

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLÁVIA ANGELICA ABRANTES RUSSO

**PERSPECTIVAS DA INSERÇÃO DO HIDROGÊNIO RENOVÁVEL DE BIOMASSA
NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

São Paulo
2025

FLÁVIA ANGELICA ABRANTES RUSSO

PERSPECTIVAS DA INSERÇÃO DO HIDROGÊNIO RENOVÁVEL DE BIOMASSA
NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Artigo apresentado à conclusão do curso de Pós-graduação em MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Eduardo Maiorano

São Paulo

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente do Departamento de Economia Rural e Extensão da Universidade Federal do Paraná, especialmente ao Professor Doutor em Economia e Política Florestal Anadalvo Juazeiro dos Santos pelo aceite de meu pedido de ingresso neste curso de Especialização, ao Professor Doutor em Economia e Política Florestal Romano Timofeiczky Junior pela disponibilidade em me orientar na retomada de estudos em Economia ao longo deste curso, assim como ao Professor Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Thiago José da Luz, ao Professor Doutor em Direito Econômico e Socioambiental José Osório do Nascimento Neto e ao Professor Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais Dhyogo Miléo Taher, por sempre se fazerem presentes na orientação e esclarecimentos em suas áreas de conhecimento.

Agradeço ao Professor Doutor em Engenharia Química Alfredo Eduardo Maiorano pela orientação técnica e apoio ímpar no decorrer de todo o processo de elaboração deste artigo.

Agradeço a todos os colegas neste curso de Especialização na Universidade Federal do Paraná pelo apoio, especialmente à arquiteta e urbanista Maria Clara de Souza Amarante, aos engenheiros de energia Jean Marcos Dalle Laste e Matheus Pussaignoli de Paula, e à engenheira ambiental e sanitarista Monique Kelly Clemente Maciel pela amizade e estudos em grupo ao longo do curso.

Agradeço a toda equipe do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias pelo apoio, especialmente à graduanda em Licenciatura em Pedagogia Laura Faria Matias pela amizade.

Agradeço aos engenheiros agrônomos Radomir Tomitch, José Luis dos Santos Ferreira e Saullo Sandro de Campos Pereira, ao Mestre em Planejamento Energético Gabriel Alexandre Lima Cardoso, ao Doutor em Físico-Química Alessandro Ranulfo Lima Nery e ao geólogo e advogado Silvano de Jesus Clarimundo, colegas em diferentes etapas de minha vida profissional e acadêmica, que me apoiaram e incentivaram, cada um à sua maneira, acerca de temas em análise e pesquisa no setor energético.

RESUMO

A descarbonização das atividades econômicas no Brasil se encontra num cenário favorável para se investir no desenvolvimento de projetos e processos de produção de hidrogênio. O Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono consolida a estratégia brasileira de valorização de cadeias produtivas locais na inserção de hidrogênio renovável a partir de biomassa na matriz energética de nosso País e em nível global. No Estado de São Paulo, a estratégia para o desenvolvimento da economia da descarbonização e do hidrogênio de baixa emissão de carbono tem seguido, desde julho de 2021, os três pilares apresentados pela Proposta de Diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio, com ações, em nível estadual e interestadual, em políticas públicas, tecnologia e uma aproximação ao mercado, ainda que a estruturação do ambiente regulatório, em nível estadual, tenha começado a se fortalecer a partir da sanção da Lei Federal 14.948/2024 para o mercado nascente do hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Palavras-chave: hidrogênio de baixa emissão de carbono; biomassa; Brasil; cadeias produtivas locais; Marco Legal.

ABSTRACT

The decarbonization of economic activities in Brazil is a favorable scenario for investing in the development of hydrogen production projects and processes. The Legal Framework for Low-Carbon Hydrogen consolidates Brazil's strategy of valuing local production chains in the insertion of renewable hydrogen from biomass into our country's energy matrix and at a global level. In the State of São Paulo the strategy for the development of the decarbonization economy and low-carbon hydrogen has followed, since July 2021, the three pillars presented by the Proposal for Guidelines of the National Hydrogen Program, with actions, at state and interstate level, in public policies, technology and an approach to the market, although the structuring of the regulatory environment, at state level, has begun to reinforce since the sanction of Federal Law 14.948/2024 for the emerging low-carbon hydrogen market.

Keywords: low-carbon hydrogen; biomass; Brazil; local production chains; Legal Framework.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. OBJETIVO GERAL.....	7
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
3. DESENVOLVIMENTO.....	7
3.1. EVOLUÇÃO DO PAPEL DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA.....	7
3.2. MARCO LEGAL E AMBIENTE REGULATÓRIO BRASILEIRO DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO.....	10
3.3. FORTALECIMENTO DE ROTAS TECNOLÓGICAS DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO A PARTIR DE BIOMASSA (RESIDUAL) NO BRASIL.....	16
4. CONCLUSÕES.....	18
REFERÊNCIAS.....	20

1. INTRODUÇÃO

Com o fim político da Guerra Fria, no início dos anos 1990, a percepção do impacto econômico negativo de efeitos adversos de mudanças climáticas no mundo se intensifica, e, com o Acordo de Paris (UNITED NATIONS, 2015), o compromisso das nações com planos para descarbonizar a economia em nível global busca a efetividade de metas a médio e longo prazos.

