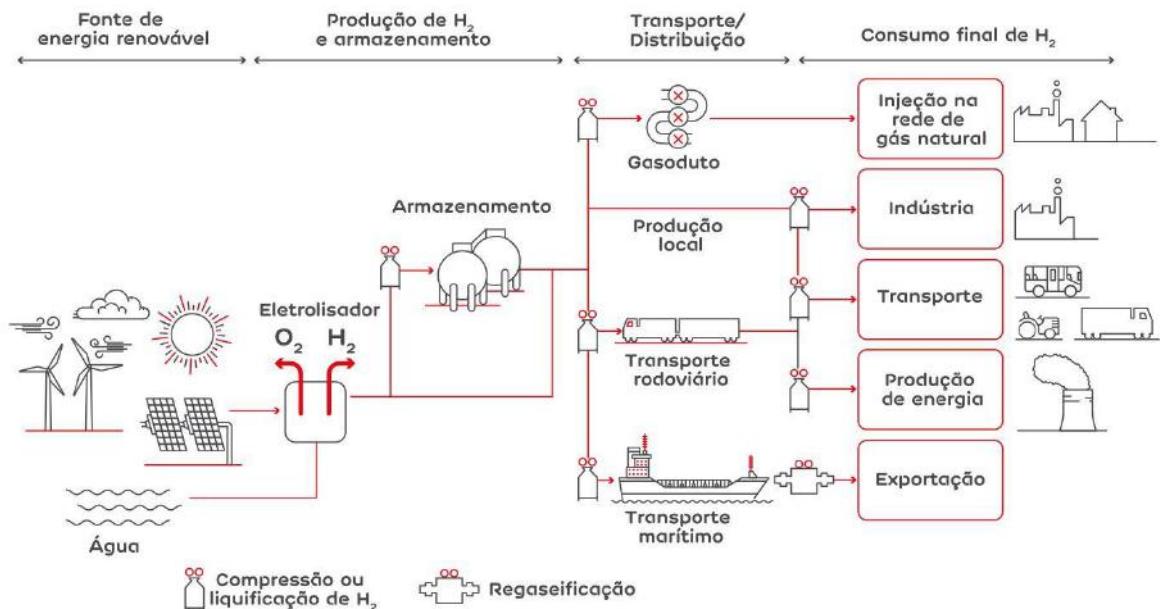
Na Figura 1 abaixo é possível observar o esquema ilustrado de toda a cadeia de H₂, desde a produção ao consumo final.

³⁶ 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. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

³⁷ OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. Panorama do Hidrogênio no Brasil. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td278I>. Acesso em: 25 nov. 2024.

³⁸ BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 212, dez. 2021. Caderno Setorial ETENE. DOI: s1dspp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/1109.

Figura 1 – Esquema da cadeia de H2V.



Fonte: EDP, 2020.

3.2. Histórico da regulação do hidrogênio no Brasil

O desenvolvimento do hidrogênio como fonte de energia no Brasil possui um histórico de avanços regulatórios e institucionais que refletem o compromisso do país com a transição energética e a sustentabilidade. Esse processo começou em 1998, com a criação do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), marcando o início dos esforços nacionais para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao hidrogênio.

Em 2003, o Brasil deu um passo importante no cenário internacional ao tornar-se membro da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE). Esse consórcio global tem como objetivo facilitar o intercâmbio de informações governamentais, industriais e acadêmicas sobre o papel do hidrogênio e das células a combustível na sociedade, ampliando o conhecimento e a cooperação no setor.

Em 2005, foi publicado o "Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil", um documento estratégico que delineava metas para o desenvolvimento do hidrogênio no país ao longo de duas décadas. Esse roteiro estabeleceu as bases para que o hidrogênio se

tornasse uma peça-chave na matriz energética brasileira, promovendo a construção de uma infraestrutura adequada e o desenvolvimento de tecnologias nacionais.

A fundação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) em 2017 representou um marco importante no avanço institucional do setor. A ABH2 tem desempenhado um papel crucial ao unir setores público e privado em prol do desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil, promovendo parcerias e iniciativas que fortalecem a presença do hidrogênio na economia nacional.

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), publicado em 2020, posicionou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e essencial para a descarbonização da matriz energética brasileira. O PNE 2050 ressalta a importância do hidrogênio como um vetor energético promissor, alinhado às metas de sustentabilidade e ao compromisso do país com a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Em 2021, o Brasil co-liderou o Diálogo de Alto Nível sobre Energia das Nações Unidas, no qual apresentou um pacto energético voltado ao desenvolvimento do hidrogênio, reforçando sua relevância no cenário internacional. No mesmo ano, foram publicadas duas resoluções importantes do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE): a Resolução CNPE nº 02/2021, que prioriza a alocação de recursos regulados pela ANP e ANEEL para projetos de hidrogênio, e a Resolução CNPE nº 06/2021, que estabeleceu as diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), consolidando o compromisso do governo com o desenvolvimento dessa fonte energética.

O ano de 2022 foi marcado pela institucionalização do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) através da Resolução CNPE nº 06/2022, que também criou o Comitê de Gestão do PNH2 (Coges-PNH2), responsável por coordenar as ações de implementação do programa. Nesse mesmo ano, foram propostos projetos de lei significativos, como o Projeto de Lei nº 725/2022, de autoria do senador Jean Paul Prates, que propôs um marco regulatório para o hidrogênio, e o Projeto de Lei nº 1.878/2022, apresentado pela Comissão de Meio Ambiente do Senado, voltado para a regulamentação do H2V.

O processo regulatório avançou em 2023, com o debate de novos projetos de lei no Senado e na Câmara dos Deputados, incluindo o Projeto de Lei nº 2.308/2023, que definiu

diretrizes e classificações legais para o hidrogênio e o H2V, e foi proposto pelos deputados G. Marques e A. Ventura. Após discussões com o governo federal e o setor privado, a Câmara dos Deputados aprovou a versão revisada do Projeto de Lei nº 2.308/2023, agora denominado Projeto de Lei nº 2.308/2023-A, com ajustes sugeridos pelo Comitê de Transição Energética. Posteriormente, o Senado aprovou o Projeto de Lei nº 5.816/2023, elaborado pelo Comitê de H2V.

Finalmente, em 2024, o Brasil alcançou um marco significativo com a sanção da Lei nº 14.948/2024, que estabeleceu o marco legal para o hidrogênio de baixo carbono no país, e da Lei nº 14.990/2024, que instituiu o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixo Carbono (PHBC). Inspirado em políticas internacionais como o Inflation Reduction Act dos EUA e o REPowerEU, o PHBC estabelece um sistema de incentivos fiscais, com um montante de R\$ 18,3 bilhões em créditos tributários, para fomentar a produção e o consumo de hidrogênio de baixo carbono no Brasil, conforme será visto abaixo.

3.3. Marco legal do hidrogênio no Brasil

O Marco Legal do Hidrogênio, sancionado pela Lei nº 14.948, de 02 de agosto de 2024³⁹, é um marco fundamental para a regulação do hidrogênio no Brasil. A lei reconhece o hidrogênio como peça-chave para a matriz energética do futuro, tanto no contexto nacional quanto internacional, sendo decisiva para a transição energética e a descarbonização da economia brasileira.

O Brasil, com sua vasta capacidade de geração de energia renovável, está posicionado para ser um dos maiores produtores e exportadores de hidrogênio de baixa emissão de carbono, sendo este o foco da Lei nº 14.948/2024. A legislação detalha aspectos como produção, armazenamento e comercialização do hidrogênio, dividindo-o em diferentes categorias com regras específicas.

3.3.1. Classificação

³⁹ BRASIL. **Lei nº 14.948, de 11 de julho de 2024.** Institui o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2) e dispõe sobre medidas de incentivo à produção e comercialização de hidrogênio de baixo carbono. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 11 jul. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 25 nov. 2024.

Em relação à classificação do hidrogênio, a lei não utiliza aquelas estabelecidas pela Comissão Europeia, e nem o esquema simplificado de cores. Em vez disso, a Lei nº 14.948/2024 prevê, em seu art. 4º, uma classificação própria para as diferentes formas de hidrogênio, considerando a fonte de energia empregada na produção e a pegada de carbono resultante.

O Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono é o hidrogênio combustível ou insumo industrial cujo ciclo de vida resulta em emissões de GEE inferiores ou iguais a 7 kgCO₂eq/kgH₂ (sete quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido). O limite e a forma de medição de emissões de CO₂ variam entre países, sendo possível observar abaixo uma tabela comparativa da taxonomia internacional.

Figura 2 – Taxonomia internacional do hidrogênio de baixo carbono.

Critérios	Hidrogênio de Baixo Carbono	Hidrogênio Limpo	Combustíveis Renováveis de Origem Não Biológica-RFNBO	Hidrogênio de Baixo Carbono	Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono	Hidrogênio Renovável	Hidrogênio Verde
Limite de emissão	2,4 kgCO ₂ e/kgH ₂	4,0 kgCO ₂ e/kgH ₂		3,4 kgCO ₂ e/kgH ₂			7 kgCO ₂ eq/kgH ₂
Fronteira	Poço ao portão de produção			Poço à roda			A definir
Escopo incluído no cálculo de emissão	Escopo 1, Escopo 2, Escopo 3 parcial (somente emissões upstream)		Escopo 1, 2 e 3 parcial (emissões upstream e downstream)	A ser definido até Agosto/2025			A definir
Método de produção	Eletrólise, Reforma de gás fóssil com CCS, Reforma de gás biogênico, Gaseificação de biomassa, dentre outros	Eletrólise, Reforma de gás fóssil com CCS, Gaseificação de carvão com CCS, Gaseificação de biomassa com CCS	Eletrólise com energia renovável (exceto biomassa)	Não baseado em renováveis, por exemplo, eletrólise com energia nuclear, combustível fóssil com CCS	Diversas fontes de produção	Natural, biomassa, etanol, biocombustíveis e eletrólise com energia renovável	Eletrólise com energia renovável

Fonte: CCEE, 2024.⁴⁰

O nível de emissões adotado pelo texto legal está sendo alvo de discussões, tendo em vista que ultrapassa em mais do que o dobro do limite de 3,4 kgCO₂eq/kgH₂ (três quilogramas e quatrocentos gramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio

⁴⁰ AIEX, Rodolfo; GEDRA, Ricardo. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Apresentação Powerpoint, 14 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/apresentacoes/15a-reuniao-coges-pnh2/20240814-15a-reuniao-coges-pnh2-ccee-2.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

produzido) estabelecido pela União Europeia (IEA, 2023⁴¹), principal potencial destino do H2 brasileiro.⁴²

A justificativa dada pelo legislador brasileiro é a de que a ampliação visaria abarcar a utilização de etanol na produção de hidrogênio⁴³. Contudo, essa explicação perde o sentido ao considerarmos que, segundo nota técnica⁴⁴ da World Wide Fund for Nature (WWF), a emissão de CO2 pela produção de hidrogênio por reforma a vapor de etanol é de 2,27 Kg. Nesse sentido, o aumento do potencial de poluição na produção do hidrogênio de “baixa emissão” afastou a legislação brasileira dos padrões de produção de potenciais destinos de exportação.

