

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL**

LETÍCIA DE OLIVEIRA BRUNELLI

**O ARCABOUÇO POLÍTICO-REGULATÓRIO DA BIOECONOMIA NO BRASIL:
POTENCIALIDADES E FRAGILIDADES PARA A ROTA TECNOLÓGICA DO
HIDROGÊNIO MUSGO NA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS**

São Carlos

2025

LETÍCIA DE OLIVEIRA BRUNELLI

O Arcabouço Político-Regulatório da Bioeconomia no Brasil: Potencialidades e Fragilidades para a Rota Tecnológica do Hidrogênio Musgo na Produção de Fertilizantes Nitrogenados

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Profa. Flávia Mendes de Almeida Collaço.

São Carlos
2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

| | |
|-----------|---|
| B 894o | <p>Brunelli, Letícia de Oliveira</p> <p>O arcabouço político-regulatório da bioeconomia no brasil: potencialidades e fragilidades para a rota tecnológica do hidrogênio musgo na produção de fertilizantes nitrogenados / Letícia de Oliveira Brunelli; orientadora Flávia Mendes de Almeida Collaço. São Carlos, 2025.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2025.</p> <p>1. Bioeconomia circular. 2. Hidrogênio musgo. 3. Fertilizantes nitrogenados. 4. Políticas Públicas. I. Título.</p> |
|-----------|---|

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Leticia de Oliveira Brunelli**

Data da Defesa: 17/11/2025

Comissão Julgadora:

Resultado:

Flavia Mendes de Almeida Collaço (Orientador(a))


aprovada

Marcelo Zaiat

Aprovada

Lucas Tadeu Fuess

Aprovado


Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Dedico àqueles que vieram antes de mim e não
puderam ingressar no ensino superior;
sobretudo as mulheres.*

AGRADECIMENTOS

Se estou aqui hoje, é pelo tripé que me sustenta: Januário, Fátima e Gustavo.

Mãe e Pai, eu nada seria sem vocês. Agradeço todas as idas à biblioteca, as caronas para os vestibulares, as marmitas congeladas, as mudanças (3 em 6 anos!), enfim... o amor imensurável.

Ao meu marido, que estava comigo desde o frio na barriga dos vestibulares e vivenciou todos os altos e baixos da graduação. Mal posso esperar pelo que está por vir.

À minha orientadora, por acreditar em mim e ser fonte de inspiração como profissional.

Aos “Choruminhos” (Sorriso, Cupido, Daty e Mafê), pelo acolhimento, risadas e as melhores memórias.

À Pituca, a caramelo do C2 que me escolheu como sua humana. Mesmo pegando minhas meias, comendo meu fone de ouvido e às vezes fazendo as necessidades no lugar errado, você foi a melhor companheira de apartamento que alguém poderia ter.

À Jheni, minha psicóloga, cujo trabalho me permitiu completar a graduação.

À Rita, Ti, Amanda, Alê, Gabe e Edu, pelos momentos de descontração e por celebrarem essa conquista comigo.

Certa vez, ouvi “imagine fazer faculdade e fazer SÓ a faculdade”, e não quero imaginar como deve ser. Logo na primeira semana procurei ingressar em atividades extracurriculares, e cada uma delas foi responsável pela minha formação. Ao Student Branch do IEEE da USP São Carlos e a Semana de Engenharia Ambiental (#RAÇASEA), obrigada por todas as conversas e jogatinas durante a pandemia.

Aos lobinhos da Engaj (#VOAENGAI), agradeço os finais de semana fazendo planejamento estratégico ou escrevendo propostas comerciais, as reuniões que sempre saíam da pauta e por proporcionarem o espaço para colocar a mão na massa.

Ao Centro Cultural USP São Carlos, que me fez ganhar autoconfiança e independência, fundamentais para meu amadurecimento. Obrigada, Edison, Alex, Angela e Reinaldo, por todos os cafezinhos na copa e os anos trabalhando juntos. Também agradeço às colegas estagiárias: Ana, Heliz, Nat e Bia, compartilhar os surtos com vocês fez a vida ficar mais leve.

Aos colegas da Usina da Serra, em especial a Central Agrícola, Tratos Culturais e a Marina Balieiro, sempre guardarei com carinho meu tempo de estágio.

A todos os profissionais da educação que cruzaram meu caminho, da pré-escola ao ensino superior, meu muito obrigado.

"The only thing that makes life possible is permanent, intolerable uncertainty: not knowing what comes next."

Ursula K. LeGuin

RESUMO

A produção de fertilizantes nitrogenados, essencial para a agricultura, permanece dependente de fontes fósseis, principalmente o gás natural. No cenário mundial, o Brasil ocupa a quarta posição em consumo de fertilizantes, mas importa cerca de 85% do total consumido, o que o torna vulnerável às oscilações do mercado internacional e dependente de cadeias externas de suprimento. Nesse contexto, a expansão da economia do hidrogênio é considerada estratégica para fortalecer a segurança energética, modernizar a infraestrutura industrial e reduzir emissões em setores como a indústria química e de fertilizantes. O hidrogênio obtido a partir de biomassa residual, denominado hidrogênio musgo, configura uma rota tecnológica alinhada aos princípios da bioeconomia circular, ao promover o uso de resíduos e integrar inovação e sustentabilidade. Esta pesquisa tem como objetivo analisar as potencialidades e fragilidades do arcabouço político-regulatório brasileiro voltado ao desenvolvimento de fertilizantes nitrogenados de baixo carbono a partir de hidrogênio de biomassa. A metodologia adotada baseou-se na análise de conteúdo de seis instrumentos estratégicos nacionais: a Estratégia Nacional de Bioeconomia (ENB), a Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), o Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC), o Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF), a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC) e seu Plano de Trabalho Trienal (PTTPNH₂). Os resultados mostram que o arcabouço político-regulatório contém diretrizes que reconhecem a bioeconomia circular como caminho para inovação e transição produtiva. No entanto, as fragilidades identificadas limitam a concretização desse potencial em três níveis: (1) o conflito com o fortalecimento da rota baseada no gás natural; (2) o viés tecnológico que favorece as rotas elétricas de produção de hidrogênio; e (3) as lacunas de informação, infraestrutura e capital humano, como a ausência de dados regionalizados sobre resíduos disponíveis. Conclui-se que o conjunto de políticas públicas analisadas estabelece um ambiente de oportunidades, mas também de restrições. Embora incorpore princípios da bioeconomia circular e incentive práticas de inovação e descarbonização, o arcabouço atual mantém diretrizes conflitantes que favorecem tecnologias consolidadas e retardam a adoção de rotas baseadas em hidrogênio renovável e na produção nacional de fertilizantes de baixo carbono.

Palavras-chave: Bioeconomia circular; Hidrogênio musgo; Fertilizantes nitrogenados; Políticas Públicas

ABSTRACT

The production of nitrogen fertilizers, essential to modern agriculture, remains largely dependent on fossil resources, primarily natural gas. Globally, Brazil ranks fourth in fertilizer consumption, yet imports around 85% of its demand, exposing the agricultural sector to international market volatility and dependence on external supply chains. In this context, the expansion of the hydrogen economy is regarded as a strategic pathway to enhance energy security, modernize industrial infrastructure, and reduce emissions in sectors such as chemicals and fertilizers. Hydrogen derived from residual biomass — referred to as moss hydrogen — represents a technological route consistent with the principles of the circular bioeconomy, fostering waste valorization and the integration of innovation and sustainability. This study aims to analyze the potential and limitations of the Brazilian policy and regulatory framework for developing low-carbon nitrogen fertilizers based on biomass-derived hydrogen. The research employed content analysis of six national strategic instruments: the National Bioeconomy Strategy (ENB), the National Circular Economy Strategy (ENEC), the National Circular Economy Plan (PLANEC), the National Fertilizer Plan 2050 (PNF), the National Policy on Low-Carbon Hydrogen (PNHBC), and its Triennial Work Plan (PTTPNH₂). The findings reveal that the existing framework incorporates guidelines that acknowledge the circular bioeconomy as a driver of innovation and productive transition. However, structural weaknesses constrain the realization of this potential on three fronts: (1) strategic conflict with the continued reinforcement of natural gas-based routes; (2) technological bias favoring electrolysis-based hydrogen production; and (3) gaps in data, infrastructure, and human capital, including the lack of region-specific information on biomass residues. Overall, the policy ensemble creates both opportunities and constraints. While it embeds the principles of circular bioeconomy and supports innovation and decarbonization, the persistence of conflicting directives continues to favor incumbent fossil-based technologies, delaying the transition toward renewable hydrogen pathways and domestic production of low-carbon fertilizers.