Considerando-se o ciclo de desenvolvimento de projetos de inovação tecnológica, sob a ótica de viabilidade econômica, há estudos consistentes sobre a utilização de hidrogênio renovável a médio e longo prazos que indicam sua sustentabilidade (HYDROGEN COUNCIL, 2020).

O hidrogênio renovável aumenta a confiabilidade dos sistemas de energia, se utilizado no seu armazenamento (HYDROGEN COUNCIL, 2020), porque assegura maior fator de capacidade, quando integrado às matrizes não firmes e não despacháveis solar e eólica, aumenta a resiliência dos sistemas, e facilita a viabilidade técnica de geração distribuída (GD), em se tratando do hidrogênio obtido a partir de biomassa residual ou de biocombustíveis, conhecido no mercado como hidrogênio musgo¹, e do hidrogênio verde².

Na descarbonização o hidrogênio tem papel chave na matriz energética na operação de transportes, indústria, edificações, quando na geração de energia elétrica e térmica, além de, como uma matéria-prima, imprimir baixa pegada de carbono em cadeias de produção.

¹ A distinção por cores de hidrogênio se deve às diferenças na origem de sua produção. Embora atualmente essa distinção esteja associada principalmente ao mercado de hidrogênio, sendo a nomenclatura por cores reconhecida como um jargão de mercado, ela ainda pode ser encontrada em relatórios técnico-econômicos em nível mundial.

Ao hidrogênio produzido a partir de biomassa residual ou de biocombustíveis, a cor de referência é o musgo, considerado com variações do tom de verde desde o amarronzado, incluindo alterações significativas de uso do solo, ao esverdeado, com carbono negativo ou nulo, e gerado por meio de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica. Neste caso, além da classificação por fonte de produção, há a distinção por rota tecnológica, embora a IEA (*International Energy Agency*, tradução livre Agência Internacional de Energia) questione esta distinção adicional e, ainda assim, apoie a proposição de que haja outras cores para rotas tecnológicas diferentes e à parte das cores utilizadas como jargão no mercado, como verde, azul, marrom e cinza.

O hidrogênio marrom, ou preto, é o produzido a partir de carvão mineral sem CCUS (captura, utilização e sequestro de carbono); o hidrogênio cinza é o produzido de gás natural sem CCUS; o hidrogênio azul é o produzido principalmente a partir de gás natural e passando por CCUS, podendo essa denominação ser aplicada à geração de hidrogênio a partir de outros combustíveis fósseis com CCUS.

² O hidrogênio verde é o hidrogênio gerado por meio de eletrólise de água a partir de fontes de energia renováveis.

A descarbonização das atividades econômicas no Brasil se encontra num cenário favorável a se investir no desenvolvimento de projetos e processos de produção de hidrogênio (EPE, 2023).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente artigo é apresentar e analisar o contexto e as perspectivas de inserção do hidrogênio renovável de biomassa na matriz energética brasileira.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como pontos estruturantes do objetivo geral, os objetivos específicos são:

- apresentar a evolução do papel da biomassa como fonte de energia no mundo;
- analisar o contexto de regulamentação e a perspectiva do ambiente regulatório brasileiro do hidrogênio de baixa emissão de carbono; e
- apresentar o fortalecimento do cenário brasileiro para rotas tecnológicas de obtenção de hidrogênio de baixo carbono a partir de biomassa (residual).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. EVOLUÇÃO DO PAPEL DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA

A partir de meados do século XIX³, com a consolidação da sociedade industrial na Europa e o crescimento populacional em suas cidades chave (DHM, 2007), com sua reurbanização ligada a conceitos de saúde pública, o significado de biomassa como fonte de energia passa a exercer marcos de destaque econômico, amparado pelo desenvolvimento tecnológico.

Em 1840, o primeiro gaseificador de biomassa foi construído na França. Em 1860, a madeira foi utilizada como fonte de energia na operação da locomotiva a vapor de Robert Stephenson, sendo este um fato marcante para a história da biomassa no sentido de impulsionar o desenvolvimento. Em 1896, Henry Ford, em sua pequena loja de Detroit, criou o quadriciclo *Ford*, que era movido exclusivamente a álcool, um combustível derivado da fermentação de açúcares de biomassa, sendo milho nos EUA⁴.

O Brasil tem uma ligação especial com o biocombustível etanol, derivado, neste caso, de cana-de-açúcar, sendo sua primeira medida de regulamentação por meio do Decreto 22.789, de 01/06/1933, com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA).

A partir de 1990, a utilização de fontes de energias renováveis, como a biomassa, se intensifica em nível mundial devido à percepção de efeitos climáticos adversos.