Adicionalmente, o **Hidrogênio Renovável** é o hidrogênio combustível ou insumo industrial produzido naturalmente (hidrogênio natural) ou a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelas autoridades públicas.

Por fim, o **Hidrogênio Verde** é o hidrogênio combustível produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis como as supracitadas, sem prejuízo de outras que venham a ser reconhecidas como renováveis.

Além das classificações, o marco legal introduz os conceitos de "Carreadores de Hidrogênio" e "Derivados de Hidrogênio", que se referem, respectivamente, a substâncias capazes de transportar o hidrogênio e a produtos industriais que o utilizam como matéria-prima. Essa abordagem amplia o campo de aplicação do hidrogênio no Brasil, incorporando uma diversidade de produtos e aplicações que podem se beneficiar do potencial energético e da sustentabilidade do hidrogênio como combustível alternativo.

⁴¹ **COMISSÃO EUROPEIA.** Comissão estabelece regras para o hidrogênio renovável. Disponível em: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_23_594>. Acesso em: 25 nov. 2024.

⁴² **IMPIERI**, Gabriel Silva. Marco Legal do Hidrogênio: aumento no limite de emissões ameaça sustentabilidade. Disponível em: <https://www.jota.info/artigos/marco-legal-do-hidrogenio-aumento-no-limite-de-emissoes-ameaca-sustentabilidade>. Acesso em: 10 nov. 2024.

⁴³ **LINDNER**, J. Senado aumenta limite de emissões de carbono em projeto de H2V para contemplar etanol. Disponível em: <https://valor.globo.com/politica/noticia/2024/07/04/senado-aumenta-limite-da-emissao-de-carbono-no-pl-do-hidrogenio-verde-para-contemplar-etanol.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2024.

⁴⁴ **WWF**. Rotas para produção de hidrogênio sustentável no Brasil: análise ambiental e econômica. Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/factsheet_hidrogeniobaixocarbono_final.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

3.3.2. Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

Como ponto central, a lei cria a Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, que reúne (i) o Programa Nacional do Hidrogênio; (ii) o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), que foi posteriormente regulamentado pela Lei nº 14.990/2024⁴⁵; (iii) o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2); (iv) o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); e (v) as diretrivas para a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias para produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

A referida política estabelece 23 objetivos estratégicos, a serem seguidos pela União, Estados e Municípios, com o objetivo de fomentar o uso e a produção de hidrogênio tanto para consumo interno quanto para exportação.

3.3.3. Programa Nacional do Hidrogênio

O Ministério de Minas e Energia (MME) é o órgão responsável por propor ao Conselho Nacional de Políticas Energéticas (CNPE) os parâmetros técnicos e econômicos dos projetos, enquanto o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH2) define as diretrizes para a execução da política.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) foi designada como a autoridade responsável por supervisionar toda a cadeia produtiva do hidrogênio no Brasil, com as tarefas de regular, autorizar e fiscalizar o exercício das atividades que vão desde a produção até a comercialização de hidrogênio no país, como o carregamento, o processamento, o tratamento, a importação, a exportação, a armazenagem, a estocagem, o acondicionamento, o transporte, a transferência e a revenda do combustível, garantindo que

⁴⁵ BRASIL. **Lei nº 14.990, de 14 de novembro de 2024.** Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Carbono e dispõe sobre outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 14 nov. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14990.htm. Acesso em: 25 nov. 2024.

todas as etapas estejam em conformidade com os padrões de baixa emissão de gases de efeito estufa.

É importante destacar que a ANP também será responsável por regular a infraestrutura associada à movimentação e a comercialização de derivados e carreadores do hidrogênio, como a amônia, mas não a exploração, a produção e o controle de qualidade de tais insumos.

Adicionalmente, a ANP será responsável pela implementação de um mecanismo inovador chamado "*sandbox regulatório*", que é um ambiente regulatório no qual serão expedidas autorizações temporárias de modo a permitir que novas tecnologias e modelos de negócios sejam testados em um campo controlado antes de sua aplicação definitiva e em larga escala.

3.3.4. PHBC e a Lei nº 14.990/2024

Em 01 de outubro de 2024, foi publicada a Lei nº 14.990/2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixo Carbono (PHBC), alinhado a políticas internacionais similares, como o Inflation Reduction Act dos EUA e o REPowerEU. A nova lei dá sequência à Lei nº 14.948/2024, que estabeleceu o Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono no Brasil e incluiu o PHBC na Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono.

Com créditos fiscais de R\$ 18,3 bilhões para incentivar a produção e o consumo de hidrogênio de baixo carbono no Brasil, o PHBC visa fornecer subsídios financeiros através da concessão de créditos tributários a determinados projetos de hidrogênio de baixo carbono. O programa foi inicialmente tratado no Projeto de Lei que resultou na Lei nº 14.948/2024, mas a proposta de concessão de créditos foi vetada pelo Presidente por falta de indicação dos impostos específicos que seriam reduzidos. A Lei nº 14.990 agora especifica que os créditos tributários reduzirão a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL).

O valor total de créditos fiscais, que poderá ser concedido no período de 2028 a 2032, permanece em R\$ 18,3 bilhões, distribuídos de forma crescente ao longo dos anos. Em 2028, por exemplo, o limite será de R\$ 1,7 bilhão, até atingir R\$ 5 bilhões em 2032.

De acordo com o texto, os créditos fiscais poderão ser concedidos com base em até 100% da diferença entre o preço estimado do hidrogênio de baixa emissão de carbono e o preço dos combustíveis fósseis que ele substituirá.

Os objetivos do PHBC, que serão levados em conta durante a concessão dos créditos, incluem:

- (ii) Desenvolver o Hidrogênio de Baixo Carbono e o Hidrogênio Renovável, conforme definido na Lei nº 14.948/2024;
- (iii) Apoiar ações de transição energética;
- (iv) Estabelecer metas para o desenvolvimento do mercado interno de hidrogênio de baixo carbono;
- (v) Aplicar incentivos para descarbonizar setores de difícil abate, como fertilizantes, aço, cimento, químicos e petroquímicos, utilizando hidrogênio de baixo carbono; e
- (vi) Promover o uso de hidrogênio de baixo carbono no transporte pesado.

Nesse sentido, os créditos tributários do PHBC aplicar-se-ão ao fornecimento de hidrogênio de baixo carbono e seus derivados produzidos no Brasil. Eles serão equivalentes a até 100% da diferença entre o preço estimado do hidrogênio de baixo carbono e o preço estimado de produtos substitutos, com o objetivo de aumentar a competitividade do hidrogênio de baixo carbono.

Os créditos poderão ser proporcionais à intensidade de emissão de gases de efeito estufa do hidrogênio produzido e serão sujeitos a um processo competitivo no qual poderão participar os produtores são beneficiários do Rehidro.

Como critério para elegibilidade, os projetos devem atender a pelo menos um dos seguintes requisitos: (i) contribuir para o desenvolvimento regional, (ii) contribuir para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, (iii) incentivar o desenvolvimento tecnológico e a sua difusão, ou (iv) promover a diversificação da indústria brasileira.

Os referidos critérios serão aplicados em um processo competitivo, no qual os projetos serão avaliados com base no valor de crédito solicitado por unidade de produto, priorizando aqueles com menor custo por unidade e maior eficiência ambiental.

A Lei nº 14.990/2024 também estabelece limites anuais para a concessão de créditos tributários, cujo valor será determinado pelo Executivo, conforme os objetivos fiscais e os propósitos do PHBC, e incluídos no orçamento federal anual. Créditos que não forem utilizados no ano corrente poderão ser aplicados em anos subsequentes.

Caso o projeto vencedor contemplado pelo PHBC não for implementado ou descumprir normas legais e regulatórias, o beneficiário estará sujeito a multas de até 20% do valor do crédito e a restituição de quantias indevidamente recebidas.

Os créditos tributários do PHBC correspondem à Contribuição Social sobre o Lucro Líquido e são compensáveis com dívidas tributárias ou reembolsáveis em dinheiro, e aplicam-se exclusivamente ao hidrogênio de baixo carbono ou seus derivados produzidos no Brasil, entre 1º de janeiro de 2028 e 31 de dezembro de 2032.

Para assegurar a transparência e o monitoramento dos resultados, o Poder Executivo deverá publicar um relatório anual com as avaliações e resultados alcançados pelo PHBC, pela Política Nacional de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, pelo Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio e pelo Rehidro. O relatório incluirá uma lista de projetos que receberam créditos fiscais e os resultados das ações de fiscalização e monitoramento, criando uma base de dados acessível para avaliação contínua do progresso e dos impactos das políticas de hidrogênio no país.

O PHBC também introduz incentivos adicionais para tecnologias limpas, estabelecendo que o percentual de crédito concedido será inversamente proporcional à intensidade das emissões de GEE do projeto. Isto é, quanto menor a emissão de carbono do projeto, maior poderá ser o benefício fiscal, garantindo que os benefícios fiscais sejam maximizados para os projetos com maior potencial de descarbonização.

Por fim, a nova lei simplifica o ressarcimento dos créditos tributários, ampliando o prazo para até 12 meses após a solicitação, uma mudança em relação ao projeto original, que previa apenas 60 dias. O ressarcimento em dinheiro, agora, também não exige comprovação de insuficiência de débitos de CSLL ou outros tributos federais, facilitando o acesso das empresas aos benefícios do PHBC.

Por fim, caberá a Receita Federal editar normas para disciplinar a aplicação dos créditos fiscais.