Keywords: Circular bioeconomy; Moss hydrogen; Nitrogen fertilizers; Public policy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhos da biomassa ao hidrogênio

22

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Frequência dos Códigos Analíticos no Corpus Documental | 39 |
| Tabela 2 - Distribuição das Potencialidades por Código Analítico e Documento | 40 |
| Tabela 3 - Distribuição das Fragilidades por Código Analítico e Documento | 43 |
| Tabela 4 - Distribuição dos Trechos categorizados por Mistos por Código Analítico e Documento | 47 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Classificação do hidrogênio em escala de cores | 23 |
| Quadro 2 - Potencial de disponibilidade de biomassa no Brasil | 24 |
| Quadro 3 - Comparativo normalizado de desempenho das rotas de produção de hidrogênio | 27 |
| Quadro 4 - Livro de códigos analíticos | 37 |
| Quadro 5 - Definição das classificações de valência | 38 |
| Quadro 6 - Exemplos qualitativos das potencialidades | 41 |
| Quadro 7 - Exemplos qualitativos das fragilidades | 45 |
| Quadro 8 - Exemplos qualitativos dos trechos mistos | 48 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|--|
| AC | Análise de Conteúdo |
| ACV | Análise de Ciclo de Vida |
| BWGS | Biological Water-Gas Shift (Reação Biológica de Deslocamento Gás-Água) |
| CCUS | Carbon Capture, Utilization and Storage (Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono) |
| CNAE | Classificação Nacional de Atividades Econômicas |
| CNBio | Comissão Nacional de Bioeconomia |
| CNI | Confederação Nacional da Indústria |
| Coges-PNH2 | Comitê Gestor do PNH2 |
| CONAB | Companhia Nacional de Abastecimento |
| E2G | Etanol de Segunda Geração |
| ENB | Estratégia Nacional de Bioeconomia |
| ENEC | Estratégia Nacional de Economia Circular |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| ESG | Environmental, Social and Governance |
| FAFEN | Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados |
| FO | Fertilizantes Orgânicos |
| FOB | Free on Board (Livre a Bordo) |
| FOM | Fertilizantes Organominerais |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| IBÁ | Indústria Brasileira de Árvores |
| IEA | International Energy Agency (Agência Internacional de Energia) |
| IFA | International Fertilizer Association (Associação Internacional de Fertilizantes) |
| IRENA | International Renewable Energy Agency (Agência Internacional de Energia Renovável) |
| MCTI | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação |

| | |
|---------|--|
| MDIC | Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços |
| MEC | Ministério da Educação |
| MF | Ministério da Fazenda |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima |
| MMBtu | Milhão de Unidades Térmicas Britânicas |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| NDC | Nationally Determined Contribution (Contribuição Nacionalmente Determinada) |
| NPK | Nitrogênio, Fósforo e Potássio |
| P&D | Pesquisa e Desenvolvimento |
| PHBC | Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono |
| PLANEC | Plano Nacional de Economia Circular |
| PNDBio | Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia |
| PNF | Plano Nacional de Fertilizantes 2050 |
| PNH2 | Programa Nacional do Hidrogênio |
| PNHBC | Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono |
| PNMC | Política Nacional sobre Mudança do Clima |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| PTTPNH2 | Plano de Trabalho Trienal do PNH2 |
| Rehidro | Regime Especial de Incentivos |
| SBCE | Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões |
| SBCH2 | Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio |
| SCWG | Supercritical Water Gasification (Gaseificação em Água Supercrítica) |
| UFN | Unidade de Fertilizantes Nitrogenados |
| UNCCHLC | UN Climate Change High-Level Champions (Campeões de Alto Nível das Nações Unidas sobre Mudança do Clima) |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 14 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 17 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 3.1 ADUBAÇÃO NITROGENADA | 18 |
| 3.2 PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS | 18 |
| 3.3 BIOMASSA | 19 |
| 3.4 HIDROGÊNIO | 20 |
| 3.4.1 Rotas de produção de hidrogênio | 20 |
| 3.4.2 Hidrogênio musgo | 23 |
| 3.5 BIOECONOMIA CIRCULAR | 27 |
| 3.6 INSTRUMENTOS ESTRATÉGICOS BRASILEIROS | 28 |
| 3.6.1 Plano Nacional de Fertilizantes 2050 | 28 |
| 3.6.2 Estratégia Nacional de Economia Circular | 31 |
| 3.6.3 Plano Nacional de Economia Circular | 32 |
| 3.6.4 Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono | 33 |
| 3.6.5 Plano de Trabalho Trienal do PNH2 | 34 |
| 3.6.6 Estratégia Nacional de Bioeconomia | 35 |
| 4. METODOLOGIA | 37 |
| 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 39 |
| 5.1 PANORAMA QUANTITATIVO DOS RESULTADOS | 39 |
| 5.2 POTENCIALIDADES | 50 |
| 5.3 FRAGILIDADES E BARREIRAS | 52 |
| 5.4 CONVERGÊNCIAS E DIVERGÊNCIAS | 55 |
| 6. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 58 |
| 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 60 |
| 8. REFERÊNCIAS | 61 |

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor agrícola e a produção de alimentos são responsáveis por aproximadamente um terço das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) (IRENA; IEA; UNCCHLC, 2023). Entre os principais fatores que contribuem para as 13,7 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente liberadas por esse setor, destaca-se a fabricação de fertilizantes (Babcock-Jackson; Schipper, 2022). Estima-se que a produção de fertilizantes minerais, obtidos por processos físicos, químicos ou físico-químicos, represente cerca de 1,3% das emissões globais de CO₂ (IFA, 2023; Fernandes, 2022).

Os fertilizantes nitrogenados, como ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio e amônia anidra, são majoritariamente produzidos pelo processo Haber-Bosch, que depende do gás natural como fonte de hidrogênio e energia, após o processo de reforma a vapor. Mais da metade da produção global utiliza esse insumo fóssil (Chantre et al., 2022). A amônia, molécula-base desses fertilizantes, responde por cerca de 90% do consumo energético da indústria de fertilizantes e 2% da demanda global de energia, sendo a geração de hidrogênio a etapa mais intensiva (IFA, 2023).

No cenário mundial, o Brasil ocupa a quarta posição em consumo de fertilizantes (PNF, 2021). Contudo, cerca de 85% dos fertilizantes consumidos são importados, o que expõe o setor agrícola às oscilações do mercado internacional. Entre 2021 e 2022, a combinação da retomada econômica global e da guerra entre Rússia e Ucrânia elevou os preços a níveis sem precedentes (Benício, 2022). A retração da produção interna, anteriormente liderada pela Petrobras, intensificou a dependência externa e evidenciou a necessidade de alternativas sustentáveis para reduzir vulnerabilidades e atender às metas de descarbonização (Andrade, 2024).

Neste contexto, o hidrogênio pode ser produzido por diversas rotas tecnológicas. Estas incluem desde processos baseados em fontes fósseis até aqueles que utilizam fontes renováveis, como a eletrólise da água com eletricidade gerada de fontes eólicas, solares ou hidráulicas. O hidrogênio obtido a partir da biomassa, que pode ser tanto biomassa residual quanto biomassa em geral, é conhecido por hidrogênio musgo. A biomassa consome CO₂ atmosférico durante seu crescimento, resultando em um impacto líquido de CO₂ menor em comparação com combustíveis fósseis (Kalinci et al., 2009). Assim, o hidrogênio musgo configura uma rota tecnológica alinhada aos princípios da bioeconomia circular. Ao transformar resíduos e outros tipos de biomassa em insumos estratégicos, pode contribuir para a produção de amônia e fertilizantes de forma mais sustentável.

As duas principais rotas para a produção de hidrogênio a partir da biomassa são as termoquímicas e as bioquímicas (Kalinci et al., 2009; Pal et al., 2022). As rotas termoquímicas incluem pirólise, gaseificação convencional e gaseificação em água supercrítica (SCWG). A pirólise envolve o aquecimento da biomassa na ausência de ar, resultando em bio-óleo, carvão e alcatrão. A gaseificação convencional é uma tecnologia que aquece a biomassa a altas temperaturas para liberar gás combustível, utilizando ar, vapor ou oxigênio como agente de gaseificação para aumentar o valor energético.

A Gaseificação em Água Supercrítica é o método termoquímico preferencial para a valorização de biomassas com elevado teor de umidade (>50%), pois elimina a necessidade energética de secagem prévia da matéria-prima. Neste processo, a água é submetida a condições acima do seu ponto crítico (temperatura >374°C e pressão >22 MPa), comportando-se como um solvente não-polar completamente miscível com compostos orgânicos, o que favorece reações rápidas e suprime a formação de alcatrão (Kalinci et al., 2009; Pal et al., 2022).

No âmbito das rotas biológicas, além da produção fermentativa (subdividida em fermentação escura e foto fermentação), destaca-se o processamento metabólico. Esta categoria engloba a biofotólise, na qual microrganismos como cianobactérias e microalgas utilizam a energia solar para a dissociação direta ou indireta da água, e a Reação Biológica de Deslocamento Gás-Água (*Biological Water-Gas Shift*) (Pal et al., 2022; Kalinci et al., 2009). Na BWGS, certas bactérias foto-heterotróficas realizam a conversão de monóxido de carbono (CO) em hidrogênio (H₂) no escuro, operando em temperatura e pressão ambientes, acoplando a oxidação do CO à redução de prótons.

Nesse sentido, a expansão da economia do hidrogênio é considerada estratégica para fortalecer a segurança energética, modernizar a infraestrutura industrial e impulsionar setores como a indústria química e a mineração. Com o avanço das mudanças climáticas, o hidrogênio assume papel central na descarbonização industrial e no aproveitamento integrado de fontes renováveis (Chantre et al., 2022).

Diante deste cenário, o Brasil tem se movimentado na construção de um arcabouço de políticas públicas que busca fomentar essa nova indústria. Instrumentos como a Estratégia Nacional de Bioeconomia (ENB), a Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), o Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC), o Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF), a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC) e o Plano de Trabalho Trienal do PNH2 (PTTPNH2) emergem como as principais diretrizes estratégicas. Cabe, portanto, analisar se há convergência entre esses planos, e de que forma

eles criam um ambiente favorável para a valorização de recursos nacionais e a transição para rotas de produção mais sustentáveis. Diante desse panorama, surge a questão central desta pesquisa: De que forma o conjunto de políticas públicas e estratégias nacionais que moldam a bioeconomia, a economia circular, os fertilizantes e o hidrogênio no Brasil apresentam potencialidades e fragilidades para o desenvolvimento do hidrogênio renovável de biomassa como rota tecnológica na produção de fertilizantes nitrogenados?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as potencialidades e fragilidades das políticas públicas brasileiras com relação ao desenvolvimento sustentável e circular de fertilizantes nitrogenados via hidrogênio renovável proveniente de biomassa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear, por meio da análise de conteúdo, os pontos de convergência e divergência entre os documentos que compõem o *corpus* da pesquisa.
- Identificar e categorizar as potencialidades (incentivos, diretrizes favoráveis, sinergias) que o arcabouço político-estratégico oferece para a adoção desta nova rota tecnológica.
- Apontar e categorizar as fragilidades (lacunas regulatórias, barreiras de mercado, desafios de infraestrutura) que podem limitar ou impedir seu desenvolvimento no Brasil.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ADUBAÇÃO NITROGENADA

O nitrogênio é um nutriente essencial para diversos organismos, sendo também componente de ácidos nucleicos e proteínas. Na agricultura, ele garante um desenvolvimento eficiente das plantas, participando ativamente na biossíntese de clorofila (Argenta; Silva; Bortolini, 2001). Apesar de ser abundante na atmosfera na forma de gás (N_2), a maioria dos organismos não consegue utilizá-lo devido à forte ligação tripla entre seus átomos, que torna a molécula praticamente inerte (Vieira, 2017). Cerca de 95% do nitrogênio presente no solo encontra-se em forma orgânica, havendo também formas minerais inorgânicas, como amônia (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (Santana, 2019). Além disso, o nitrogênio atua como mediador essencial nas interações planta-microrganismo, promovendo relações simbióticas que aumentam a disponibilidade de nutrientes, e desempenha papel central na resposta das plantas a diferentes estresses ambientais, como seca, salinidade e doenças (Zayed et al., 2023).