A comunidade de pesquisa e desenvolvimento em biomassa se iniciou há mais de 20 anos, com pouco mais do que uma ideia de como e onde a biomassa poderia desempenhar um papel na descarbonização do sistema de energia, com impacto na economia (EUBCE, 2023).

A partir de 2014 e após o acordo de Paris, em 2015, tem ocorrido um esforço global em descarbonização como um elemento-chave para se mitigar os impactos negativos da mudança climática.

Apesar de a descarbonização parecer se constituir como a solução mais efetiva contra o progresso de desequilíbrios climáticos, fontes sustentáveis baseadas em carbono são necessárias à indústria química, já que o carbono está presente na estrutura de muitos compostos químicos. Assim, a indústria química tem avançado em pesquisa em fontes sustentáveis estruturadas em carbono, incluindo

³ O século XIX, pelo viés histórico europeu, se estende da Revolução Francesa, em 1789, até o fim da I Guerra Mundial, em 1918.

⁴ Informação coletada de linhas do tempo em: <https://www.timetoast.com/timelines/biomass-energy>. Acesso em: 27 maio 2023.

matérias-primas e, a depender de suas aplicações, novos materiais, com qualidades biodegradáveis e biocompostáveis, podendo, neste caso, auxiliar na restauração de carbono no solo (DE BARI, 2023).

Para além de pesquisa e desenvolvimento em fontes sustentáveis baseadas em carbono, com qualidades de contribuição a restaurar carbono no solo, bem como em fontes sustentáveis para descarbonizar a economia, atualmente a biomassa (residual) tem apresentado relevância gradativa em pesquisas visando à transição energética porque, passando a ser um resíduo reaproveitado num processo de produção, transforma-se de um passivo ambiental para um ativo. Adicionalmente, nos casos de culturas energéticas, como milho e, no Brasil, principalmente a cana-de-açúcar, resíduos reaproveitados dentro das próprias cadeias de produção agrícolas e energéticas influenciam na diminuição dos custos produtivos, com consequente incremento de rentabilidade.

Os eventos de Conferência e Exibição Europeia de Biomassa (*European Biomass Conference and Exhibition*), realizados em junho de 2023 em Bolonha, na Itália, em sua 31ª edição, e em junho de 2024 em Marselha, na França, em sua 32ª edição, levaram ao público os seguintes tópicos: a) fontes sustentáveis para descarbonização da economia; b) sustentabilidade, impactos e políticas; c) biomassa, produtos baseados em biomassa e integração de bioenergia; d) conversão de biomassa para bioenergia; e) conversão de biomassa para carreadores intermediários de bioenergia e biocombustíveis sustentáveis; f) conversão de biomassa para produtos baseados em biomassa; e g) panorama da indústria (EUBCE, 2023).

Na 31ª edição dessa conferência, Mirjam Roeder⁵, pesquisadora na Universidade de Aston, na Inglaterra, e líder do projeto *Global Bioenergy Stories* (Histórias de Bioenergia em Nível Global), apresentou um trabalho sobre aceitabilidade pública e socioeconômica na bioeconomia e bioenergia, assim como a pesquisadora brasileira Karen Mascarenhas, diretora de recursos humanos e comunicação institucional no Centro de Pesquisas para Inovação em Gases de Efeito Estufa (GEE), com uma perspectiva de percepção social sobre a bioenergia

⁵ O projeto “Histórias de Bioenergia em Nível Global” (*Global Bioenergy Stories*) oferece uma plataforma para jovens do mundo todo para trabalharem com pesquisadores em bioenergia e artistas locais com o intuito de se discutir e desenvolver ideias sobre uso de energia sustentável e futuro da energia. A página do projeto está disponível em: <https://www.supergen-bioenergy.net/global-bioenergy-stories/>. Acesso em: 30 maio 2023.

na transição energética no Brasil, sinalizando que, para além de aspectos técnicos, econômicos e jurídicos que envolvem a transição energética, é necessário considerar os aspectos e impactos potenciais psicossociais dessa transição para poder realizá-la num modo efetivamente sustentável (EUBCE, 2023).

No tópico conversão de biomassa para bioenergia da referida Conferência, houve um destaque na frequência de trabalhos sobre biomassa de segunda e terceira gerações, indicando uma tendência para demanda de desenvolvimento e de otimização de processos de conversão energética de alta tecnologia.

No que tange à otimização de processos em biomassa de primeira e principalmente de segunda geração⁶, observa-se que as análises e discussões de resultados obtidos em pesquisas levam em conta não apenas o aspecto e impacto técnico do processo, mas igualmente um desenho dos desafios no envolvimento de partes interessadas, entre as quais investidores, empresas privadas e responsáveis por políticas públicas, para se desenvolver a comercialização do produto, sendo esta a abordagem de uma das pesquisas que trata da atualização do panorama de produção de hidrogênio a partir de pirólise de diferentes tipos de biomassa lignocelulósica, processo de segunda geração de bio-hidrogênio (FAROOQ *et al*, 2021).