Com essas medidas, o PHBC se torna um marco no incentivo à economia do hidrogênio sustentável no Brasil, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias limpas e alinhando o país às melhores práticas internacionais no combate às mudanças climáticas.

3.3.5. Rehidro

De modo a incentivar economicamente a produção de hidrogênio de baixa emissão, o Marco Legal introduz o Rehidro – Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, que oferece uma série de benefícios fiscais, dentre os quais os principais são a suspensão de tributos como PIS, Cofins, PIS-Importação e Cofins-Importação para a aquisição ou importação de máquinas e equipamentos destinados à produção de hidrogênio de baixa emissão.

Além disso, as empresas beneficiárias podem emitir debêntures incentivadas, nos termos do art. 2º da Lei nº 12.431/2011, que oferecem vantagens fiscais e permitem a captação de recursos para financiar projetos de hidrogênio, sejam eles de geração de energia elétrica renovável ou de produção de biocombustíveis para uso na cadeia do hidrogênio de baixo carbono.

Para se qualificar ao Rehidro, as empresas precisam cumprir certos requisitos, a serem estabelecidos em regulamento, como o uso de um percentual mínimo de conteúdo local e a realização de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Para além disso, as empresas aptas a se enquadrarem na condição de beneficiárias serão aquelas que estiverem devidamente autorizadas a produzir hidrogênio, em um prazo de cinco anos contados a partir de janeiro de 2025, bem como as que já produziam na data da publicação da lei.

Também podem ser beneficiárias do Rehidro as pessoas jurídicas coabilitadas que (i) exerçam atividade de acondicionamento, armazenamento, transporte, distribuição ou comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono; que (ii) produzam energia elétrica renovável ou (iii) biocombustíveis destinados à produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Por fim, é importante notar que os incentivos tributários aos beneficiários do projeto terão vigência de cinco anos, sendo que a adesão e a permanência no regime estarão estritamente condicionadas à regularidade fiscal da pessoa jurídica beneficiária em relação às suas obrigações tributárias.

3.3.6. Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2)

Outro destaque da Lei nº 14.948/2024, e um dos pontos centrais do presente estudo, é o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), que tem como objetivo padronizar e monitorar as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de hidrogênio, de modo a assegurar a transparência e a sustentabilidade na produção de hidrogênio no Brasil.

Embora a adesão ao sistema seja voluntária, os produtores que optarem por participar ficam obrigados a cumprir as normas de governança estabelecidas pelo sistema para obter a certificação. No entanto, essa característica de adesão voluntária gera preocupações, especialmente no contexto das exportações, ao enfraquecer a relevância atribuída ao tema pelo Ministério de Minas e Energia (MME) durante sua participação na COP28.

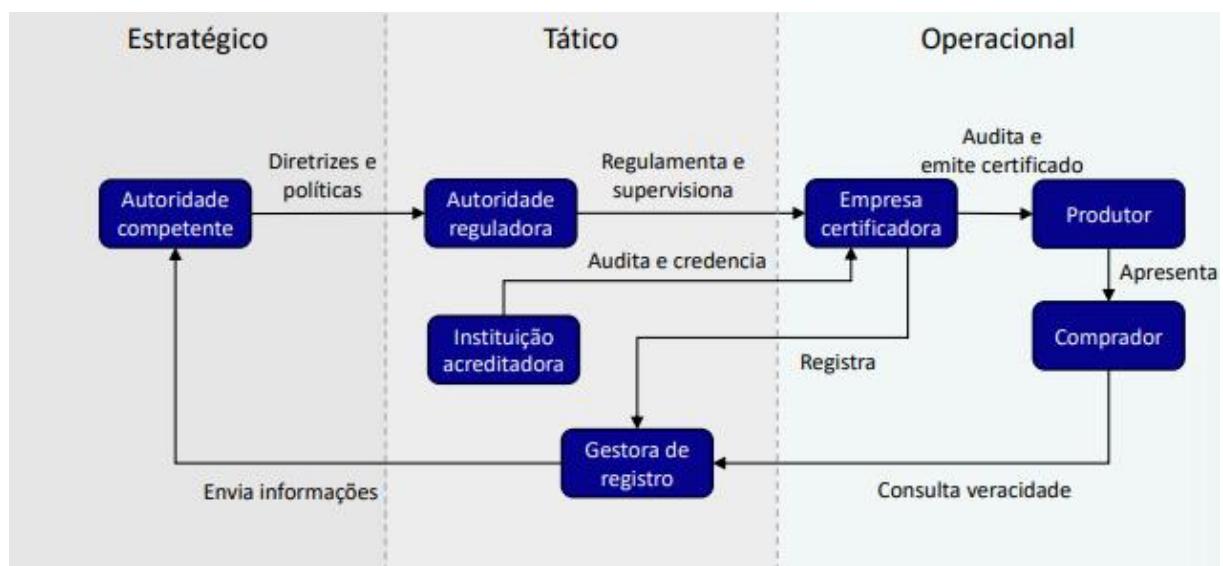
Isto pois, na COP28, o Brasil teve uma participação ativa nas negociações da Mesa Redonda de Alto Nível sobre Hidrogênio, firmando compromissos importantes. O país aderiu a duas declarações principais: a primeira busca promover o reconhecimento mútuo entre sistemas de certificação de hidrogênio de diferentes países, enquanto a segunda propõe ações conjuntas entre governos e empresas para impulsionar o comércio internacional de hidrogênio. Diante disso, a previsão de adesão voluntária ao sistema de certificação acaba contradizendo os compromissos assumidos pelo MME nessas discussões.⁴⁶

⁴⁶ **IMPIERI**, Gabriel Silva. Marco Legal do Hidrogênio: aumento no limite de emissões ameaça sustentabilidade. Disponível em: <https://www.jota.info/artigos/marco-legal-do-hidrogenio-aumento-no-limite-de-emissoes-ameaca-sustentabilidade>. Acesso em: 10 nov. 2024.

Dessa forma, o sucesso do SBCH2 dependerá não apenas de sua adoção pelo setor produtivo, mas também de sua capacidade de se alinhar às expectativas do mercado internacional. Isso é especialmente relevante em um cenário onde certificações robustas e amplamente aceitas são um diferencial competitivo, sobretudo nas exportações para mercados que exigem comprovação rigorosa de práticas sustentáveis.

O SBCH2 contará com a seguinte estrutura: (i) uma Autoridade Competente, (ii) uma Autoridade Reguladora, (iii), uma Empresa Certificadora, (iv) uma Instituição Acreditadora, (v) uma Gestora de Registros, (vi) o Produtor, e (vii) o Comprador. A imagem abaixo demonstra o arranjo dessa governança.

Figura 3 – Governança do Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio.⁴⁷



Fonte: CCEE, 2024.

Em termos gerais, a Autoridade Competente do SBCH2 será a instância responsável por estabelecer as diretrizes de políticas públicas relacionadas à certificação do hidrogênio em âmbito nacional, garantindo o alinhamento do sistema às metas governamentais. Em contrapartida, essa autoridade também receberá informações provenientes do mercado de certificações, utilizando esses dados para ajustar e aprimorar as políticas implementadas.

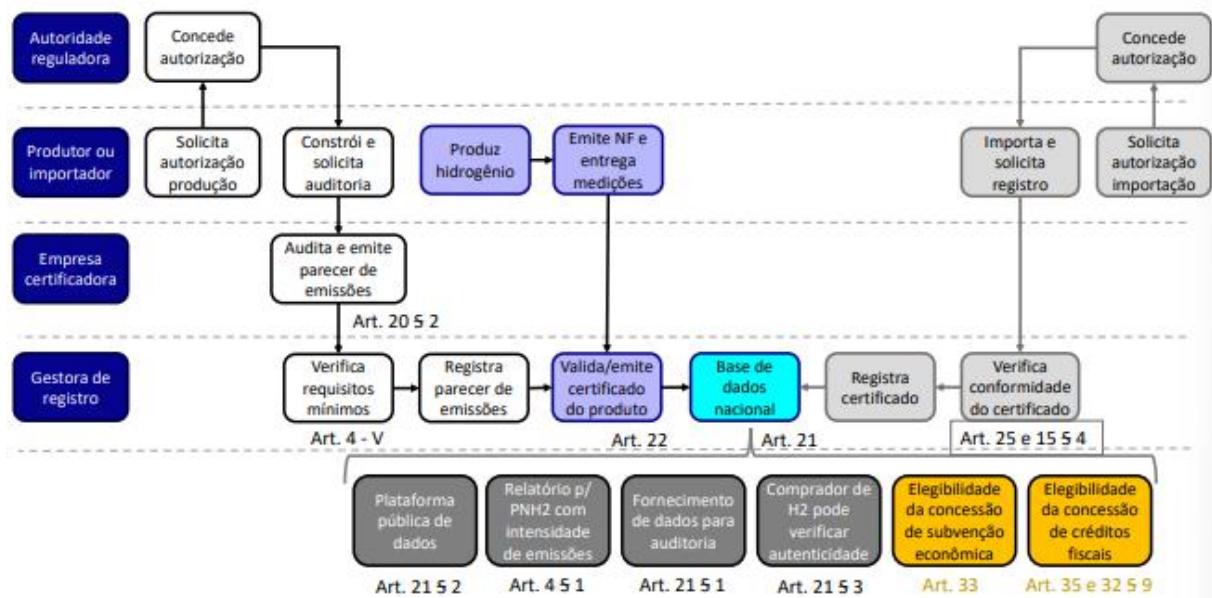
⁴⁷ AIEX, Rodolfo; GEDRA, Ricardo. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Apresentação Powerpoint, 14 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/apresentacoes/15a-reuniao-coges-pnh2/20240814-15a-reuniao-coges-pnh2-ccee-2.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Outrossim, a Autoridade Reguladora atuará regulamentando as diretrizes estratégicas fornecidas pela Autoridade Competente e supervisionando o funcionamento de todo o sistema. Sua atuação inclui a fiscalização das Empresas Certificadoras, que realizam a avaliação de conformidade do hidrogênio produzido pelos produtores, com base nas auditorias realizadas pela Instituição Acreditadora. Após a verificação, as Empresas Certificadoras emitem certificados e registram as informações na base gerida pela Gestora de Registros.