Considerando a viabilidade econômica e a relação custo-benefício da adubação nitrogenada, a ureia se destaca como opção acessível e amplamente utilizada, contendo 45% de nitrogênio e liberando o nutriente rapidamente no ambiente, seja a partir de resíduos biológicos ou do solo (Vieira, 2017).

3.2 PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

A competitividade dos fertilizantes nitrogenados está diretamente condicionada pelos custos de investimento em plantas produtoras, custos operacionais, preços das matérias-primas e valores de venda dos produtos finais. Enquanto países como os Estados Unidos contaram com o Índice Henry Hub¹ abaixo de US\$2/MMBtu em 2020, no Brasil o preço do gás natural para o setor industrial frequentemente ultrapassa US\$12/MMBtu em alguns estados, onerando significativamente a produção nacional (Diaz, 2021). Esse diferencial de custo tem sido apontado tanto em estudos de caso quanto em entrevistas com agentes do setor como o principal fator que compromete a viabilidade econômica da produção interna de amônia e ureia. Diante desse cenário, alternativas que utilizem fontes renováveis e descentralizadas, como o hidrogênio derivado da biomassa, ganham relevância para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental do setor.

¹ O Henry Hub é um ponto físico de interconexão de gasodutos na Louisiana (EUA) que serve como local de entrega para contratos futuros de gás natural na *New York Mercantile Exchange*. Embora o mercado de gás seja fisicamente regionalizado, o Henry Hub consolidou-se como o principal preço de referência internacional (Makholm, 2016).

A viabilidade econômica da produção de ureia depende fortemente da localização das plantas em relação aos portos importadores e aos centros consumidores finais. Em regiões portuárias, a ureia produzida compete com preços próximos ao FOB (*Free on Board*), o que exige custos menores de gás natural para garantir competitividade. Já nas regiões interioranas, onde a demanda por fertilizantes é maior, o preço pago pelos consumidores tende a ser superior devido aos custos logísticos, permitindo que plantas localizadas próximas às lavouras aceitem preços maiores do gás natural (PNF, 2021). Nesse cenário, a produção descentralizada de fertilizantes nitrogenados por meio de hidrogênio derivado da biomassa pode representar uma estratégia eficaz, pois permite a instalação de unidades produtivas próximas aos centros de consumo e às fontes de biomassa, reduzindo custos de transporte e dependência da infraestrutura do gás natural. Além disso, essa abordagem promove a bioeconomia circular ao integrar produção e consumo local de forma sustentável.

O déficit estrutural entre produção e demanda de fertilizantes no Brasil tem sido uma constante histórica, e essa lacuna torna o país cronicamente dependente de importações. Nesse contexto, os fertilizantes orgânicos (FO) e organominerais (FOM) despontam como alternativas estratégicas para corrigir deficiências do solo brasileiro e reduzir a vulnerabilidade externa. O crescimento de 19,5% do mercado de FOM em 2019 revela um potencial de expansão, embora o setor ainda enfrente entraves importantes, como baixa padronização dos produtos, ausência de um CNAE² específico para fertilizantes orgânicos e concentração da oferta de matérias-primas minerais (PNF, 2021). Além disso, a desvalorização cambial eleva os custos da fração mineral, que ainda depende fortemente de insumos NPK importados. A proposta de produção de fertilizantes nitrogenados por meio do aproveitamento de biomassa e hidrogênio verde se insere justamente como resposta a esse cenário: ao valorizar resíduos agroindustriais, essa rota alternativa pode fortalecer o setor de organominerais com independência de insumos importados, promovendo a integração entre cadeias produtivas locais e fomentando uma bioeconomia circular descentralizada.

3.3 BIOMASSA

A biomassa e seus derivados desempenham um papel estratégico na produção sustentável de hidrogênio. A substituição de combustíveis fósseis por biomassa nesse processo contribui para a redução das emissões líquidas de CO₂, uma vez que o carbono

² A Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) é o instrumento de padronização nacional dos códigos de atividade econômica e dos critérios de enquadramento utilizados pelos diversos órgãos da Administração Tributária do país.

liberado durante a gaseificação já havia sido previamente absorvido da atmosfera e fixado pelas plantas em crescimento por meio da fotossíntese (Balat; Kirtay, 2010).

Além disso, observa-se um aumento expressivo na disponibilidade de matérias-primas orgânicas provenientes do processamento de resíduos agropecuários, especialmente os de origem animal e vegetal, o que fortalece a competitividade do setor. Nos últimos anos, a valorização de resíduos tem ganhado relevância, impulsionando políticas e iniciativas voltadas para o desenvolvimento sustentável e a bioeconomia circular. Esse movimento reforça a importância da economia de baixo carbono e do reaproveitamento de subprodutos na transição energética global (Ungureanu; Vlăduț; Biriș, 2022). Em 2020, o volume de vendas de fertilizantes baseados em resíduos alcançou 1 milhão de toneladas, e a tendência é de crescimento, especialmente diante do câmbio desvalorizado e do alto custo das matérias-primas minerais importadas (PNF, 2021). No entanto, o sucesso desses fertilizantes depende de aspectos como a estabilidade físico-química do composto, garantindo a manutenção da concentração de nutrientes e a segurança contra degradação durante o armazenamento, o que é essencial para a segurança no armazenamento, transporte e aplicação. Para cadeias emergentes, como a dos fertilizantes organominerais e nitrogenados de base biológica, fatores como logística, demanda energética e organização da produção são determinantes. Nesse contexto, a utilização de biomassa para produção descentralizada de hidrogênio musgo e fertilizantes nitrogenados pode ser articulada de forma estratégica, integrando produção e consumo locais, otimizando resíduos e fortalecendo a bioeconomia circular.

3.4 HIDROGÊNIO

3.4.1 Rotas de produção de hidrogênio

Os processos de produção de hidrogênio podem ser agrupados em três principais rotas tecnológicas: térmica, eletrolítica e fotolítica. Essas rotas abrangem sete processos distintos, aplicáveis a diferentes fontes de matéria-prima, tanto fósseis quanto renováveis. Entre os métodos que utilizam combustíveis fósseis, destacam-se os processos de reforma (como reforma a vapor, oxidação parcial e reforma autotérmica) e a pirólise de hidrocarbonetos (Chantre et al., 2022).

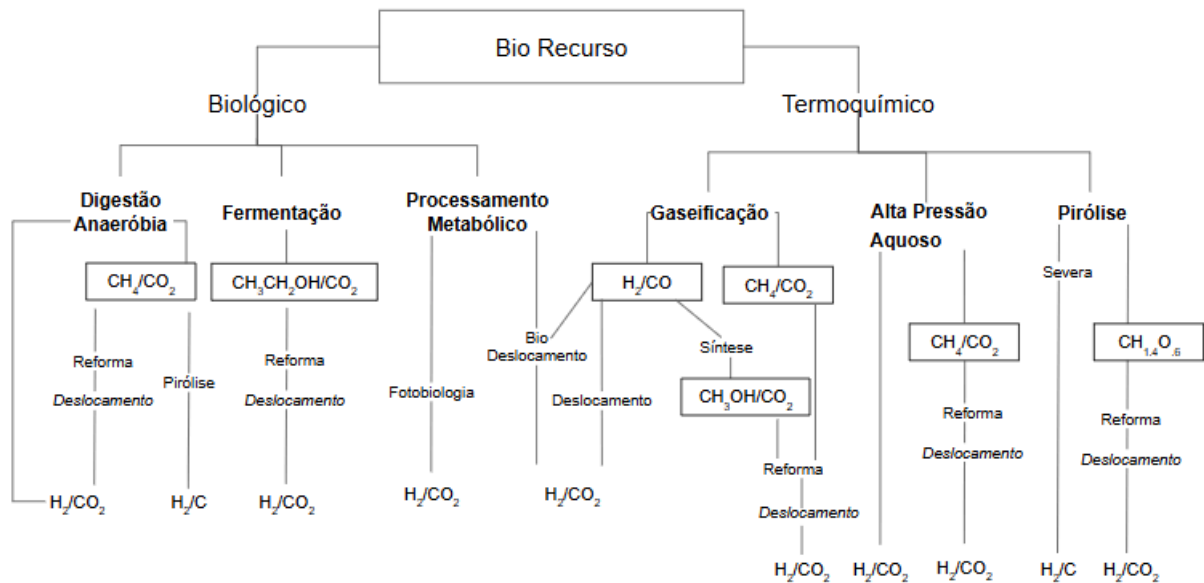
Já os processos baseados em fontes renováveis são classificados conforme a matéria-prima utilizada, seja biomassa ou água. A produção a partir da água pode ocorrer por eletrólise (utilizando eletricidade, que pode provir de fontes renováveis como a biomassa),

termólise (decomposição térmica) ou fotólise (decomposição fotoeletroquímica) (Chantre et al., 2022).