Assim, observa-se atualmente, em grupos de pesquisas de regiões distintas no mundo, que tem sido um resultado de estudo a necessidade de aproximação entre pesquisadores e gestores públicos e do setor privado, procurando realizar predição de comportamento psicossocial e econômico no engajamento de todas as partes interessadas, que estão além do trabalho de pesquisa dentro das universidades, para que a aplicação da tecnologia de bio-hidrogênio em desenvolvimento seja bem-sucedida.

3.2. MARCO LEGAL E AMBIENTE REGULATÓRIO BRASILEIRO DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO

A partir da Agenda 2030 e dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável

⁶ As gerações, quando aplicadas a tipos de biomassa, estão relacionadas à tecnologia envolvida em sua produção. A de primeira geração é de baixa tecnologia, com o aproveitamento de resíduos de cultivos de soja e de cana-de-açúcar. A de segunda geração é de alta tecnologia, com o aproveitamento de resíduos florestais e agrícolas, que contêm lignina.

(ODS)⁷ estabelecidos em 2015, com o compromisso de se alcançarem resultados de impacto, isto é, que alterem a realidade de hoje a caminho da efetividade e sustentabilidade a longo prazo no cenário que abrange a cadeia produtiva de energia derivada de fontes renováveis no mundo, o Poder Público de cada nação estabelece planos, com suas ações, e programas, com suas metas e seus indicadores de desempenho, visando ao aumento da participação de renováveis na matriz energética global.

No período de 2020 a 2023, o ODS 9, “Indústria, Inovação e Infraestrutura”, apresentou avanço em sua meta de aumento de investimento financeiro em pesquisa e desenvolvimento em nível global, impactando positivamente o caminho para a maturidade tecnológica de processos de produção e sistemas de energia à base de energia renovável (UNITED NATIONS, 2023).

O relatório do Programa de Transição Energética, publicado em fevereiro de 2023 pelo Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI)⁸, sinaliza que o cenário brasileiro de maior articulação entre os formuladores de políticas públicas nas áreas ambiental, energética e econômica, se comparado ao de outras nações, fortalece a construção de ações no sentido de se atingirem as metas estipuladas pelos acordos globais.

A discussão sobre a produção de hidrogênio renovável tem sido larga e intensa, porque, se por um lado, tem se mostrado uma fonte de energia com potencial de redução de custos, considerando CAPEX⁹ e OPEX¹⁰ (HYDROGEN COUNCIL, 2020), com indicação de tendência de queda de 60% nos custos de produção de 2020 a 2030 (HYDROGEN COUNCIL, 2021), por outro, a efetividade de metas a serem realizadas exige que se formulem, implementem e avaliem ações por meio de agenda, em níveis mundial e nacional e, no caso do Brasil, com desdobramento para unidades da federação, podendo incluir o nível municipal.

⁷ Objetivos, em estrutura organizacional, são em nível estratégico e direcionados para onde se criar o compromisso de impactar.

⁸ “A partir do segundo semestre de 2020, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e o Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI) desenvolveram o Programa de Transição Energética. O objetivo do projeto foi criar um fórum de partes interessadas para disseminar e discutir cenários de transição energética de longo prazo no Brasil e desenvolver cenários de energia de longo prazo com base em um fórum independente e neutro de partes interessadas.” Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/programa-de-transicao-energetica>. Acesso em: 19 jan. 2025.

⁹ CAPEX: sigla em inglês para *Capital Expenditure*, que pode ser traduzida como despesas de capital.

¹⁰ OPEX: sigla em inglês para *Operational Expenditure*, que pode ser traduzida como despesas operacionais.

O Plano Nacional de Hidrogênio, de 2023, para o período 2023 – 2025, publicado em agosto de 2023 pelo Ministério de Minas e Energia prevê no Brasil 30 bilhões de dólares em projetos de hidrogênio renovável e um potencial de geração de 1,8 gigatoneladas de hidrogênio por ano, além de ter estabelecido os seguintes objetivos: para 2025, disseminar plantas piloto de hidrogênio de baixa emissão de carbono em todas as regiões do País; para 2030, consolidar o Brasil como o mais competitivo produtor da molécula de hidrogênio no mundo; e, para 2035, consolidar “hubs” de hidrogênio de baixa emissão de carbono (BRASIL, 2023).

O Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, que vinha tramitando desde 2023 pelo Projeto de Lei (PL) 5.751/2023, na Câmara dos Deputados, e por meio do PL 2.308/2023, no Senado, foi sancionado pela Lei Federal 14.948, em 2 agosto de 2024. Ele reforça os caminhos para que os objetivos do Plano de Trabalho Trienal (2023-2025), do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), sejam estruturadamente detalhados em programas e ações, com a elaboração das peças orçamentárias pelo Executivo.