Ao comercializar o hidrogênio, o Produtor deve apresentar a respectiva certificação ao Comprador, comprovando a qualidade e a conformidade de sua produção com os padrões estabelecidos. Assim, para verificar a autenticidade dos certificados, o comprador pode consultá-los diretamente por meio da plataforma eletrônica da Gestora de Registro, responsável por administrar a base de dados dos certificados emitidos pelas Empresas Certificadoras.

Abaixo é possível observar o cenário macro da jornada da certificação do Hidrogênio no Brasil, nos termos da Lei nº 14.948/2024.

Figura 4 – Macrofluxo da jornada da certificação e aplicações da base de dados nacional conforme Lei.



Fonte: CCEE, 2024.

Conforme exposto na imagem, a autoridade responsável pela certificação do hidrogênio produzido no território nacional, deverá também prever mecanismos de interoperabilidade e de harmonização com padrões internacionais de certificação de hidrogênio, de modo que, quando o hidrogênio for objeto de importação, haja a possibilidade de reconhecimento da certificação adotada no território de origem.

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), para que o SBCH2 seja implementado de forma eficiente, é essencial que as ações previstas sejam conduzidas de maneira coordenada e integrada, abrangendo tanto a regulamentação quanto a operacionalização das atividades previstas na legislação. Em primeiro lugar, é indispensável que sejam nomeadas as instituições responsáveis por desempenhar os papéis estabelecidos pela lei, como a Autoridade Competente, a Autoridade Reguladora, a Instituição Acreditadora e a Gestora de Registro, pois essa definição assegura clareza nas atribuições de cada entidade e previne eventuais atrasos na execução do sistema. Além disso, deve-se regulamentar os critérios que nortearão a atuação das Empresas Certificadoras, dos Produtores e dos Compradores, de modo que a previsibilidade e a transparência sejam garantidas desde o início da implementação.

A criação da Base Nacional de Certificados de Hidrogênio, que desempenhará o papel de fonte oficial de informações relacionadas à certificação, é outro ponto fundamental para o funcionamento do SBCH2, segundo a CCEE. Essa base deve integrar dados sobre auditorias, rastreabilidade, emissão de certificados e elegibilidade para benefícios econômicos, como subvenções e créditos fiscais, além de ser acessível por meio de uma plataforma pública informatizada. Para que o sistema seja eficaz, é necessário que essa base seja desenvolvida de forma que promova a interoperabilidade com outros mercados internacionais, permitindo o reconhecimento mútuo de certificados e reforçando a competitividade do hidrogênio brasileiro. Ademais, é imprescindível que a gestão dessa base inclua mecanismos para evitar a ocorrência de dupla emissão de certificados associados a recursos energéticos, como biomassa e energia elétrica, a fim de preservar a credibilidade do sistema e assegurar conformidade com as melhores práticas internacionais.

Paralelamente, é fundamental que sejam definidos critérios técnicos claros e públicos para a aceitação dos certificados, englobando desde padrões rigorosos de medição de emissões até normas de validação de conformidade que estejam alinhadas tanto ao contexto nacional quanto às exigências internacionais. Esses critérios não apenas garantem maior previsibilidade ao

mercado, mas também facilitam o reconhecimento internacional do sistema, sobretudo em um cenário em que o hidrogênio brasileiro busca se consolidar como um recurso competitivo no mercado global.

Além disso, a obrigatoriedade de registro de todos os certificados emitidos pela Empresa Certificadora junto à Gestora de Registro, bem como a declaração, pelos Produtores ou Importadores, das notas fiscais e medições relacionadas à produção ou comercialização do hidrogênio, constitui um passo essencial para garantir a rastreabilidade e o controle do sistema. Essa etapa, que precisa ser regulamentada e operacionalizada com rapidez, é indispensável para que o SBCH2 funcione de maneira confiável e integrada, promovendo a transparência necessária para atrair a adesão de agentes nacionais e internacionais.

Por fim, é imprescindível que o sistema seja estruturado de forma a oferecer estímulos econômicos concretos aos agentes envolvidos, como a conexão direta entre a certificação e benefícios fiscais ou subvenções econômicas. A vinculação dos certificados a programas de transição energética, como o PNH2, e a criação de incentivos claros para os participantes do sistema são fatores determinantes para assegurar a adesão e o sucesso do SBCH2. Assim, ao implementar essas medidas de maneira coordenada, o Brasil terá a oportunidade de desenvolver um sistema robusto, eficiente e competitivo, que não apenas atende às demandas internas, mas também projeta o país como um protagonista no mercado global de hidrogênio de baixo carbono.

Dito isto, a edição de decreto regulamentador que possibilite a implementação prática do sistema de certificação nos moldes indicados pela CCEE é fundamental para que o Brasil possa harmonizar seus padrões com os internacionais, facilitando a exportação e garantindo que o hidrogênio produzido no país atenda aos critérios exigidos pelos principais mercados consumidores internacionais.

3.4. Projetos de hidrogênio em desenvolvimento

O H2V já conta com mais de 60 anúncios de projetos no Brasil, com investimentos estimados em R\$ 188,7 bilhões. Somente o Porto de Pecém, no Ceará, concentra a maior parte desses aportes, com R\$ 110,6 bilhões destinados à construção de plantas de produção, segundo levantamento da Confederação Nacional da Indústria (CNI).

O documento aponta que, apesar da maior parte desses projetos serem de larga escala e olharem a exportação, a produção descentralizada, ou autoprodução, de H2V no Brasil, utilizando energia elétrica da rede ou geração distribuída, representa o caminho mais viável para o desenvolvimento imediato da indústria no país, pois esses projetos podem se materializar mais rapidamente em função da menor escala de produção e da complexidade comercial.

Produzir hidrogênio no local de consumo, utilizando a energia da rede elétrica – que já é 92% renovável, ofereceria, entre outras vantagens, a eliminação de custos de transporte e a isenção de impostos associados à comercialização. O estudo ainda aponta que esse modelo de negócio também possibilita o uso do oxigênio gerado no processo de eletrólise para melhorar a eficiência de combustão em fornos e aquecedores industriais, aumentando ainda mais a viabilidade econômica dos projetos.

A CNI também mapeou a capacidade instalada de eletrólise nos principais projetos em desenvolvimento no país, e o projeto com maior capacidade está previsto para o Porto de Parnaíba, no Piauí, com uma potência de 10 GW. No entanto, quando se analisa a capacidade por estado, o Ceará lidera com 15,9 GW, seguido pelo Piauí, com 15,6 GW, e pelo Rio de Janeiro, com 2,1 GW.

Atualmente, o Brasil tem onze projetos de H2V em análise para conexão à rede elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), somando 45 GW de capacidade até 2038. Sete desses projetos já receberam aprovação preliminar de viabilidade para conexão. A maioria está localizada no Nordeste, em subestações estratégicas, com destaque para o Ceará, Piauí e Bahia. A expansão da infraestrutura elétrica é necessária para suportar o crescimento dessa indústria emergente, especialmente a integração com energias renováveis.

Abaixo estão os sete projetos que já tiveram portarias emitidas reconhecendo a viabilidade de conexão à rede⁴⁸:

Quadro 1 – Projetos com portarias emitidas reconhecendo a viabilidade de conexão à rede.

⁴⁸ CHIAPPINI, Gabriel. **Brasil já tem onze projetos de hidrogênio com estudos de conexão à rede elétrica.** Eixos: 12 set. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/brasil-ja-tem-onze-projetos-de-hidrogenio-com-estudos-de-conexao-a-rede-eletrica/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Projeto	Empresa Responsável	Estado
Amônia Verde de Pecém	Voltalia Energia	Ceará
Planta Fortescue de H2V	Fortescue Sustainable Industries	Ceará
H2 – Pecém	Porto do Pecém Geração de Energia (Usina Termelétrica do Pecém)	Ceará
Iracema Amônia Verde	Casa dos Ventos	Ceará
Ecohydrogen H2V	Unigel – Ecohydrogen Energy	Bahia
Minas Gerais Green Fertilizer Plant – Uberaba	Atlas Agro Brasil Fertilizantes	Minas Gerais
H2V – Solatio Piauí	Solatio	Piauí

Fonte: Eixos, 2024.

A Petrobras, no contexto de sua estratégia de transição energética, tem firmado parcerias com grandes empresas do setor siderúrgico para explorar o uso do hidrogênio de baixo carbono como alternativa para a descarbonização de processos industriais, com foco na produção de aço. A empresa formalizou memorandos de entendimento (MOUs) com parceiros estratégicos, dentre os quais destacam-se Mitsui, ArcelorMittal, Vale, Energy China, Casa dos Ventos e European Energy. Esses acordos visam a cooperação no desenvolvimento de projetos relacionados ao hidrogênio, que estão em diversas fases de implementação, evidenciando o compromisso da Petrobras com o desenvolvimento de soluções energéticas de baixo carbono.

Entre os projetos em andamento, destaca-se a construção de uma usina piloto no estado do Rio Grande do Norte, com capacidade instalada de 2 megawatts, destinada ao estudo e aprimoramento do processo de produção de hidrogênio de baixo carbono. Esta usina tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica da produção de hidrogênio em escala reduzida, com vistas à sua expansão para operações de larga escala. A iniciativa representa um avanço nas pesquisas voltadas para o hidrogênio, visando consolidar a Petrobras como um ator relevante na transição energética brasileira.

Adicionalmente, a Petrobras está desenvolvendo um projeto voltado para a produção de hidrogênio azul, que envolve a captura e armazenamento de dióxido de carbono (CO₂) emitido durante o processo de reforma do gás natural. Para a operacionalização dessa tecnologia, a

empresa pretende estabelecer hubs de captura de CO₂ próximos à costa brasileira, onde formações geológicas salinas seriam utilizadas como reservatórios para o armazenamento seguro de carbono. Esses hubs não somente atenderiam à demanda da própria Petrobras, mas também estariam disponíveis para o armazenamento de emissões de empresas parceiras, promovendo uma abordagem colaborativa para a descarbonização do setor industrial.