No que tange especificamente à biomassa, adota-se a classificação proposta por Milne et al. (2002), ilustrada na Figura 1, que segmenta as vias de conversão em rotas termoquímicas e biológicas. As rotas termoquímicas englobam processos consolidados, como a combustão e a liquefação, além das vias de conversão térmica avançada, como a pirólise, que resulta na geração de bio-óleo, e a gaseificação, que converte a biomassa em gás de síntese (*syngas*), composto majoritariamente por H_2 e CO. Uma rota distinta apresentada na figura é a de Alta Pressão Aquoso (*High Pressure Aqueous*), referente à conversão de biomassas úmidas em água supercrítica ou próxima ao ponto crítico, técnica que permite a gaseificação sem a necessidade energética de secagem prévia do resíduo. Nestas vias, a recorrência do termo "deslocamento" (*Shift*) subsequente às etapas de gaseificação, pirólise e alta pressão refere-se à reação de deslocamento gás-água (*Water-Gas Shift*). Trata-se de uma etapa química que converte o monóxido de carbono (CO) gerado e o vapor d'água em dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio adicional (H_2), maximizando o rendimento energético do processo.

Por sua vez, as rotas biológicas compreendem a fermentação escura e a digestão anaeróbia. Milne et al. (2002) definem ainda uma terceira categoria, denominada Processamento Metabólico, que se distingue por utilizar a maquinaria celular de microrganismos para a produção direta de hidrogênio. Esta categoria abarca a biofotólise e a foto fermentação, processos também destacados por Chantre et al. (2022) como vias relevantes, além do bio-deslocamento (*Bio-shift*). Este último consiste em um processo biológico no qual microrganismos realizam metabolicamente a reação de deslocamento, consumindo CO e liberando H_2 , apresentando a vantagem de eliminar a necessidade de etapas intensivas de purificação química do monóxido de carbono. A Figura 1 sintetiza este arranjo tecnológico, destacando em retângulos os intermediários estáveis passíveis de armazenamento, como o metano e o metanol, que viabilizam a logística de produção descentralizada.

Figura 1 - Caminhos da biomassa ao hidrogênio



Fonte: Traduzido de Milne et al., 2002.

Com a crescente preocupação global em reduzir as emissões de carbono, o hidrogênio tem ganhado destaque como um vetor energético estratégico, impulsionando a diferenciação das suas formas de produção conforme a origem da matéria-prima e o impacto ambiental envolvido. Além disso, cresce o debate sobre a integração de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS – *Carbon Capture, Utilisation and Storage*), que podem mitigar as emissões associadas aos processos baseados em fontes fósseis (EPE, 2021a).

O hidrogênio é classificado por cores com base na pegada de carbono de sua produção, impactando sua contribuição para a mitigação das emissões de GEE. As principais classificações estão dispostas no Quadro 1. Não há uma padronização universal para essas classificações, e diferentes fontes utilizam critérios variados para nomear o hidrogênio conforme sua origem. A IEA (2019) questiona a precisão técnica dessa abordagem, destacando a necessidade de um sistema mais rigoroso para diferenciar as rotas tecnológicas de produção.

Quadro 1 - Classificação do hidrogênio em escala de cores

| Cor | Resumo do processo de produção do hidrogênio |
|----------|--|
| Preto | Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ² |
| Marrom | Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS |
| Cinza | Reforma a vapor do gás natural sem CCUS |
| Azul | Reforma a vapor do gás natural com CCUS |
| Turquesa | Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂ |
| Verde | Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar) |
| Musgo | Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS |
| Rosa | Fonte de energia nuclear |
| Amarelo | Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes |
| Branco | Extração de hidrogênio natural ou geológico |

Fonte: EPE, 2021b.

3.4.2 Hidrogênio musgo

Embora a produção de hidrogênio musgo ainda enfrente desafios de competitividade, relacionados principalmente à heterogeneidade da matéria-prima, aos custos de capital e à maturidade tecnológica de certas rotas de conversão, os compromissos globais de descarbonização impulsionam a transição para alternativas sustentáveis na indústria. Nesse contexto, o hidrogênio obtido a partir da biomassa constitui uma rota tecnológica estratégica para o Brasil, com potencial para contribuir com a descarbonização da indústria de fertilizantes e estimular uma dinâmica competitiva descentralizada.

O Brasil detém um diferencial competitivo único para a produção de hidrogênio musgo, fundamentado na vasta disponibilidade de biomassa e na infraestrutura agroindustrial consolidada. Segundo Welfle (2017), os recursos de biomassa do país são suficientes não apenas para equilibrar a demanda interna de energia primária, mas também para sustentar uma posição de liderança na exportação de vetores energéticos. Essa vocação é detalhada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025c), que destaca que o país reúne condições singulares pela disponibilidade de matérias-primas residuais e de coprodutos da agroindústria, bem como pela elevada produtividade agrícola, fatores que o tornam um potencial produtor competitivo de biohidrogênio.

O potencial brasileiro para o uso do biogás é bastante significativo, diante de diversas fontes de biomassa disponíveis em todo o território nacional, como os resíduos sólidos

urbanos, resíduos agrícolas e agroindustriais e dejetos animais. Considerando a elevada produção nacional de biocombustíveis, o etanol se destaca como grande possibilidade, dada a consolidação e o vigor do biocombustível no país, baseados na experiência da indústria canavieira e na expansão das usinas de milho. Adicionalmente, a partir da glicerina, a reforma se torna interessante porque agrega valor a um coproduto da cadeia de produção do biodiesel, integrando as rotas da indústria energética (EPE, 2025c). A diversificação dessas fontes permite a adoção de rotas tecnológicas distintas, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2 - Potencial de disponibilidade de biomassa no Brasil

| Matéria-Prima | Produção Base (2025/26)³ | Coefficiente Técnico Adotado⁴ | Disponibilidade Estimada |
|------------------------|--|---|---------------------------------|
| Bagaço e Palha de Cana | 666,4 milhões t (CONAB, 2025b) | 0,275 t/t (0,135 bagaço + 0,140 palha) (EPE, 2007) | ~183,3 milhões t/ano |
| Restos de Milho | 138,8 milhões t (CONAB, 2025a) | 5,0 t/t (Biomassa total residual) (EPE, 2007) | ~694,2 milhões t/ano |
| Palha de Soja | 177,6 milhões t (CONAB, 2025a) | 3,6 t/t (Palha residual) (EPE, 2007) | ~639,4 milhões t/ano |
| Etanol Total | 36,2 bilhões L (CONAB, 2025b) ⁵ | N/A (Uso direto) | ~36,2 bilhões L/ano |
| Casca de Café | 3,4 milhões t (CONAB, 2025c) ⁶ | 1,6 a 3,0 t/t (Resíduo/grão) (FERREIRA-LEITÃO et al., 2010) | ~5,6 a 11 milhões t/ano |
| Resíduos de Madeira | 10,3 milhões ha (IBÁ, 2025) | ~7,0 t/ha.ano (Resíduos totais) (EPE, 2007) | ~72,0 milhões t/ano |

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Para contextualizar o potencial desta rota, é crucial compará-la com a via que atualmente domina o debate internacional, a eletrólise da água. A principal abordagem para a produção de hidrogênio verde utiliza eletricidade de fontes renováveis para alimentar o processo de eletrólise. Conforme a análise de Mao et al. (2024), neste modelo, o processo industrial tradicional de Haber-Bosch e Bosch-Meiser⁷ é mantido, mas seus insumos são descarbonizados. Embora tecnicamente viável, os autores apontam que esta rota possui um consumo energético significativamente superior ao do processo fóssil, sendo a eletrólise da

³ Valores de produção referentes às estimativas da Safra 2025/26.

⁴ Referente à biomassa em base seca.

⁵ Soma do etanol de cana (26,5 bi L) e milho (9,6 bi L).

⁶ Conversão de 56,5 milhões de sacas de 60kg para toneladas.

⁷ O processo Haber-Bosch sintetiza amônia (NH₃) reagindo nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂) sob altas pressões (150–350 bar) e temperaturas (350–550 °C). Já o processo Bosch-Meiser converte essa amônia e dióxido de carbono (CO₂) em ureia (CO(NH₂)₂) em duas etapas de equilíbrio sob alta pressão. Ambos são energeticamente intensivos, consumindo cerca de 2% da energia global, majoritariamente para a reforma a vapor do metano na produção do H₂ (Wang et al., 2024).

água a etapa mais intensiva em energia, o que levanta questionamentos sobre sua competitividade econômica.

Diferentemente da rota de eletrólise, as vias de produção a partir da biomassa empregam processos termoquímicos ou bioquímicos, permitindo o aproveitamento de diferentes tipos de resíduos. Martín e Sánchez (2024) classificam essas rotas em categorias principais, a depender da natureza da matéria-prima e do processo de conversão.

No espectro das rotas bioquímicas, aplicáveis majoritariamente à biomassa úmida, destaca-se a digestão anaeróbia. Este processo é ideal para efluentes como a vinhaça (subproduto líquido da destilação do etanol, abundante no setor sucroenergético brasileiro), gerando biogás, uma mistura rica em metano (CH_4). Subsequentemente, o biogás pode ser submetido a reformas para produzir hidrogênio (H_2). Além da digestão, as rotas biológicas também englobam processos fermentativos, como a fermentação escura e a foto fermentação. Nestes métodos, microrganismos degradam a matéria orgânica e produzem bio-hidrogênio diretamente, sem a fase intermediária do metano, apresentando-se como alternativas promissoras para a valorização de efluentes agroindustriais.

Já no campo das rotas termoquímicas, voltadas preferencialmente para a biomassa seca e lignocelulósica, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, utiliza a gaseificação. Neste processo termoquímico, a biomassa é convertida em gás de síntese, uma mistura de hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO). O gás de síntese passa então por etapas de purificação e pela reação de deslocamento gás-água (*water-gas shift*) para maximizar a produção de hidrogênio puro, necessário para a síntese de amônia. Segundo Martín e Sánchez (2024), esta é a rota considerada mais promissora do ponto de vista econômico.