Ao longo da fase constitutiva do Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, foi consensado que a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) exerça a responsabilidade pela regulação desse mercado, que, por meio deste Marco Legal, se configura sob o regime jurídico de autorização de produção, de atividades relacionadas e de transferência (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2023; SENADO FEDERAL, 2023).

Uma possível interpretação da Lei Federal 14.948/2024 quanto ao seu direcionamento de modo verticalizado é uma abertura para a garantia de governança em padrões de qualidade, de operação e de segurança tecnológica da cadeia produtiva do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil no atual cenário, não apenas de desenvolvimento de projetos em inovação tecnológica como de pesquisas crescentes nesta área, perfazendo uma consideração, de modo pragmático, sobre os avanços em maturidade tecnológica intrínsecos a este mercado nascente, com segurança jurídica.

O Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixo Carbono para se estabelecer agenda, de modo sistêmico e governamental, sobre responsabilidades por políticas públicas, com os seguintes princípios, em sua Seção I, Artigo 2º:

Art. 2º Fica instituída a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, com os seguintes princípios:

- I - respeito à neutralidade tecnológica na definição de incentivos para produção e usos do hidrogênio de baixa emissão de carbono;
- II - inserção competitiva do hidrogênio de baixa emissão de carbono na matriz energética brasileira para sua descarbonização;
- III - previsibilidade na formulação de regulamentos e na concessão de incentivos para expansão do mercado;
- IV - aproveitamento racional da infraestrutura existente dedicada ao suprimento de energéticos; e
- V - fomento à pesquisa e desenvolvimento do uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono (BRASIL, 2024).

Analisando os princípios dispostos na Lei Federal 14.948/2024, a Política Nacional do Hidrogênio de Baixo Carbono fortalece a estratégia para formulação de políticas públicas nos seguintes aspectos:

- pela neutralidade tecnológica:
 - a inclusão da biomassa como fonte de hidrogênio de baixo carbono, decorrente da definição de hidrogênio de baixa emissão de carbono por nível de emissão de gás carbônico no processo de produção de hidrogênio, e não pela fonte a partir da qual o hidrogênio é obtido;
- pela inserção competitiva:
 - a ausência de incremento na tarifa de uso do sistema de utilização e distribuição (TUSD) pelo consumidor, isto é, eventuais e possíveis subsídios devem ser arcados pelo contribuinte, e não pelo consumidor; e
 - a ausência de uso de recursos previstos para investimentos¹¹ na Itaipu e no Pré-Sal; e
- pela racionalização no aproveitamento da infraestrutura existente:
 - o fomento a iniciativas, ações e projetos de produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono tanto para a exportação quanto a utilização em cadeias produtivas que agregam valor no território brasileiro.

Em decorrência da adesão definitiva do Estado de São Paulo às campanhas mundiais “Race to Zero” e “Race to Resilience”, por meio do Decreto Estadual 65.881, de 20 de julho de 2021, estabeleceu-se o objetivo de se elaborar e implantar

¹¹ Informação sobre a não utilização dos recursos citados coletada de Ulhôa Canto, Rezende e Guerra Advogados, 2024.

um plano de ação climática estadual até 2050 (SÃO PAULO, 2021).

No sentido de construção de um ambiente regulatório propositivo, com foco em descarbonização, no Estado de São Paulo, a Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística do Estado de São Paulo (SEMIL) vem, desde 2023, coordenando ações com o intuito de proporcionar governança e previsibilidade aos objetivos vinculados à descarbonização, entre as quais, a reativação (SÃO PAULO, 2023) do Conselho Estadual de Política Energética (CEPE)¹², em outubro de 2023, que conta com as Secretarias Estaduais da Casa Civil, da Agricultura e Abastecimento, do Desenvolvimento Econômico, de Ciência, Tecnologia e Inovação e da Fazenda e Planejamento, participando ainda membros da Assembleia Legislativa do Estado e de federações, universidades e institutos de pesquisa estaduais, com notório saber, experiência e representatividade no setor energético, e tendo, como uma das metas, a elaboração do Plano Estadual de Energia 2050¹³.

Aproximando o Poder Público do setor privado e do terceiro setor, a Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico (SDE), por meio da InvestSP¹⁴, paraestatal qualificada como organização social que promove investimentos e competitividade, em parceria com a SEMIL, tem atuado em projetos, atividades e ações para apoiar o Poder Público na definição de políticas para neutralizar as emissões de carbono até 2050.

Com o propósito de capacitação tecnológica, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), entidade vinculada à Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Inovação (SCIT), realizou, de 2022 a 2024, um projeto interno multidisciplinar, envolvendo dois laboratórios, o Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética e o Laboratório de Biotecnologia Industrial, para a pesquisa e desenvolvimento de rotas tecnológicas de produção de hidrogênio de emissão de baixo carbono, entre as quais duas rotas caracterizadas pelo enfoque em produção de hidrogênio a partir de biomassa: a rota biotecnológica a partir da fermentação da vinhaça e a rota da reforma a seco do biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (IPT, 2024).