Há, ainda, a possibilidade de a Petrobras utilizar suas instalações já existentes, como a Refinaria Duque de Caxias (Reduc), localizada no estado do Rio de Janeiro, para a produção de hidrogênio azul. Essa estratégia de utilização de infraestrutura consolidada visa otimizar recursos e acelerar a implementação do hidrogênio como fonte energética de baixo carbono. A inserção do hidrogênio e das tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) na matriz de operações da Petrobras integra uma política mais ampla de transição energética, com a qual a empresa busca consolidar-se como protagonista no desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis, alinhadas aos compromissos globais de mitigação das mudanças climáticas e à promoção de uma economia de baixo carbono.⁴⁹

4. A CERTIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LIMPOS

Nos últimos anos, a produção de combustíveis renováveis tem crescido consideravelmente. Consequentemente, governos ao redor do mundo passaram a adotar regulamentações e padrões voltados à sustentabilidade na produção, embora muitas vezes de forma inconsistente e despadronizada. Além disso, os maiores mercados de exportação frequentemente “transnacionalizam” suas exigências ao longo das cadeias de abastecimento, impondo requisitos que, muitas vezes, desconsideram as particularidades econômicas, ambientais e comerciais de países em desenvolvimento.⁵⁰

Deste modo, a certificação é um processo padronizado utilizado para verificar e atestar que um produto, serviço, processo ou sistema está em conformidade com requisitos predefinidos de qualidade, segurança e sustentabilidade. Esses requisitos, definidos por normas

⁴⁹ CHIAPPINI, Gabriel. **Petrobras avalia fornecimento de hidrogênio para siderúrgicas, afirma Tolmasquim**. Eixos: 14 ago. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/brasil-ja-tem-onze-projetos-de-hidrogenio-com-estudos-de-conexao-a-rede-eletrica/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

⁵⁰ BRANCO, Luizella Giardino Barbosa. **Biocombustíveis, governança global e comércio internacional: Rumo a um novo paradigma energético?** 2012. 281 f. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. DOI: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/9255>.

técnicas ou regulamentações legais, visam promover melhores práticas em diferentes setores. No caso do hidrogênio, a certificação assegura a procedência do produto, evita a “dupla contagem” de emissões e se configura como uma ferramenta fundamental para garantir a qualidade do produto, além de incentivar o financiamento de projetos no setor.

Considerando que o hidrogênio pode ser produzido a partir de fontes com intensidades de emissão de dióxido de carbono (CO₂) bastante variadas, torna-se necessário estabelecer padrões específicos para os diferentes tipos de hidrogênio ao longo de toda a cadeia de abastecimento. Nesse sentido, a certificação do hidrogênio envolve a avaliação do ciclo de vida das tecnologias utilizadas em sua produção, além do compartilhamento de informações e resultados analíticos dentro de categorias específicas de certificação (GH2, 2022).

É, portanto, essencial que os padrões de certificação sejam definidos em âmbito internacional, por meio de uma estrutura regulatória harmonizada, com códigos e normas que garantam aos compradores a confiabilidade da garantia de origem do hidrogênio (Riemer et al., 2022).

Diversas iniciativas estão atualmente em desenvolvimento, com destaque para o CertifHy, que se sobressai por sua abrangência e grau de maturidade, além dos modelos de certificação da Austrália e da Parceria Internacional para Hidrogênio e Células a Combustível na Economia (IPHE, 2022).⁵¹

4.1 ISO 14001 e ISSO 19870

Entre as mais relevantes para os objetivos de descarbonização e gestão sustentável estão a ISO 14001, que regula sistemas de gestão ambiental, e a ISO 19870, voltada para critérios de sustentabilidade e certificação de hidrogênio.

A ISO 14001, publicada pela *International Organization for Standardization* (ISO), é uma norma amplamente reconhecida que estabelece os requisitos para a implementação de um sistema de gestão ambiental (SGA). O principal objetivo dessa norma é possibilitar que as

⁵¹ GABRIELLI, José Sérgio. TOKARSKI, André Pereira R. **Estudos regulatórios para a certificação do H2V no Brasil.** Revista Princípios, n. 170, maio/ago. 2024. Disponível em: <https://revistaprincipios.emnuvens.com.br/principios/article/view/485/200>. Acesso em: 25 nov. 2024.

organizações identifiquem, avaliem e minimizem os impactos ambientais de suas atividades, garantindo conformidade com a legislação aplicável e promovendo a melhoria contínua de seus processos.⁵²

A versão mais recente da norma, atualizada em 2015, incorpora a High-Level Structure (HLS), que facilita a integração com outras normas de sistemas de gestão, como a ISO 9001 (qualidade) e a ISO 45001 (saúde e segurança no trabalho). Um dos destaques da ISO 14001 é seu enfoque no contexto organizacional e na análise de riscos e oportunidades ambientais, permitindo que as organizações alinhem seus objetivos ambientais às estratégias corporativas globais. Esse modelo promove maior resiliência às mudanças climáticas e reforça a adoção de práticas sustentáveis em longo prazo.

A implementação da ISO 14001 baseia-se no ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), que orienta as organizações a planejarem ações ambientais, executar essas ações, verificar os resultados e adotar medidas corretivas para garantir a melhoria contínua. Essa abordagem estruturada traz benefícios significativos, como a redução de custos operacionais, a economia de recursos naturais e a mitigação de riscos ambientais. Além disso, empresas que adotam a ISO 14001 demonstram maior compromisso com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), atraiendo investidores e consumidores que valorizam práticas sustentáveis.⁵³

A ISO 19870, também desenvolvida pela ISO, estabelece critérios técnicos e de sustentabilidade para a produção, transporte e utilização do hidrogênio. Essa norma tem um papel crucial na certificação do hidrogênio como uma fonte de energia limpa, assegurando que sua cadeia de valor esteja alinhada às metas globais de descarbonização. Os critérios estabelecidos pela ISO 19870 incluem a medição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de todo o ciclo de vida do hidrogênio, o que permite distinguir entre diferentes tipos, como o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, e o hidrogênio azul, gerado a partir de combustíveis fósseis com captura de carbono⁵⁴.

⁵² International Organization for Standardization. ISO 14001: Environmental management systems – Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2015.

⁵³ Idem.

⁵⁴ International Organization for Standardization. ISO 19870: Sustainability criteria for hydrogen production. Geneva: ISO, 2021.

A norma também fornece diretrizes para harmonizar padrões internacionais de sustentabilidade, o que é essencial para o comércio global de hidrogênio. Países como os da União Europeia, que possuem regulamentações rigorosas para importação de energia limpa, utilizam essas diretrizes para validar a sustentabilidade de hidrogênio importado, tornando a ISO 19870 um instrumento estratégico para produtores globais.

Além disso, a ISO 19870 desempenha um papel fundamental na promoção de mercados de crédito de carbono associados ao hidrogênio sustentável. A certificação internacional com base na norma aumenta a confiança dos investidores e consumidores, incentivando a adoção do hidrogênio como solução energética viável para setores de difícil descarbonização, como a indústria química e o transporte de cargas pesadas.

No Brasil, as normas ISO 14001 e ISO 19870 têm grande potencial para impulsionar a sustentabilidade e a competitividade em mercados globais. A adoção da ISO 14001 tem sido promovida em diversos setores, especialmente na indústria e no agronegócio, em consonância com as políticas ambientais brasileiras e os compromissos internacionais assumidos pelo país, como o Acordo de Paris⁵⁵. Essa norma também contribui para atender às exigências do mercado exportador, que demanda cada vez mais certificações ambientais.

A ISO 19870, por sua vez, está diretamente relacionada ao hidrogênio de baixo carbono e verde, segmentos nos quais o Brasil desponta como um potencial líder global devido à sua matriz energética predominantemente renovável e à abundância de recursos naturais. O alinhamento aos padrões internacionais de certificação, como os definidos pela ISO 19870, é essencial para que o hidrogênio brasileiro seja competitivo no mercado europeu.⁵⁶

4.2 Metodologias de estudo de pegadas de carbono⁵⁷

A certificação da intensidade de insumos nas cadeias de suprimento é realizada por meio de metodologias variadas, sendo a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) uma das mais relevantes. Essa abordagem considera as condições de produção em toda a cadeia de suprimento,

⁵⁵ Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020.

⁵⁶ Idem.

⁵⁷ International Organization for Standardization. ISO 19870: Sustainability criteria for hydrogen production. Geneva: ISO, 2021.

abrangendo desde a origem das matérias-primas até os insumos intermediários. A análise inclui não apenas os processos de extração mineral, mas também aspectos como reciclagem, uso de estoques existentes e produções intermediárias ou conjuntas, assegurando um fornecimento sustentável e responsável.

A ACV é amplamente utilizada como ferramenta para medir e quantificar os impactos ambientais de produtos ou serviços em todas as etapas de seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até o descarte final. Essa metodologia avalia diferentes categorias de impacto, como as emissões de gases de efeito estufa (GEEs), sendo aplicada em políticas ambientais como o RenovaBio, programa brasileiro que incentiva o uso de biocombustíveis. No contexto do RenovaBio, a ACV é essencial para mensurar a pegada de carbono dos biocombustíveis, permitindo a análise das emissões de GEEs em todas as fases, incluindo produção, processamento, distribuição e uso final.

A intensidade de carbono, que reflete a quantidade de emissões de CO₂ equivalente geradas durante a produção e o uso de um biocombustível, é um indicador central no RenovaBio. Essa métrica é utilizada para a emissão de créditos de descarbonização (CBIOs), que incentivam a adoção de biocombustíveis com menor impacto ambiental. Dessa forma, a ACV e a mensuração da pegada de carbono tornam-se ferramentas indispensáveis para promover a sustentabilidade no setor, possibilitando a definição de metas de redução de emissões e impulsionando a produção de combustíveis alternativos alinhados às estratégias de mitigação climática.

Para complementar, o governo brasileiro desenvolveu a RenovaCalc, uma ferramenta destinada a calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis. A RenovaCalc avalia o desempenho ambiental desses combustíveis considerando fatores como matéria-prima, processos de produção e transporte, gerando uma pontuação que compara suas emissões com as de combustíveis fósseis. Ao fornecer dados precisos, a ferramenta fortalece a implementação do RenovaBio, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas energéticas mais sustentáveis e alinhadas aos compromissos globais de redução de emissões.