Em uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) na Colômbia, Sanchez et al. (2024) demonstraram que a implementação de um sistema de gaseificação para cogeração de energia não apenas elimina a pegada de carbono da produção, como a torna negativa ($-0,87 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$). Tal resultado estabelece a base tecnológica para o passo seguinte, que consiste no uso deste mesmo gás de síntese para a produção de hidrogênio.

Uma das principais vantagens estratégicas da rota de gaseificação é a solução integrada para o problema do CO_2 liberado. Conforme apontado por Martín e Sánchez (2024), o dióxido de carbono, um subproduto inevitável do processo de produção de amônia a partir de biomassa, deixa de ser um passivo ambiental para se tornar a matéria-prima essencial na síntese da ureia. Essa integração resolve um dos desafios ambientais mais significativos da amônia baseada em biomassa, que é o gerenciamento do CO_2 emitido. Os autores propõem um modelo de biorrefinaria de ciclo fechado em que essa integração permite a utilização total

do recurso biológico dentro de uma lógica de química verde e contribui para a iniciativa de CCUS, podendo gerar amônia verde com emissões diretas negativas de CO₂. Para evitar o excesso de CO₂ durante a produção de ureia, a combinação de amônia eletroquímica e bioquímica é proposta para o aproveitamento integral do dióxido de carbono produzido no tratamento da biomassa.

O viés para as rotas elétricas, identificado na análise das políticas públicas deste trabalho, é questionado por estudos de otimização econômica. Tomando a rota de gaseificação como estudo de caso, Alfian e Purwanto (2019) demonstram que, para a produção de ureia, a conversão termoquímica da biomassa pode ser mais competitiva do que a eletrólise solar no horizonte até 2050. Esse indicativo de viabilidade econômica reforça o potencial do hidrogênio musgo de forma ampla, sugerindo que tanto vias termoquímicas quanto bioquímicas (como a reforma do biogás) podem oferecer resiliência econômica à indústria de fertilizantes frente à volatilidade do gás natural.

Essa vantagem competitiva é corroborada por avaliações multicritério mais amplas. Acar e Dincer (2014) realizaram uma avaliação comparativa normalizada das principais rotas de produção de hidrogênio, atribuindo pontuações de 0 a 10 para diferentes indicadores, em que 10 representa o cenário ideal (custo zero, emissões zero ou 100% de eficiência). Conforme apresentado no Quadro 3, a gaseificação de biomassa destaca-se por apresentar um equilíbrio favorável entre custos e eficiência energética, obtendo pontuações superiores às rotas de eletrólise (solar e eólica) nesses quesitos. Enquanto as rotas elétricas sofrem penalizações devido aos altos custos de produção e menores eficiências globais, a biomassa se aproxima da competitividade econômica da reforma a vapor do gás natural, embora enfrente desafios relacionados ao potencial de acidificação.

Quadro 3 - Comparativo normalizado de desempenho das rotas de produção de hidrogênio

| Método de Produção | | Potencial de Aquecimento Global (GWP) | Custo de Produção | Eficiência Energética | Eficiência Exergética | Média Geral |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| Fóssil | Reforma a Vapor (Gás Natural) | 2,94 | 8,35 | 3,75 | 3,15 | 4,4 |
| | Gaseificação de Carvão (com CCS) | 0,00 | 8,02 | 3,5 | 3,15 | 2,45 |
| Renovável | Gaseificação de Biomassa | 8,24 | 8,46 | 6,5 | 6 | 6,33 |
| | Eletrólise Eólica | 9,43 | 1,98 | 3,1 | 3 | 6,02 |
| | Eletrólise Solar | 8,53 | 0 | 0,5 | 0,4 | 4,22 |

Fonte: Adaptado de Acar e Dincer (2014).

Os dados do Quadro 3 evidenciam que, sob uma ótica integrada, a gaseificação de biomassa (nota média 6,33) supera não apenas a reforma do gás natural (4,40) mas também as rotas de eletrólise solar (4,22) e eólica (6,02) no contexto analisado. O destaque da biomassa reside na sua alta pontuação de Custo (8,46), indicando ser uma das rotas mais econômicas, comparável ao gás natural (8,35), e na sua Eficiência Energética (6,50), que é significativamente superior à das rotas de eletrólise.

3.5 BIOECONOMIA CIRCULAR

O conceito de bioeconomia circular busca otimizar o uso da biomassa por meio da redução do desperdício, do aproveitamento alternativo, da reciclagem e da recuperação de recursos biológicos ao longo de toda a cadeia de valor. De acordo com a definição da Comissão Europeia, a bioeconomia engloba "todos os setores de produção primária que utilizam e produzem recursos biológicos (agricultura, silvicultura, pesca e aquicultura), bem como todos os setores econômicos e industriais que empregam recursos e processos biológicos para produzir alimentos, rações, bio-produtos, energia e serviços" (Schipfer et al., 2024, p. 3).

Em 18 de novembro de 2024, foi publicada a Portaria Interministerial que institui a Comissão Nacional de Bioeconomia (CNBio), uma iniciativa conjunta dos Ministérios do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) e da Fazenda (MF). A CNBio tem como principal missão elaborar e monitorar a implementação do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia, visando

fortalecer esse setor no Brasil. A presidência da comissão será rotativa entre os três ministérios, com mandatos de 12 meses, iniciando pelo MDIC. A composição da CNBio inclui representantes do governo, sociedade civil, setor empresarial e academia.

No cenário agrícola brasileiro, destaca-se o setor de processamento da cana-de-açúcar, não apenas pelo volume de produção, mas por sua configuração industrial que remete a modelos naturais de biorrefinarias (ALVES et al., 2015). O setor sucroenergético já possui um modelo consolidado de reaproveitamento de resíduos, o que reforça a viabilidade da adoção de novas estratégias sustentáveis. O bagaço da cana é amplamente utilizado para cogeração de energia e produção de etanol de segunda geração (E2G), enquanto subprodutos como vinhaça, cinzas e torta de filtro são reaproveitados na adubação dos solos. Esse cenário evidencia que a bioeconomia circular já faz parte da dinâmica do setor, tornando ainda mais justificável a implementação de tecnologias inovadoras. Ao agregar valor a resíduos previamente utilizados, essa abordagem pode potencializar a eficiência produtiva, reduzir a dependência de fertilizantes importados e contribuir para a descarbonização da agricultura.

3.6 INSTRUMENTOS ESTRATÉGICOS BRASILEIROS

3.6.1 Plano Nacional de Fertilizantes 2050

Para Caligaris et al. (2022), a sucessão de crises recentes pode atuar como catalisador para repensar as bases estruturais da agricultura brasileira. Segundo os autores, se o Brasil deseja manter sua posição de destaque na produção agrícola mundial, deve priorizar a disponibilidade de insumos essenciais. Nesse sentido, o acesso a fertilizantes e produtos de nutrição vegetal a preços acessíveis não deve ser entendido apenas como um desafio interno, mas como um gargalo crítico com impactos diretos sobre a segurança alimentar global.

Nesse contexto, e diante da elevada dependência externa do país, somada ao potencial de expansão do agronegócio brasileiro, foi instituído um grupo de trabalho interministerial responsável pela formulação do Plano Nacional de Fertilizantes. O PNF tem como objetivo o desenvolvimento de políticas públicas que fortaleçam a competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no território nacional, com foco na sustentabilidade de longo prazo (PNF, 2021).

O PNF reconhece as limitações do uso do gás natural como principal insumo para a produção de fertilizantes nitrogenados, em especial sua volatilidade de preços, dependência externa e impactos ambientais associados. Uma alternativa promissora para superar essas restrições está na produção descentralizada de fertilizantes nitrogenados a partir de biomassa. Essa abordagem estratégica permite situar unidades produtivas próximas aos centros

consumidores, especialmente em regiões produtoras de biomassa, como o setor sucroenergético da cana-de-açúcar, reduzindo custos logísticos e promovendo um modelo de bioeconomia circular.

Atualmente, o setor brasileiro de fertilizantes nitrogenados é fortemente baseado no uso de gás natural como matéria-prima para a produção de amônia e ureia. No país, existem quatro unidades industriais em operação ou arrendamento:

- Unigel Agro BA (antiga FAFEN-BA), atualmente arrendada para a Proquigel, com produção de amônia e ureia;
- Unigel Agro SE (antiga FAFEN-SE), também arrendada para a Proquigel, produz amônia, ureia e sulfato de amônio;
- Yara Brasil (antiga Vale, em Piaçaguera, SP), em operação, produzindo amônia e nitrato de amônio;
- Araucária Nitrogenados S.A. (antiga FAFEN-PR), atualmente em estado de hibernação, administrada por subsidiária da Petrobras e em processo de arrendamento, que anteriormente produzia amônia e ureia a partir de resíduos asfálticos.

Além dessas unidades, há projetos anteriores de construção ou expansão que não foram concluídos ou estão paralisados, como:

- Projeto UFN III, em Três Lagoas (MS), que teve sua construção iniciada, mas está atualmente em processo de venda;
- Projeto UFN IV, em Linhares (ES), retirado do portfólio da Petrobras em 2013;
- Projeto UFN V, em Uberaba (MG), retirado do portfólio da Petrobras em 2016.

A infraestrutura para escoamento, processamento e transporte de gás natural no Brasil concentra-se principalmente ao longo do litoral, com exceção do gasoduto GASBOL, que atravessa o interior do Mato Grosso do Sul e São Paulo. Embora novos projetos de gasodutos estejam em estudo para ampliar o alcance, as limitações geográficas e os custos associados ao transporte do gás natural ainda representam um desafio relevante para a expansão das unidades produtoras de fertilizantes nitrogenados (FAFENs) no interior do país. Além disso, soluções como o Gás Natural Comprimido (GNC) em pequena escala ou o Gás Natural Liquefeito (GNL) poderiam atender algumas demandas, mas o custo final da entrega do insumo impacta diretamente a competitividade dos fertilizantes produzidos.