¹² Órgão de caráter consultivo vinculado à Subsecretaria de Energia e Mineração, na SEMIL.

¹³ A proposta é a de que o Plano Estadual de Energia 2050 integre o Plano Estadual de Adaptação e Resiliência Climática (PEARC).

¹⁴ As fontes de financiamento do InvestSP são: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Desenvolve SP – Agência de Desenvolvimento Paulista, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Banco do Povo Paulista (BPP), Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

O Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (Labmater), vinculado ao Departamento de Engenharias e Exatas (DEE) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), também tem realizado pesquisa científica e tecnológica na rota da reforma a seco do biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU)¹⁵, e, em 2024, esse projeto de pesquisa estava na fase de *scale-up*.¹⁶

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) submeteu à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) um projeto para a criação de um Centro de Ciências para o Desenvolvimento de Energias Renováveis e Combustíveis Futuros (CCD-ERCF)¹⁷, que foi aprovado em 2024 para operar por um período de cinco anos.

O CCD-ERCF conta com as áreas de pesquisa e desenvolvimento em hidrogênio de baixa emissão de carbono na seguinte abrangência¹⁸: produção, incluindo a biomassa como fonte de obtenção; armazenamento e transporte; usos e aplicações; e questões regulatórias.

As áreas de pesquisa propostas para o CCD-ERCF estão de acordo com os princípios dispostos na Lei Federal 14.948/2024. Destaca-se o aspecto estratégico na construção de segurança jurídica no mercado de hidrogênio de baixo carbono no Estado de São Paulo pela abrangência do CCD em estudos sobre regulamentação e regulação no setor.

No Estado de São Paulo, a estratégia para o desenvolvimento da economia da descarbonização e do hidrogênio de baixa emissão de carbono tem seguido, desde julho de 2021, os três pilares apresentados pela Proposta de Diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio (BRASIL, 2021), com ações, em nível estadual e interestadual, em políticas públicas, tecnologia e uma aproximação ao mercado, ainda que a estruturação do ambiente regulatório, em nível estadual, tenha começado a se fortalecer a partir da sanção da Lei Federal 14.948/2024 para o mercado nascente do hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Em consonância à Proposta de Diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio, o relatório da *Hydrogen Council*, de 2020, o qual considera o Custo Total

¹⁵ A biomassa (residual) utilizada no projeto é a fração orgânica de resíduos alimentares do restaurante universitário do Campus de Palotina da UFPR.

¹⁶ Informação sobre o projeto coletada de Labmater, 2024.

¹⁷ Participam do aporte de recursos financeiros ao CCD-ERCF a FAPESP, o IPT, a SEMIL e a SCTI (IPESI, 2024).

¹⁸ A instituição sede do CCD-ERCF é o IPT. O CCD-ERCF conta com diversas instituições parceiras, seja no aporte financeiro, seja na contribuição em construção e gestão de conhecimento, entre as quais universidades (no exterior e públicas, no Brasil) e a SEMIL.

de Manutenção (*TCO – Total Cost of Ownership*)¹⁹ no estudo de redução de custos do hidrogênio renovável ao longo dos anos para o futuro, já indicava também a necessidade de ações governamentais, em nível global, para se acelerar a entrada do hidrogênio renovável no mercado. Entre essas ações, estão: o desenvolvimento de estratégias nacionais, a coordenação dos agentes do mercado na captação de oportunidades, a promoção de ambiente regulatório, incluindo padronização técnica, e o investimento em infraestrutura e incentivos.

Nesse sentido, o Brasil, por meio do Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, responde -- de modo sistêmico, programático e governamental, com encaminhamento estruturado para ações no território nacional -- ao compromisso de aumento da participação de renováveis na matriz energética global, como signatário do Acordo de Paris (2015)²⁰.

3.3. FORTALECIMENTO DE ROTAS TECNOLÓGICAS DO HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO A PARTIR DE BIOMASSA (RESIDUAL) NO BRASIL

O princípio da neutralidade tecnológica na definição de incentivos para produção e usos do hidrogênio de baixa emissão de carbono, da Lei Federal 14.948/2024, fortalece a inclusão da biomassa como fonte de obtenção de hidrogênio de baixo carbono.

No Brasil a estimativa de potencial técnico disponível, i.e., de produção de hidrogênio a partir do saldo de recursos energéticos no horizonte de 2050 (normalizado) é de 1,8 gigatoneladas de hidrogênio por ano, sendo 50,5 megatoneladas por ano a partir de biomassa (EPE, 2023). Para além disso, a biomassa residual da cadeia de produção agrícola e energética representa um potencial técnico de produção de hidrogênio estimado de 148 terawatt-hora por ano, a partir de biodigestão de resíduos agropecuários e de utilização de motogeradores (EPE, 2023).

¹⁹ O custo total de manutenção (*TCO - Total Cost of Ownership*) é definido pelos custos totais incorridos por um cliente durante a vida útil de uma aplicação e inclui custos de capital, operacionais e de financiamento (HYDROGEN COUNCIL, 2020). Para saber mais: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>.