O RenovaBio e a RenovaCalc estão intrinsecamente conectados, uma vez que a RenovaCalc é a ferramenta utilizada no contexto do RenovaBio para calcular e verificar as reduções de emissões proporcionadas pelos biocombustíveis. Desempenhando um papel

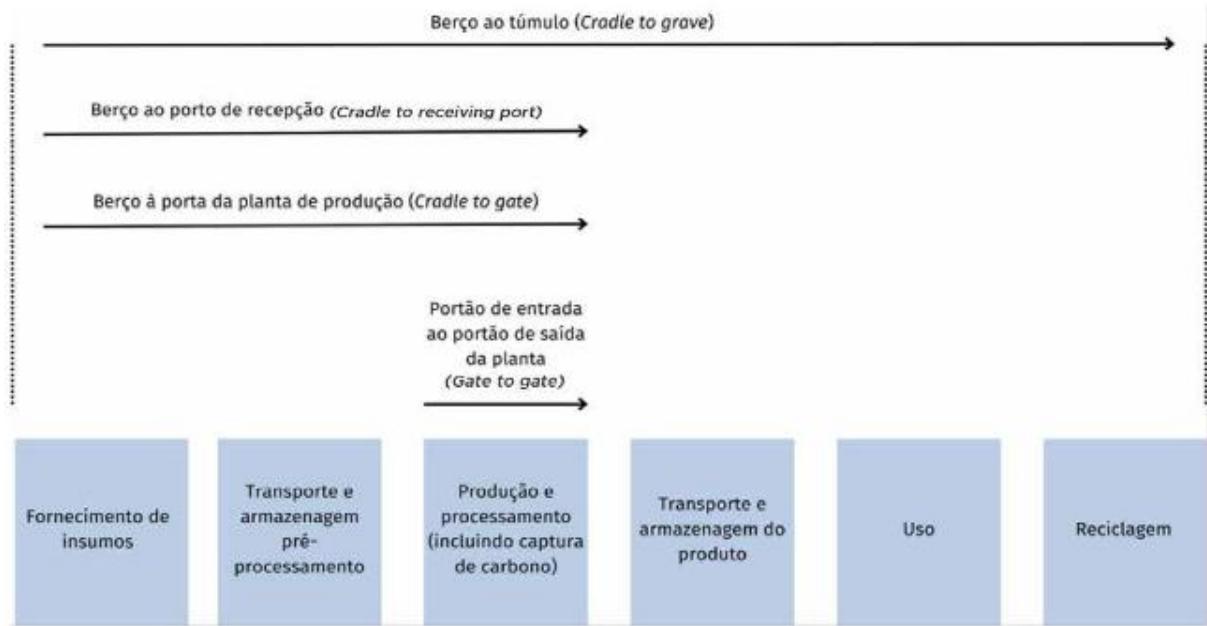
essencial, a RenovaCalc é responsável por certificar os produtores e viabilizar a emissão de Créditos de Descarbonização (CBIOs), os quais são utilizados pelas distribuidoras de combustíveis fósseis para atingir as metas estabelecidas pelo programa. A ferramenta avalia diferentes rotas de produção de biocombustíveis, incluindo etanol de cana-de-açúcar de primeira e segunda geração, etanol de milho, biodiesel, biometano e bioquerosene, abrangendo uma ampla gama de alternativas renováveis.

A análise realizada pela RenovaCalc combina dados de inventário de ciclo de vida dos processos de produção, extraídos da base de dados Ecoinvent, com parâmetros técnicos fornecidos diretamente pelos produtores de biocombustíveis. As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) em cada etapa do ciclo de vida dos biocombustíveis são estimadas com base na metodologia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). A soma dessas emissões resulta na intensidade de carbono do biocombustível, expressa em toneladas de dióxido de carbono equivalente por megajoule (tCO₂eq/MJ). Essa intensidade de carbono é então comparada à do combustível fóssil equivalente, gerando uma nota de eficiência energético-ambiental que reflete o desempenho do biocombustível.

Essa nota de eficiência, além de destacar o impacto ambiental positivo dos biocombustíveis, é determinante para a obtenção de créditos de descarbonização, os quais possuem valor de mercado e incentivam financeiramente a produção e utilização de combustíveis mais sustentáveis. Em síntese, a RenovaCalc é uma ferramenta abrangente que utiliza dados técnicos e análises de ciclo de vida para avaliar o desempenho ambiental e energético de diferentes rotas de produção de biocombustíveis, fornecendo informações cruciais sobre emissões de GEEs e viabilizando a atribuição de créditos de descarbonização, fomentando a sustentabilidade e a competitividade dos biocombustíveis no mercado.

Figura 5 – Estrutura geral de contabilização de emissões, conforme o CertifHy.⁵⁸

⁵⁸ CERTIFHY. **CertifHy-SD carbon footprint calculation.** [S.I.]: February 14, 2023. Disponível em: <www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2023/03/CertifHy_Carbon-footprint-calculation_220214.pdf>. Acesso em: 09 maio 2023.



Fonte: CertifHy (2022).

4.3. O sistema de certificação no Brasil

Atualmente, no contexto brasileiro, destacam-se duas iniciativas relevantes para a certificação de H2V: a certificação promovida pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e aquela oferecida pelo Bureau Veritas. Os principais aspectos e características dessas iniciativas pioneiras estão detalhados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Versão inicial de certificação e próximos passos estipulados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – 2023.

	Versão Inicial	Próximos passos
Atributos	Certifica a produção de H2.	Certificar produtos derivados.
Rota de produção	Eletrólise.	Reforma do biogás: conversão bioquímica da biomassa, hidrogênio azul, turquesa e outros.
Emissões	Indiretas associadas ao consumo de energia elétrica (escopo 2 de <i>GHG Protocol</i>).	Escopo 1 (emissões diretas, dentro do processo) do <i>GHG Protocol</i> e ciclo de vida.

Modalidade	Produtores conectados ao SIN (Sistema Interligado Nacional) com contrato (PPA), autoprodução renovável ou conexão direta (<i>off-grid</i>).	Adequações conforme necessidade do mercado e regulação nacional/internacional.
Entrega de certificado	Relatório em PDF.	Token ou <i>block chain</i> .
Padrão de referência	Europeu RED II (versão setembro/2022).	PNH2 (evolução do padrão europeu).

Fonte: Gabrielli, J. S., & Tokarski, A. P. R. (2024)⁵⁹ com base em CCEE (2023).

Quadro 3 – Versão inicial de certificação do Bureau Veritas – 2023.

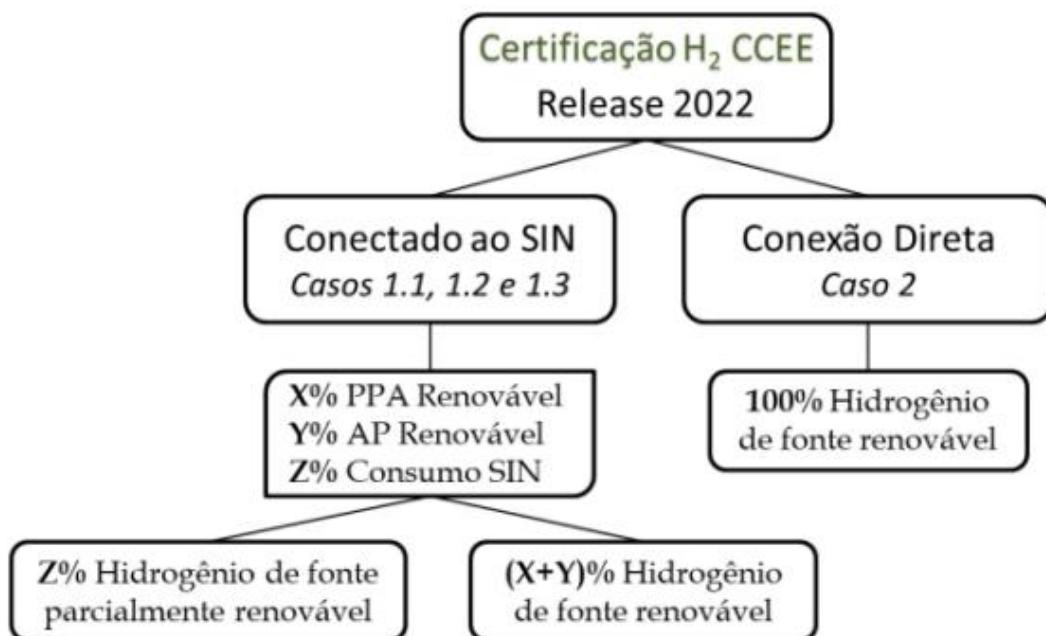
	Versão Inicial
Atributos	Avaliação do ativo de produção de hidrogênio renovável em relação aos critérios ESG, processos de segurança e emissões de gases de efeito estufa. Ele também avaliará a energia renovável usada para alimentar o eletrolisador. Um certificado será emitido se todos os requisitos forem cumpridos.
Rota de produção	Eletrólise da água.
Emissões	O cálculo da pegada de carbono é baseado em uma metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida que inclui emissões a montante derivadas das origens do processo de dessalinização de eletricidade e água em uso.
Modalidade	Abrange processos e segurança ocupacional.
Entrega de certificado	A etapa final será a emissão do selo após a verificação da quantidade de hidrogênio produzida pelo ativo certificado. A etiqueta estipula que o ativo deve ter uma pegada de carbono inferior a 2kg de CO2 equivalente por quilo de hidrogênio.
Padrão de referência	Europeu RED II (versão setembro/2022).

⁵⁹ GABRIELLI, José Sérgio. TOKARSKI, André Pereira R. **Estudos regulatórios para a certificação do H2V no Brasil**. Revista Princípios, n. 170, maio/ago. 2024. Disponível em: <https://revistaprincipios.emnuvens.com.br/principios/article/view/485/200>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Fonte: Gabrielli, J. S., & Tokarski, A. P. R. (2024)⁶⁰ com base em CCEE (2023).

Como visto, a CCEE é a instituição que já está traçando os próximos passos para a evolução do sistema de certificação de hidrogênio que lançado em dezembro de 2022 (CCEE, [FG1] 2022). Por se tratar de uma versão inicial, o sistema foi desenvolvido com base no conceito de Produto Mínimo Viável (MVP, na sigla em inglês), permitindo a identificação de oportunidades de aprimoramento nos critérios de certificação, no processo de emissão e no relacionamento com as empresas interessadas. A CCEE, além disso, possui o registro de todos os contratos de energia e realiza o monitoramento de toda a geração e consumo no Ambiente de Contratação Livre (ACL), o que a torna apta a fornecer informações certificadas sobre a origem da eletricidade utilizada na produção de hidrogênio, atendendo aos requisitos estabelecidos na revisão da RED II. Na Figura 6 abaixo estão apresentadas as modalidades e classificações relacionadas à certificação do hidrogênio.⁶¹

Figura 6 – Modalidades e classificações da certificação de hidrogênio.