Esse cenário evidencia as dificuldades enfrentadas pelo Brasil para ampliar sua capacidade industrial em fertilizantes nitrogenados, reforçando a necessidade de explorar alternativas tecnológicas que reduzam a dependência do gás natural e os riscos associados à volatilidade do mercado internacional. Nesse contexto, a produção descentralizada de

fertilizantes nitrogenados a partir da biomassa residual e do hidrogênio musgo surge como uma alternativa estratégica, reduzindo a dependência de longas cadeias logísticas e promovendo um modelo mais eficiente e sustentável de bioeconomia circular.

Embora o PNF reconheça que a produção de hidrogênio é uma variável relevante para o futuro das unidades produtoras de fertilizantes nitrogenados (FAFENs), seu enfoque permanece centrado em fontes tradicionais como o gás natural, que hoje representa a principal matéria-prima no Brasil.

O documento menciona brevemente outras rotas, como o biometano e a hidrólise da água, caminhos relacionados ao Programa Nacional do Hidrogênio (PNH), mas não avança na discussão sobre o hidrogênio musgo como vetor de transformação estrutural da cadeia de fertilizantes. Nesse contexto, a proposta de utilizar biomassa para geração de hidrogênio musgo — seja por vias termoquímicas (como a gaseificação) ou bioquímicas (como a reforma do biometano oriundo da biodigestão) — oferece uma alternativa concreta e compatível com os objetivos do PNF: reduzir a dependência de insumos importados, ampliar a sustentabilidade da produção nacional e promover o desenvolvimento regional descentralizado. Ao eliminar a necessidade do módulo de reforma a vapor das FAFENs e ao utilizar fontes renováveis locais, essa rota permite não apenas a redução de custos e emissões, mas também a integração entre cadeias agrícolas e industriais em uma lógica de bioeconomia circular ainda pouco explorada nas políticas públicas brasileiras.

No entanto, a visão estratégica do PNF para o ano de 2040 já antecipa transformações estruturais no setor, alinhadas com a proposta deste trabalho. Entre as metas projetadas estão a instalação de polos de produção junto às fontes de resíduos e a construção de unidades de pequena escala no local de geração de biomassa, voltadas à fabricação de fertilizantes organominerais. Esse modelo descentralizado busca integrar produtores de fertilizantes, geradores de resíduos orgânicos e consumidores agrícolas, criando sinergias regionais. Espera-se, também, o crescimento da participação dos fertilizantes de base biológica para 15% a 20% do consumo total, acompanhado por maior reconhecimento de seus benefícios pelos agricultores. A proposta de produção de fertilizantes nitrogenados a partir de biomassa está alinhada a essa estratégia, ao possibilitar a valorização de resíduos como insumo estratégico, fomentar práticas sustentáveis, e fortalecer a bioeconomia circular com base científica, técnica e territorial.

3.6.2 Estratégia Nacional de Economia Circular

Instituída pelo decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024, a ENEC visa promover a transição do modelo econômico linear, caracterizado pela produção e consumo intensivos, para um sistema circular que priorize a utilização eficiente dos recursos naturais e a implementação de práticas sustentáveis em todas as etapas das cadeias produtivas. Estruturada em três princípios fundamentais, a ENEC busca: minimizar resíduos e poluição; manter materiais e produtos em circulação pelo maior tempo possível em seu valor máximo; e regenerar os sistemas naturais.

A análise de Miranda et al. (2025) buscou compreender de que maneira as empresas brasileiras podem acelerar a adoção de modelos de economia circular, superando barreiras tecnológicas, regulatórias e de mercado, à luz da ENEC, bem como identificar os fatores críticos para ampliar seus impactos econômicos, ambientais e sociais. O estudo aponta que a distância entre a legislação e a prática empresarial continua sendo um obstáculo relevante, evidenciado pela adoção restrita dos princípios circulares nas organizações. Em geral, as iniciativas empresariais limitam-se à gestão de resíduos e à eficiência energética, sem promover transformações estruturais nos modelos de negócio, que são o núcleo da filosofia circular.

Os autores destacam que a consolidação da economia circular no Brasil dependerá da integração entre políticas públicas, inovação empresarial e inclusão socioprodutiva, aproveitando a conjuntura internacional como oportunidade para fortalecer a competitividade e atrair investimentos verdes. Concluem que a economia circular no país ainda é um campo em construção, com avanços institucionais relevantes, mas que enfrenta barreiras estruturais que dificultam sua difusão empresarial. Superar esses desafios requer políticas públicas articuladas, estratégias empresariais de longo prazo e mecanismos financeiros e sociais que promovam inovação e inclusão produtiva.

A ENEC incentiva o redesenho circular da produção, promovendo processos produtivos mais eficientes e ambientalmente responsáveis. Isso é evidenciado, por exemplo, nas diretrizes do Art. 3º, que buscam a eliminação da poluição e a redução da geração de rejeitos e resíduos (inciso I), bem como a promoção da produção e do consumo sustentáveis (inciso V). Além disso, o Art. 4º, inciso II, estabelece como objetivos o fomento à inovação e à capacitação para o redesenho circular, incluindo a criação de programas para empresas adotarem práticas circulares e o incentivo à pesquisa e desenvolvimento para a circularidade.

Além disso, a ENEC incorpora elementos de justiça social ao estabelecer que a transição para a economia circular deve ser inclusiva, equitativa e promotora de empregos decentes. Essa intenção é claramente estabelecida no Art. 3º, inciso VII, que define como diretriz "a garantia de uma transição justa, inclusiva e equitativa, que aborde disparidades de gênero, de raça, de etnia e socioeconômicas". Para concretizar essa diretriz, o Art. 4º, inciso V, propõe a articulação interfederativa e o envolvimento de trabalhadores da economia circular, por meio de ações como a incorporação de trabalhadores informais às cadeias de valor circulares (alínea 'a'), o fomento a políticas públicas de coleta e triagem, incentivos a cadeias produtivas e industriais de reciclagem e a valorização de catadoras e catadores de materiais recicláveis (alínea 'b').

3.6.3 Plano Nacional de Economia Circular

A execução da ENEC ocorre por meio do PLANEC, elaborado pelos membros do Fórum Nacional de Economia Circular e submetido à consulta pública. O PLANEC estabelece diretrizes que incluem: eliminação da poluição e redução de resíduos; manutenção do valor dos materiais; regeneração ambiental; redução da dependência de recursos naturais; produção e consumo sustentáveis; aumento do ciclo de vida dos materiais; e garantia de uma transição justa e inclusiva.

Seus objetivos incluem criar um ambiente normativo e institucional favorável à economia circular, fomentar inovação, cultura, educação e desenvolvimento de competências, reduzir o uso de recursos e a geração de resíduos, propor instrumentos financeiros de apoio à economia circular e promover articulação interfederativa e o envolvimento de trabalhadores da economia circular. A proposta de modelo circular no Brasil busca enfrentar, de forma transversal e sistêmica, crises ambientais e sociais, interagindo com políticas públicas já existentes, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

O PLANEC é um documento estratégico que reflete a mobilização do setor industrial e a visão da Confederação Nacional da Indústria (CNI) sobre a transição econômica. A relevância do PLANEC e a atuação institucional são destacadas por Davi Bomtempo, superintendente de Meio Ambiente e Sustentabilidade da CNI, em entrevista concedida à Agência de Notícias da Indústria:

A construção do PLANEC é resultado de um esforço coletivo que reconhece o papel estratégico da indústria na transição para um modelo econômico mais sustentável. A atuação da CNI no Eixo 1

busca garantir segurança jurídica, coerência normativa e estímulos concretos à adoção de práticas circulares pelas empresas brasileiras.

Conforme Carvalho (2025), o posicionamento da CNI sublinha a importância da segurança jurídica e dos incentivos para que a Economia Circular avance no país.

3.6.4 Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono

A Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024, institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, criando a PNHBC, seus princípios, objetivos, instrumentos e incentivos, além de estabelecer o Regime Especial de Incentivos (Rehidro) e o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). A PNHBC integra a Política Energética Nacional e busca consolidar o hidrogênio como vetor estratégico para a descarbonização da matriz energética, o fortalecimento da indústria nacional e a competitividade internacional.

Os princípios da PNHBC incluem a neutralidade tecnológica, a inserção competitiva do hidrogênio na matriz energética, previsibilidade regulatória, uso racional da infraestrutura existente e fomento à pesquisa e desenvolvimento. Entre seus objetivos destacam-se: incentivar diferentes rotas de produção, promover sustentabilidade e empregos na cadeia produtiva, ampliar aplicações energéticas e industriais, valorizar o hidrogênio para o mercado interno e exportação, proteger consumidores, reduzir emissões de GEE, estimular a livre concorrência, atrair investimentos nacionais e estrangeiros e fomentar a produção de fertilizantes nitrogenados com hidrogênio de baixa emissão de carbono, garantindo segurança alimentar.

A produção e o uso do hidrogênio de baixa emissão de carbono seguem conceitos definidos em lei, incluindo análise do ciclo de vida das emissões, cadeia de custódia, certificação e classificação do hidrogênio em categorias como hidrogênio renovável e hidrogênio verde. A certificação é realizada por empresas credenciadas e supervisionada por autoridades reguladoras, com emissão de certificados que informam a intensidade de emissões de GEE, garantindo rastreabilidade, transparência e confiabilidade.

A lei também estabelece instrumentos de política, como o PNH2, o PHBC, o Rehidro e incentivos fiscais, financeiros e regulatórios, além de mecanismos de cooperação público-privada para pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

De acordo com o *Client Alert* publicado pelo escritório de advocacia Demarest (2024), embora o Brasil já conte com bilhões de reais em projetos de hidrogênio em desenvolvimento, a existência do Marco Legal, por si só, é insuficiente. O texto aponta que o fator essencial

para que o hidrogênio de baixa emissão de carbono alcance seu potencial é a consolidação de um quadro regulatório claro, previsível e que garanta segurança jurídica. Essa clareza normativa é vista como a chave para atrair e sustentar investimentos, tanto nacionais quanto estrangeiros, e para permitir que o país estabeleça os padrões de qualidade e certificação necessários para competir no mercado internacional.