²⁰ O Brasil ratificou sua assinatura no Acordo de Paris em 12 de setembro de 2016.

O princípio da racionalização no aproveitamento da infraestrutura existente dedicada ao suprimento de demanda energética, do Marco Legal do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, reforça o fomento a cadeias produtivas que agregam valor no território brasileiro.

Considerando o princípio da neutralidade tecnológica e o da racionalização no aproveitamento da infraestrutura da Lei Federal 14.948/2024, o hidrogênio de baixa emissão de carbono a partir de biomassa (residual) começa a se inserir na matriz energética brasileira com respaldo jurídico, realçando o incentivo à pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) por meio de rotas tecnológicas a partir de resíduos orgânicos mais presentes nas cadeias produtivas brasileiras, como os do setor sucroalcooleiro e agropecuário. Adicionalmente, a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) e de resíduos sólidos industriais não perigosos²¹ representam uma potencial fonte de biomassa na obtenção de hidrogênio de baixo carbono no Brasil.

A rota biotecnológica a partir de fermentação de vinhaça (fermentação escura, sem adição de luz) e a rota tecnológica de reforma a seco do biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) para obtenção de hidrogênio se inserem no atual cenário de regulamentação instituído pela sanção da Lei Federal 14.948/2024.

Pela rota da fermentação escura, as vantagens do processo são: a produção de hidrogênio por 24 horas ao dia, sem dependência de luz; a utilização de diversas fontes de carbono como substrato, entre os quais se inclui a vinhaça; e, por ser um processo anaeróbico, a independência de oxigênio como variável (de processo). Como desafios, apresentam-se como operações e condições de processo a serem estudadas por meio de pesquisa e desenvolvimento: a necessidade de separação do gás metano e do gás carbônico, presentes na mistura da linha de saída do processo; a tendência à termodinâmica do processo ficar desfavorável à medida que os níveis de rendimento na conversão de hidrogênio aumentam; e a ocorrência de níveis de rendimento relativamente baixos na obtenção de hidrogênio (DAS *et al.*, 2008).

A rota biotecnológica a partir de foto-fermentação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos ou industriais (por ex., provenientes da cadeia produtiva de

²¹ Classificação de resíduos entre perigosos (Classe 1) e não perigosos (Classe 2), de acordo com a norma técnica ABNT NBR 10004:2024.

alimentos) tem a vantagem de utilização de um espectro amplo de energia luminosa e a desvantagem de a mistura de gases produzidos conter gás carbônico, que deve ser separado (DAS *et al.*, 2008).

A rota de reforma a seco do biogás da FORSU apresenta como desafios a serem contornados por meio de pesquisa e desenvolvimento: a formação de coque e a desativação por gás sulfídrico. Esta rota tem a vantagem de redução do nível de energia a ser utilizado no processo, se comparado à reforma a vapor.

A ação de PD&I de rotas tecnológicas a partir de biomassa residual da cadeia produtiva sucroalcooleira, fortalecida pelos princípios da neutralidade tecnológica e do aproveitamento racional de infraestrutura, é uma ação de resposta para o princípio, também disposto na Lei Federal 14.948/2024, da inserção competitiva do hidrogênio de baixa emissão de carbono na descarbonização da matriz energética brasileira, porque representa uma redução de custos no processo de produção, para além de outras ações para a entrada competitiva no mercado, como a ausência de incremento na TUSD e a não utilização de recursos previstos para a Itaipu e o Pré-Sal.

4. CONCLUSÕES

O Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono confere governança e segurança jurídica para que o mercado nascente de hidrogênio de baixa emissão de carbono se desenvolva no Brasil. Além disso, a Lei Federal 14.948/2024 consolida a estratégia brasileira de defesa da valorização de cadeias produtivas locais na inserção de hidrogênio de baixa emissão de carbono na matriz energética de nosso País e em nível global.

Em nível estadual, tomando como um exemplo o Estado de São Paulo, a necessidade de se estabelecer a regulamentação no setor energético de hidrogênio de baixo carbono é reconhecida conjuntamente pelo Poder Público, universidades, institutos de pesquisas estaduais, setor privado e terceiro setor.

O incentivo à pesquisa, desenvolvimento e inovação de rotas tecnológicas a partir de resíduos orgânicos mais presentes nas cadeias produtivas brasileiras, como os do setor sucroalcooleiro, ou, ainda, de fração orgânica de resíduos sólidos

urbanos (FORSU) é uma estratégia brasileira para a inserção do hidrogênio renovável de biomassa na descarbonização da matriz energética brasileira, no caminho para cumprimento do objetivo 2030, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, de consolidar o Brasil como o mais competitivo produtor da molécula de hidrogênio no mundo.