Fonte: CCEE, 2022.

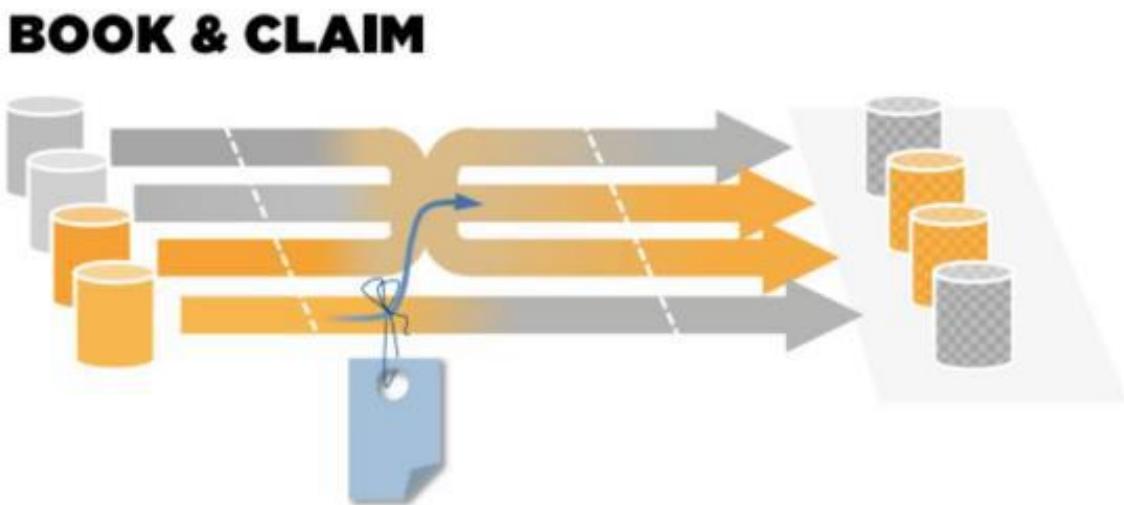
⁶⁰ GABRIELLI, José Sérgio. TOKARSKI, André Pereira R. **Estudos regulatórios para a certificação do H2V no Brasil**. Revista Princípios, n. 170, maio/ago. 2024. Disponível em:

<https://revistaprincipios.emnuvens.com.br/principios/article/view/485/200>. Acesso em: 25 nov. 2024.

⁶¹ FERNANDES, Gláucia; AZEVEDO, João Henrique de; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. **Panorama dos desafios do H2V no Brasil**. Coluna Opinião, Fundação Getúlio Vargas (FGV Energia), jan. 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

O sistema de certificação de hidrogênio adotado pela CCEE opera no modelo *Book and Claim*, o que permite maior flexibilidade para os modelos de negócio dos produtores. Esse modelo possibilita a negociação do certificado, permitindo que os atributos ambientais associados à produção de hidrogênio sejam transferidos de um produtor para outro. Além disso, ao término de sua validade ou uso final, o certificado precisa ser cancelado. Todo o processo de transferência e cancelamento deve ser solicitado pelo produtor de hidrogênio e devidamente registrado na CCEE. Esse registro desempenha um papel essencial no rastreamento dos certificados, garantindo a confiabilidade do sistema e evitando, sobretudo, problemas como a dupla contagem. A Figura 7 abaixo ilustra como ocorre essa transferência.

Figura 7 – Ilustração do sistema de certificação *Book and Claim*.



Fonte: CCEE, 2022.

Até o momento, apenas dois certificados foram emitidos por esse sistema, destinados à EDP e à Furnas. O processo de certificação está inserido no mercado voluntário, em que os próprios compradores definem as regras para avaliação dos critérios de sustentabilidade, e adota como referência o padrão europeu. No caso de Furnas, a produção certificada de 730kg de hidrogênio foi realizada a partir de fontes de energia solar e hidráulica na planta de Itumbiara, em Goiás, com validade do certificado até 07 de novembro de 2024. Por sua vez, a EDP produziu 295kg de hidrogênio utilizando energia solar para eletrólise no Complexo

Termelétrico do Pecém, em São Gonçalo do Amarante, no Ceará, cujo certificado teve validade até 14 de julho de 2024.⁶²

Ambas as empresas utilizaram o hidrogênio certificado para testes em suas próprias instalações. As unidades de produção foram desenvolvidas no âmbito dos programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel, destacando-se como umas das iniciativas pioneiras na implementação do mercado de hidrogênio no Brasil.

Com a publicação do Marco Legal do Hidrogênio no Brasil e a implementação do SBCH2, conforme abordado no item 2.3.2.4, torna-se essencial a edição de um decreto regulamentador para definir oficialmente as instituições e empresas que desempenharão os papéis estabelecidos pela Lei nº 14.948/2024. Dentro desse contexto, a CCEE desponta como uma provável candidata a integrar o sistema como uma das Empresas Certificadoras, dado que já possui um esquema de certificação, que pode ser licenciado para outras organizações utilizarem. Além disso, caso esse esquema seja validado pela União Europeia, a CCEE também deverá assumir a função de Gestora de Registros dos certificados emitidos por outras certificadoras, consolidando sua importância no sistema.

O Brasil conta atualmente com mais de 40 projetos voltados à produção de H2V, todos em busca de certificação que lhes permita acessar mercados internacionais, especialmente a União Europeia. A CCEE tem coordenado, em nome do Brasil, negociações com um grupo de 11 países que colaboram para estabelecer as diretrizes e padrões de certificação internacional. Além disso, a instituição mantém parcerias estratégicas, como com o Banco Mundial, que analisa globalmente os impactos ambientais e sociais de projetos relacionados ao hidrogênio, contribuindo com financiamentos para iniciativas alinhadas às melhores práticas de sustentabilidade.

No mercado interno, cerca de 50 empresas participam ativamente de um grupo de trabalho coordenado pela CCEE para construir os parâmetros necessários para a certificação do hidrogênio. Entre essas empresas, cinco já possuem projetos avaliados em cerca de R\$ 1 bilhão cada, voltados à produção de H2V. A maior parte dessas iniciativas está concentrada no estado

⁶² EDP e Furnas recebem primeiras certificações para hidrogênio renovável. Eixos, 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/edp-e-furnas-recebem-primeiras-certificacoes-para-hidrogenio-renovavel-do-brasil/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

do Ceará, nas proximidades do Porto de Pecém, um local estratégico tanto pela abundância de energia renovável, como solar e eólica, quanto pela proximidade com mercados internacionais, permitindo um trajeto mais curto para exportação à Europa.⁶³

Para viabilizar a exportação, o H2V, devido à sua alta inflamabilidade e dificuldade de compressão, é convertido em amônia antes do transporte. No destino, o composto é reconvertido em H2V, atendendo à demanda de descarbonização da União Europeia, que planeja neutralizar suas emissões de carbono até 2050, com o H2V desempenhando um papel central nesse esforço.⁶⁴

A certificação do H2V é baseada no cálculo do percentual de energia limpa utilizado em sua produção, seja ela solar, eólica, hidráulica ou nuclear. Nesse cenário, a CCEE busca obter a validação de seu esquema de certificação junto à União Europeia, permitindo que o H2V brasileiro receba um selo reconhecido internacionalmente, facilitando sua exportação o mercado europeu.

Contudo, o alinhamento com o mercado europeu ainda não foi plenamente alcançado devido a lacunas regulatórias tanto na União Europeia quanto no Brasil. Enquanto o Brasil trabalha na consolidação de seu marco regulatório para o hidrogênio, a União Europeia ainda enfrenta desafios para definir critérios claros e unificados para a importação de H2V, especialmente no que se refere aos limites de emissões de CO₂ permitidos ao longo do ciclo de vida do hidrogênio.

5. CONCLUSÃO

O hidrogênio, especialmente em suas formas de baixo carbono e renovável, representa uma das tecnologias mais promissoras para a transição energética global, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a descarbonização de setores de difícil mitigação. No entanto, a adoção em larga escala dessa fonte de energia

⁶³ Mais de 40 projetos buscam certificação para hidrogênio verde no Brasil. 2024. Disponível em: <https://www.brasilagro.com.br/conteudo/mais-de-40-projetos-buscam-certificacao-para-hidrogenio-verde-no-brasil.html#:~:text=No%20Brasil%2C%20cerca%20de%2050,cada%20para%20produzir%20o%20H2V>. Acesso em: 25. Nov. 2024.

⁶⁴ CANZIAN, Fernando. **Mais de 40 projetos buscam certificação para hidrogênio verde no Brasil**. Jornal de Brasília: 10 abr. 2024. Disponível em: <https://jornaldebrasilia.com.br/noticias/economia/mais-de-40-projetos-buscam-certificacao-para-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acessado em: 25 nov. 2024.

ainda enfrenta inúmeros desafios, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento de uma base regulatória sólida e uniforme, tanto no Brasil quanto no mercado internacional.

No caso do Brasil, embora tenha sido sancionada a Lei nº 14.948/2024, que instituiu o marco legal do hidrogênio de baixo carbono, ainda se carece de regulamentação específica que operacionalize os dispositivos previstos na lei. É imperativo que sejam nomeados os atores institucionais responsáveis pela fiscalização e execução das diretrizes da política nacional de hidrogênio e que seja instituído o decreto regulamentador, estabelecendo critérios claros para a produção, armazenamento, transporte e comercialização do hidrogênio no território nacional. Somente com essa regulamentação será possível criar um ambiente jurídico estável, capaz de atrair investidores e alinhar o Brasil às melhores práticas internacionais.

Além disso, para viabilizar a certificação do hidrogênio brasileiro junto ao mercado europeu, que possui rigorosos padrões ambientais, é necessário que a União Europeia também avance na consolidação de uma regulamentação robusta e uniforme para o hidrogênio importado. Essa harmonização regulatória é fundamental para que o hidrogênio produzido no Brasil, reconhecidamente competitivo devido à abundância de recursos renováveis, seja aceito nos mercados internacionais sem barreiras comerciais.