3.6.5 Plano de Trabalho Trienal do PNH2

Para operacionalizar as diretrizes da Política Nacional do Hidrogênio, o governo federal instituiu o Plano de Trabalho Trienal (2023-2025) do PNH2. Este documento funciona como o braço executivo da política, detalhando as ações, os atores responsáveis e os prazos para "promover o desenvolvimento da economia do hidrogênio no país nos próximos anos" (PTTPNH2, 2023, p. 24).

A governança do plano é estruturada em torno do Comitê Gestor (Coges-PNH2) e dividida em cinco Câmaras Temáticas. Estas câmaras são instâncias operacionais coordenadas por diferentes ministérios, com o objetivo de tratar de questões específicas e subsidiar as decisões do comitê. A autonomia para "promover discussões com diversos atores, não se restringindo ao nível governamental" (PTTPNH2, 2023, p. 22) indica um modelo de governança aberto à participação da sociedade civil e do setor privado.

As cinco Câmaras Temáticas e seus objetivos revelam as frentes de trabalho prioritárias do programa:

- A Câmara Temática de Fortalecimento das Bases Científico-Tecnológicas, coordenada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), tem como objetivo central "apoiar a pesquisa, o desenvolvimento tecnológico, a inovação e o empreendedorismo" (PTTPNH2, 2023, p. 25) em toda a cadeia de valor do hidrogênio.
- A Câmara Temática de Capacitação de Recursos Humanos, sob a coordenação do Ministério da Educação (MEC), visa "desenvolver recursos humanos nacionais com competências para planejamento, licenciamento, implantação e operação de projetos" (PTTPNH2, 2023, p. 26), atacando um dos gargalos para a implementação de novas tecnologias.
- A Câmara Temática de Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo, coordenada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), foca em "aperfeiçoar o arcabouço institucional, legal e infralegal" (PTTPNH2, 2023, p. 29), buscando criar a segurança jurídica necessária para atrair investimentos.

- A Câmara Temática de Neointustrialização, Mercado e Competitividade, liderada pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), tem a meta de "desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil e a inserção internacional do país em bases economicamente competitivas" (PTTPNH2, 2023, p. 31).
- A Câmara Temática de Planejamento Energético, também com o MME, objetiva "aprimorar a representação e a modelagem da cadeia energética do hidrogênio" (PTTPNH2, 2023, p. 28) nos instrumentos de planejamento oficial, garantindo sua integração à matriz energética nacional.

3.6.6 Estratégia Nacional de Bioeconomia

Instituída pelo Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024, a ENB tem como finalidade “coordenar e implementar as políticas públicas destinadas ao desenvolvimento da bioeconomia, em articulação com a sociedade civil e o setor privado” (ENB, 2024, p. 1). Conforme o decreto, a bioeconomia é definida como um modelo de desenvolvimento "baseado em valores de justiça, ética e inclusão, que utiliza recursos naturais de maneira sustentável, regenerativa e conservacionista, integrando conhecimentos científicos e tradicionais para gerar bens, serviços e benefícios socioeconômicos" (ENB, 2024, p. 1).

Almeida et al. (2025) propõem um *framework* analítico denominado “Ciclo da Bioeconomia”, que organiza o setor em sete etapas interdependentes: Bioprodução, Biorrecursos, Biotecnologia, Bioinovação, Bionegócios, Sociobiodiversidade e Bioecologia, articuladas por um pilar transversal de Biogovernança. Esse modelo visa oferecer uma estrutura conceitual capaz de favorecer a compreensão sistêmica e o desenvolvimento integrado da bioeconomia. Conforme observam os autores, o próprio conceito da ENB contempla, ainda que de forma distinta, todas as etapas delineadas no Ciclo da Bioeconomia.

As diretrizes da ENB fornecem o suporte estratégico para a transição para uma economia de base biológica. Entre as mais relevantes para este trabalho, destacam-se:

- O estímulo à descarbonização de processos produtivos e à promoção de sistemas de produção sustentáveis;
- O fortalecimento da competitividade da produção nacional de base biológica;
- O estímulo às atividades de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação;
- A articulação e cooperação entre os setores público, privado e acadêmico.

A governança da estratégia é centralizada na Comissão Nacional de Bioeconomia (CNBio), um órgão de caráter deliberativo e consultivo com composição paritária entre

governo e sociedade civil. A principal atribuição da CNBio é a elaboração e o monitoramento do Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia (PNDBio), o instrumento que operacionalizará a estratégia, detalhando ações, metas e fontes de financiamento, com previsão de conclusão até setembro de 2025. O PNDBio será estruturado em quatro eixos temáticos principais: Bioindústria e Biomanufatura (desenvolvimento de tecnologias sustentáveis), Biomassa (uso sustentável de recursos biológicos), Ecossistemas Terrestres e Aquáticos (conservação e manejo), e Sociobioeconomia (promoção da inclusão social).

4. METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa e exploratória, baseada na análise documental. De acordo com Gil (2008), as pesquisas exploratórias têm como principal objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias. O método empregado é a Análise de Conteúdo (AC), conforme proposto por Bardin (2016), que permite a análise sistemática de comunicações. O percurso metodológico segue as três fases:

1. **Pré-análise** – Fase de organização do material, que consistiu na seleção e leitura flutuante do *corpus*. O *corpus* desta pesquisa é composto por seis (6) documentos estratégicos nacionais, escolhidos por representarem os pilares que sustentam a questão de pesquisa: ENB, ENEC, PLANEC, PNF, PNHBC e o PTTPNH2;
2. **Exploração do material** – Etapa de codificação e categorização dos documentos, operacionalizada com o suporte do *software* de análise qualitativa *MAXQDA*. A partir de uma codificação inicial *in-vivo*, que gerou 593 códigos, os trechos relevantes (unidades de registro) foram agrupados e analisados em duas camadas:
 - a. Codificação Temática Interpretativa: As unidades de registro foram classificadas em um "livro de códigos" com 11 categorias analíticas, criadas para expressar a intenção do texto. As categorias e suas definições são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Livro de códigos analíticos

| Código Analítico | Definição |
|-----------------------------------|--|
| Inovação e P&D | Foco no desenvolvimento de novas tecnologias, produtos, processos e patentes. A "coisa" nova. |
| Capacitação e Formação | Foco na formação e treinamento de pessoas (capital humano). |
| Mercado e Competitividade | Dinâmica de mercado: preços, concorrência, oferta, demanda, viabilidade econômica, exportação, importação, ambiente de negócios. |
| Infraestrutura e Logística | Meios físicos para produção e escoamento da produção. |
| Regulação e Governança | Estruturas de poder, leis, normas e articulação institucional. |
| Incentivos e Financiamento | Mecanismos financeiros, fiscais e de fomento para viabilizar projetos. |
| Uso de Resíduos e Circularidade | Uso de matéria-prima renovável e aplicação de conceitos da economia circular. |
| Segurança de Suprimento | Garantia de fornecimento de matéria-prima e redução da dependência externa. |
| Sustentabilidade e Externalidades | Impactos e benefícios ambientais e sociais dos projetos. |
| Certificação e Qualidade | Padronização, validação e certificação de produtos e processos. |
| Inclusão Social e Trabalho | Dimensões humanas, sociais e trabalhistas. |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

- b. Classificação de Valência: Em seguida, cada trecho codificado foi avaliado focando no impacto específico para a produção de fertilizantes a partir do hidrogênio de biomassa. O sentido do trecho foi classificado como “Potencialidade”, “Fragilidade” ou “Mista”. Os critérios para cada categoria de classificação de valência são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Definição das classificações de valência

| Classificação | Definição e critério de aplicação |
|----------------------|---|
| Potencialidade | Refere-se a trechos que indicam oportunidades reais, incentivos diretos, diretrizes favoráveis ou sinergias com a rota tecnológica proposta. Inclui menções a fomento, criação de mercados, alinhamento estratégico com a bioeconomia e reconhecimento explícito da biomassa como insumo valioso. Representa os elementos do arcabouço político que impulsionam a viabilidade do projeto. |
| Fragilidade | Refere-se a trechos que apontam barreiras, lacunas, riscos ou desafios explícitos. Também inclui diretrizes que, embora reconheçam um problema, não apresentam ações concretas ou mecanismos de implementação para resolvê-lo, permanecendo no campo do diagnóstico vago. Abrange ainda o fortalecimento de rotas concorrentes que diminuem a competitividade da biomassa. |
| Mista | Refere-se a trechos que apresentam uma dualidade intrínseca ou ambiguidade. São diretrizes que contêm, simultaneamente, elementos positivos e negativos, ou onde um incentivo aparente pode gerar consequências não intencionais desfavoráveis. |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3. **Tratamento e interpretação** – Fase final de análise, na qual os dados categorizados são sistematizados para identificar padrões, tendências, convergências e lacunas, permitindo a interpretação dos resultados e a resposta à questão de pesquisa.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 PANORAMA QUANTITATIVO DOS RESULTADOS

Como primeiro passo da análise, realizou-se uma contagem da frequência de cada código analítico, a fim de identificar os temas mais proeminentes no texto das políticas públicas analisadas. Os resultados desta análise de frequência são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Frequência dos Códigos Analíticos no *Corpus* Documental

| Código analítico | Contagem |
|-----------------------------------|-----------------|
| Inovação e P&D | 117 |
| Regulação e Governança | 98 |
| Mercado e Competitividade | 98 |
| Incentivos e Financiamento | 76 |
| Uso de Resíduos e Circularidade | 51 |
| Infraestrutura e Logística | 43 |
| Sustentabilidade e Externalidades | 40 |
| Capacitação e Formação | 30 |
| Segurança de Suprimento | 19 |
| Certificação e Qualidade | 16 |
| Inclusão Social e Trabalho | 5 |
| Total | 593 |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise da frequência dos códigos revela um foco significativo dos documentos em três pilares centrais: Inovação e P&D (117 ocorrências), Regulação e Governança (98 ocorrências) e Mercado e Competitividade (98 ocorrências). Isso indica que o discurso político está primariamente concentrado em estabelecer as bases tecnológicas, normativas e econômicas para o desenvolvimento de novas cadeias de valor.