Um fator que vem sendo considerado na inserção de hidrogênio renovável de biomassa na matriz energética, seja a brasileira ou a global, é a sua aceitabilidade pública e socioeconômica, incluindo a abordagem de percepção de impacto potencial psicossocial para uma efetiva transição energética sustentável.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Decreto 22.789, de 1º de junho de 1933**. Cria o Instituto do Açúcar e do Alcool e dá outras providências. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-22789-1-junho-1933-503228-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 8 out. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono, dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono, institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro), cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), e altera as Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14948-2-agosto-2024-796030-publicacaooriginal-172539-pl.html>. Acesso em: 17 ago. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)**. 1ª edição. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpnh2.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)** - Proposta de Diretrizes. 1ª edição. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatríodiretrizes.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2023.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei (PL) 5.751/2023**. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2378504&filename=Avulso%20PL%205751/2023. Acesso em: 9 fev. 2025.

CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI) - NÚCLEO ENERGIA. **Programa de Transição Energética** - Relatório Final - Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-726/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital_.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA (CNPE). **Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021**. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia no País. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-resolucoes-sobre-governanca-do-programa-nacional-do-hidrogenio-e-exploracao-de-petroleo/resolucao2cnpe.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. **Advances in biological hydrogen production processes**. International Journal of Energy, 33, 2008, 6046-6057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.098>.

DE BARI, ISABELLA. **What role can biomass play in the technologies mix to decarbonize the future?** 31st European Biomass Conference and Exhibition. Bologna, Italy, 2023. Disponível em: http://www.etaflorence.it/newsletter_templates/20th_HTML_Newsletter_2023.html. Acesso em: 30 maio 2023.

DEUTSCHES HISTORISCHES MUSEUM (DHM). **Das lange 19. Jahrhundert (1789 – 1918)**. Berlin: DHM-Museumspädagogik, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Rotas Tecnológicas e Potencial de Produção de Hidrogênio de Baixo Carbono no Brasil, c2023**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-758/H2_Pipeline%20\(1\).pdf#search=hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-758/H2_Pipeline%20(1).pdf#search=hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono). Acesso em: 10 jan. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio - Nota Técnica - No EPE-DEA-NT-003/2021 rev01, 14 de junho de 2021**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidroge%CC%82nio_rev01%20(1).pdf). Acesso em: 30 jan. 2024.

EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE AND EXHIBITION (EUBCE). **Conference Programme, 5 to 8 June 2023**. Disponível em: https://www.eubce.com/wp-content/uploads/2023/06/programma_EUBCE2023.pdf. Acesso em: 27 maio 2023.

FAROOQ, W.; CHEN, W.-H.; SHAHBAZ, M.; NAVQI, S. R.; ALI, I.; AL-ANSARI, T.; AMIN, N. A. S. **Current status of biohydrogen production from lignocellulosic biomass, technical challenges and commercial potential through pyrolysis process**. Elsevier, Volume 226, 1st July 2021, 120433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120433>.

HYDROGEN COUNCIL (2021). **Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness**. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

HYDROGEN COUNCIL (2020). **Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective, 20th January 2020**. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Projeto multidisciplinar do IPT avalia quatro rotas consideradas como promissoras para a produção de hidrogênio, 9 de maio de 2024**. Disponível em: <https://ipt.br/2024/05/09/hidrogenio-de-baixo-carbono/>. Acesso em: 15 maio 2024.

IPESI DIGITAL – PORTAL DE NOTÍCIAS DA INDÚSTRIA. **IPT abrigará o Centro de Ciências para o Desenvolvimento de Energias Renováveis e Combustíveis Futuro, 19 de novembro de 2024.** Disponível em: <https://ipesi.com.br/ipt-abrigara-o-centro-de-ciencias-para-o-desenvolvimento-de-energias-renovaveis-e-combustiveis-do-futuro/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SÃO PAULO (ESTADO). **Comissão de Infraestrutura da Alesp aprova indicados para o Conselho Estadual de Política Energética (CEPE), 20 de setembro de 2023.** Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/noticia/?id=460028>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SÃO PAULO (ESTADO). **Decreto Estadual 65.881, de 20 de julho de 2021.** Dispõe sobre a adesão do Estado de São Paulo às campanhas mundiais “Race to Zero” e “Race to Resilience”. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2021/decreto-65881-20.07.2021.html>. Acesso em: 18 jan. 2025.

SÃO PAULO (ESTADO). **Lei Estadual 11.248, de 4 de novembro de 2002.** Cria o Conselho Estadual de Política Energética (CEPE). Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11248-04.11.2002.html>. Acesso em: 2 fev. 2025.

SENADO FEDERAL. **Projeto de Lei (PL) 2.308/2023.** Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9518861&ts=1720046425252&disposition=inline>. Acesso em: 9 fev. 2025.

UNITED NATIONS, INDEPENDENT GROUP OF SCIENTISTS APPOINTED BY THE SECRETARY-GENERAL. **Global Sustainable Development Report 2023:** Times of crisis, times of change - Science for accelerating transformations to sustainable development. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2023.

UNITED NATIONS. **Paris Agreement, 2015.** Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 9 fev. 2025.