Uma questão central nesse diálogo é a definição dos limites de emissões de dióxido de carbono (CO₂) por quilograma de hidrogênio produzido. Enquanto o Brasil, com base em suas peculiaridades tecnológicas e climáticas, adota limites específicos, a União Europeia segue critérios mais restritivos, que refletem suas próprias condições energéticas e regulamentações ambientais. Esse desalinhamento exige a abertura de negociações bilaterais para harmonizar os critérios e evitar que tais divergências comprometam a competitividade do hidrogênio brasileiro no mercado europeu.

Por fim, é importante reconhecer que, independentemente dos parâmetros regulatórios estabelecidos pelos governos, a decisão final sobre os volumes aceitáveis de emissões de CO₂ por quilograma de hidrogênio será amplamente influenciada pelo mercado voluntário. Nesse cenário, o papel do consumidor é determinante, pois ele será o responsável por exigir padrões de sustentabilidade e influenciar diretamente a aceitação ou rejeição do hidrogênio no comércio global. Assim, cabe ao Brasil não apenas estabelecer marcos regulatórios sólidos, mas também investir em mecanismos de certificação que assegurem transparência e rastreabilidade ao longo

de toda a cadeia de valor, fortalecendo a confiança do mercado internacional na sustentabilidade do hidrogênio nacional.

Dessa forma, o sucesso do hidrogênio como vetor energético dependerá de um esforço coletivo, que inclui o fortalecimento da regulação, a cooperação internacional e o alinhamento às demandas do mercado. O Brasil, com sua matriz energética predominantemente renovável e um vasto potencial de produção, tem uma oportunidade única de se posicionar como líder global nesse setor, desde que supere os desafios regulatórios e tecnológicos que ainda persistem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2019**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 25 nov. 2024.

NOVAIS, Stéfano Araújo. **Gases do efeito estufa**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/gases-efeito-estufa.htm>. Acesso em 25 de novembro de 2024.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Gases de Efeito Estufa – GEE**. 23 jul. 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/gases-de-efeito-estufa-gee/#:~:text=Os%20principais%20Gases%20de%20efeito,para%20o%20efeito%20estufa%3AA%20os>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Acordo de Paris**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MEINSHAUSEN, M. et al. **Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C**. *Nature*, v. 458, n. 7242, p. 1158–1162, 2009.

MCGLADE, C.; EKINS, P. **The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C**. *Nature*, v. 517, n. 7533, 2015.

GONZÁLEZ, Carlos Germán Meza. **Transição energética global e desenvolvimento sustentável: limites e possibilidades no capitalismo contemporâneo**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-03102018-100309/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

DA SILVEIRA, Caroline Soares; DE OLIVEIRA, Letícia. **Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento.** Novos Cadernos NAEA, [S.l.], v. 24, n. 3, dez. 2021. ISSN 2179-7536. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/9354>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

IBP. **Mapa dos principais gasodutos da Rússia para Europa.** Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/mapa-dos-principais-gasodutos-da-russia-para-europa/#:~:text=A%20R%C3%A9sia%20%C3%A9maior,para%20Europa%20passam%20pela%20Ucr%C3%A2nia>. Acesso em: 25 nov. 2024.

Comissão Europeia. **REPowerEU: política energética nos planos de recuperação e resiliência dos países da EU.** Conselho da Europa: 11 jan. 2024. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/eu-recovery-plan/repowereu/#:~:text=A%20Comiss%C3%A3o%20apresentou%20o%20plano,um%20sistema%20energ%C3%A9tico%20mais%20resiliente>. Acesso em: 25 nov. 2024.

VIDAL, Bruno Galvão Ana Carolina. **A atualização da Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde da Alemanha.** JOTA Jornalismo. Disponível em: <<https://www.jota.info/opiniao-e-analise/colunas/regula-euro/a-atualizacao-da-estrategia-nacional-do-hidrogenio-verde-da-alemanha>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

DYNIEWICZ, L. **Alemanha financia usinas de Hidrogênio Verde no Brasil.** Disponível em <https://www.abrema.org.br/2024/03/12/alemanha-financia-usinas-de-hidrogenio-verde-no-brasil/#:~:text=Para%20cumprir%20a%20meta%2C%20a,viabilizar%20o%20mercado%20de%20hidrog%C3%A3o>. Acesso em: 25 nov. 2024.

WELLE, Deutsche. **Hidrogênio verde promete “turbinar” parceria entre Brasil e Alemanha.** Disponível em: <<https://www.novacana.com/noticias/hidrogenio-verde-promete-turbinar-parceria-brasil-alemanha-060223>>.

BRASIL. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Versão 1.1.**, Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2016. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/08/NDC-1.1-Brasil-21-set-2016-portugues.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRASIL. **Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) para o Acordo de Paris no âmbito da UNFCCC – Versão 1.4.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/11/NDC-1.4-Brasil-27-out-2023-portugues.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023.** Rio de Janeiro: EPE, 18 jun. 2024, 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf](#). Acesso em: 25 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Matriz Energética e Elétrica, 2021.**
Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023.** Rio de Janeiro: EPE, 18 jun. 2024, 274 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 25 nov. 2024.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**. Revista Virtual de Química, 14 out. 2014, v. 7, n. 1, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150008. Disponível em: <https://rvq-sub.sbrq.org.br/index.php/rvq/article/view/664>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRASIL. Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 08 out. 2024.

PETROBRAS. Programa de captura de carbono (CCUS) da Petrobras é o maior do mundo em volume. 11 nov. 2024. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/transicao-energetica/ccus>. Acesso em: 25 nov. 2024.

EY. Armazenamento de Carbono: oportunidades de mercado. Disponível em: https://www.ey.com/pt_br/insights/climate-change-sustainability-services/armazenamento-de-carbono-oportunidades-de-mercado#:~:text=Os%20desafios%20para%20a%20implementa%C3%A7%C3%A3o,para%20licenciamento%20ambiental%20de. Acesso em: 25 nov. 2024.

RODRIGUES, Robson Pereira. SOUZA, José Eduardo Silva Souza. TAMBOR, José Humberto Machado. **As células de combustível de hidrogênio: suas aplicações no sistema energético global em equilíbrio com o meio ambiente.** 10 out. 2019. Disponível em: https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/607/pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

ANDRADE, T.N. DE; LORENZI, B.R.; **Política energética e agentes científicos: o caso das pesquisas em células a combustível no Brasil.** Revista Sociedade e Estado – Set./Dez. 2015, Vol. 30, nº. 3.

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. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/viewFile/12746/10175>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BEZERRA, Francisco Diniz. **Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 212, dez. 2021. Caderno Setorial ETENE. DOI: s1dspp01.dmz.bnB:8443/s482-dspace/handle/123456789/1109.

OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do Hidrogênio no Brasil. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA,** ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2781>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 11 de julho de 2024.** Institui o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2) e dispõe sobre medidas de incentivo à produção e comercialização de hidrogênio de baixo carbono. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 11 jul. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 25 nov. 2024.

AIEX, Rodolfo; GEDRA, Ricardo. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.** Apresentação Powerpoint, 14 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/apresentacoes/15a-reuniao-coges-pnh2/20240814-15a-reuniao-coges-pnh2-ccee-2.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **Comissão estabelece regras para o hidrogénio renovável.** Disponível em: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_23_594>. Acesso em: 25 nov. 2024.

IMPIERI, Gabriel Silva. **Marco Legal do Hidrogênio: aumento no limite de emissões ameaça sustentabilidade.** Disponível em: <https://www.jota.info/artigos/marco-legal-do-hidrogenio-aumento-no-limite-de-emissoes-ameaca-sustentabilidade>. Acesso em: 10 nov. 2024.

LINDNER, J. **Senado aumenta limite de emissões de carbono em projeto de Hidrogênio Verde para contemplar etanol.** Disponível em: <https://valor.globo.com/politica/noticia/2024/07/04/senado-aumenta-limite-da-emissao-de-carbono-no-pl-do-hidrogenio-verde-para-contemplar-etanol.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2024.

WWF. **Rotas para produção de hidrogênio sustentável no Brasil: análise ambiental e econômica.** Disponível em: https://wwfbrnew.awsassets.panda.org/downloads/factsheet_hidrogeniobaixocarbono_final.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.990, de 14 de novembro de 2024.** Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Carbono e dispõe sobre outras providências. Diário Oficial da União: Brasília,

DF, 14 nov. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14990.htm. Acesso em: 25 nov. 2024.

AIEX, Rodolfo; GEDRA, Ricardo. **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. Apresentação Powerpoint, 14 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/apresentacoes/15a-reuniao-coges-pnh2/20240814-15a-reuniao-coges-pnh2-ccee-2.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CHIAPPINI, Gabriel. **Brasil já tem onze projetos de hidrogênio com estudos de conexão à rede elétrica**. Eixos: 12 set. 2024. Disponível em: <https://eixos.com.br/hidrogenio/brasil-ja-tem-onze-projetos-de-hidrogenio-com-estudos-de-conexao-a-rede-eletrica/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRANCO, Luizella Giardino Barbosa. **Biocombustíveis, governança global e comércio internacional: Rumo a um novo paradigma energético?** 2012. 281 f. - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. DOI: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/9255>.

GABRIELLI, José Sérgio. TOKARSKI, André Pereira R. **Estudos regulatórios para a certificação do H2V no Brasil**. Revista Princípios, n. 170, maio/ago. 2024. Disponível em: <https://revistaprincipios.emnuvens.com.br/principios/article/view/485/200>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CERTIFHY. **CertifHy-SD carbon footprint calculation**. [S.l.]: February 14, 2023. Disponível em: <www.certifhy.eu/wp-content/uploads/2023/03/CertifHy_Carbon-footprint-calculation_220214.pdf>. Acesso em: 09 maio 2023.

FERNANDES, Gláucia; AZEVEDO, João Henrique de; AYELLO, Matheus; GONÇALVES, Felipe. **Panorama dos desafios do H2V no Brasil**. *Coluna Opinião*, Fundação Getúlio Vargas (FGV Energia), jan. 2023. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_artigo_hidrogenio_verde_matriz.pdf. Acesso em: 25 nov. 2024.

CANZIAN, Fernando. **Mais de 40 projetos buscam certificação para hidrogênio verde no Brasil**. Jornal de Brasília: 10 abr. 2024. Disponível em: <https://jornaldebrasilia.com.br/noticias/economia/mais-de-40-projetos-buscam-certificacao-para-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acessado em: 25 nov. 2024.