Temas instrumentais como Incentivos e Financiamento (76) e Uso de Resíduos e Circularidade (51) aparecem em seguida, destacando-se como mecanismos cruciais para a implementação prática das estratégias. Em contrapartida, temas com um foco mais social ou de longo prazo, como Segurança de Suprimento (19) e, notadamente, Inclusão Social e Trabalho (5), apresentam uma frequência expressivamente menor, sugerindo uma priorização secundária nos textos estratégicos analisados.

Para aprofundar a análise e compreender como as classificações de valência (Potencialidade, Fragilidade, Mista) se distribuem entre os diferentes temas abordados, foram elaboradas tabelas de contingência. Na Tabela 2, nota-se que o PNF é a principal fonte de potencialidades relacionadas a Incentivos e Financiamento, enquanto o PTPNH2 concentra as oportunidades em Inovação e P&D. Isso sugere uma divisão de foco, onde o PNF se preocupa mais com os mecanismos de viabilização econômica, e o PNH2 com o desenvolvimento tecnológico.

Tabela 2 - Distribuição das Potencialidades por Código Analítico e Documento

| | ENB | ENEC | PTTPNH2 | PLANEC | PNF | PNHBC | Total |
|-----------------------------------|-----|------|---------|--------|-----|-------|-------|
| Potencialidade | 19 | 36 | 91 | 96 | 191 | 26 | 459 |
| Capacitação e Formação | 1 | 1 | 9 | 6 | 9 | | 26 |
| Certificação e Qualidade | | 1 | 2 | 6 | 4 | 2 | 15 |
| Incentivos e Financiamento | 3 | 9 | 4 | 16 | 34 | 2 | 68 |
| Inclusão Social e Trabalho | | 2 | | 3 | | | 5 |
| Infraestrutura e Logística | 1 | 1 | 6 | 3 | 9 | 3 | 23 |
| Inovação e P&D | 7 | 3 | 26 | 11 | 44 | 3 | 94 |
| Mercado e Competitividade | 2 | 1 | 19 | 1 | 29 | 6 | 58 |
| Regulação e Governança | 2 | 2 | 22 | 22 | 26 | 5 | 80 |
| Segurança de Suprimento | | 1 | | | 5 | 1 | 7 |
| Sustentabilidade e Externalidades | | 7 | 2 | 9 | 14 | 4 | 36 |
| Uso de Resíduos e Circularidade | 3 | 8 | 1 | 19 | 17 | | 48 |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 2 apresenta uma análise quantitativa que permite visualizar a frequência das potencialidades identificadas no *corpus* documental. Para complementar essa visão geral e aprofundar a compreensão dos resultados, torna-se essencial examinar a natureza qualitativa dos achados. Nesse sentido, o Quadro 6 foi elaborado com o propósito de qualificar os dados, reunindo trechos representativos que exemplificam o conteúdo textual codificado como potencialidade em cada dimensão analítica.

Quadro 6 - Exemplos qualitativos das potencialidades

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|---|----------------------------|---|
| ENB | “Formação e capacitação profissional, promoção do empreendedorismo e geração de novos empregos para os diferentes segmentos da bioeconomia” (ENB, 2024, p. 1) | Capacitação e Formação | A capacitação da mão de obra é um fator determinante para o desenvolvimento de uma nova cadeia de valor, como a do hidrogênio de biomassa para a produção de fertilizantes. |
| PLANECS | “Articular as iniciativas privadas de economia circular ao Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), conforme disposto na Lei Federal nº 15.042/2024, reconhecendo a economia circular como estratégia eficaz de mitigação de emissões de gases de efeito estufa e como potencial geradora de ativos negociáveis no âmbito do SBCE”. (PLANECS, 2025, p. 41) | Certificação e Qualidade | Essa integração confere credibilidade e reconhecimento no mercado, estimula a padronização e transparência na mitigação de GEE, e abre portas para investimentos verdes. |
| PNF | “Ação 130 - Atração de investimentos para a instalação de unidades de nitrogenados baseadas em amônia verde/azul” (PNF, 2021, p. 148) | Incentivos e Financiamento | Faz parte da “Meta 22 - Criação de mecanismos de fomento do mercado estimulando a diversificação de matérias-primas (<i>feedstocks</i>) para a produção de fertilizantes nitrogenados, conectada à cadeia do hidrogênio verde e biometano, considerando um plano de adição de 5% em massa de “amônia verde equivalente” por ano a partir de 2027 e chegando a 20% em 2030” (PNF, 2021, p. 148) |
| PLANECS | “EIXO 5: Promover a articulação interfederativa e o envolvimento de trabalhadoras e trabalhadores da Economia Circular”. (PLANECS, 2025, p. 43) | Inclusão Social e Trabalho | Sinaliza um reconhecimento da importância do capital humano e da força de trabalho no sucesso da transição para a bioeconomia circular |
| PLANECS | “A nova NDC do Brasil, submetida em 2024, indica como um dos objetivos da Estratégia Nacional de Mitigação “promover a circularidade por meio do uso sustentável e eficiente de recursos naturais ao longo das cadeias produtivas”” (PLANECS, 2025, p. 21) | Infraestrutura e Logística | Compromisso internacional que dá força a propostas de economia circular. |

Quadro 6 - Exemplos qualitativos das potencialidades

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|---|-----------------------------------|--|
| PNF | “Meta 15 - Aumentar a oferta de novos produtos oriundos das cadeias emergentes em pelo menos 20% para 2025, 50% para 2030, 100% para 2040 e 200% até 2050” (PNF, 2021, p. 145) | Mercado e Competitividade | A rota de H2 de biomassa é uma "cadeia emergente" e esta meta apoia seu desenvolvimento. |
| PLANEBC | “Harmonização das regulamentações vigentes: promover a revisão e atualização dos instrumentos legais e normativos estabelecidos, assegurando a coerência da base regulatória relacionada às práticas circulares e fortalecendo a segurança jurídica”. (PLANEBC, 2025, p. 28) | Regulação e Governança | A harmonização e coerência das normas fortalece a segurança jurídica, um pilar crucial para atrair investimentos e facilitar a adoção de novas tecnologias (hidrogênio musgo) na Bioeconomia Circular. Reduz a incerteza regulatória. |
| PNHBC | “Fomentar o desenvolvimento da produção nacional de fertilizantes nitrogenados provenientes do hidrogênio de baixa emissão de carbono com o objetivo de reduzir a dependência externa e de garantir a segurança alimentar”. (PNHBC, 2024, p. 2). | Segurança de Suprimento | Busca diretamente o objetivo central da categoria "Segurança de Suprimento": reduzir a dependência externa de fertilizantes. Ao fomentar a produção nacional via hidrogênio de baixa emissão de carbono (como o musgo), busca criar uma fonte alternativa e estável para um insumo crítico, fortalecendo a autonomia e garantindo a segurança alimentar. |
| PTTPNH2 | Uma produção mais limpa, com baixa intensidade de carbono associado, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos ambientais internacionais assumidos pelo Brasil. (PTTPNH2, 2023, p. 6). | Sustentabilidade e Externalidades | O trecho, proveniente da mensagem do Comitê Gestor, demonstra o interesse em alinhar-se a compromissos globais de sustentabilidade. |
| ENB | “Descarbonização de processos produtivos e promoção de sistemas de produção e processamento de biomassa que não gerem conversão de vegetação nativa original”. (ENB, 2024, p. 1) | Uso de Resíduos e Circularidade | A proibição da conversão de vegetação nativa estabelece uma consonância entre o uso da biomassa, os princípios fundamentais da economia circular e a descarbonização. Dessa forma, representa um avanço regulatório que favorece essa rota tecnológica. |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise dos exemplos qualitativos (Quadro 6) indica que, embora o arcabouço político-regulatório cumpra sua função de estabelecer diretrizes estratégicas, ele apresenta uma lacuna crítica de instrumentalização. As menções à Bioeconomia Circular e ao hidrogênio derivado de biomassa permanecem em um nível de abstração que, desacompanhado de mecanismos operacionais subsequentes, compromete a efetividade da política.

Percebe-se a ausência de instrumentos concretos para a implementação, como linhas de crédito específicas, incentivos fiscais que realmente priorizem as rotas renováveis ou a criação de novos marcos regulatórios capazes de superar as tecnologias já consolidadas. Essa característica gera um desequilíbrio: apesar de criar um ambiente de oportunidades no papel, o conjunto de políticas não apresenta a força executiva e a alocação orçamentária necessárias. Tal lacuna na operacionalização dificulta o avanço e reforça as fragilidades estruturais, especialmente o conflito estratégico com as políticas que continuam a favorecer os combustíveis fósseis.

A distribuição detalhada das fragilidades identificadas no corpus documental é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição das Fragilidades por Código Analítico e Documento

| | ENB | ENEC | PTTPNH2 | PLANEC | PNF | PNHBC | Total |
|-----------------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|-------|-------|
| Fragilidade | 9 | 1 | 68 | 4 | 82 | | |
| Capacitação e Formação | | | 1 | 2 | | | 3 |
| Certificação e Qualidade | | | | | | 1 | 1 |
| Incentivos e Financiamento | | | | | 3 | | 3 |
| Infraestrutura e Logística | 1 | | | | 10 | | 11 |
| Inovação e P&D | 2 | | | | 9 | | 11 |
| Mercado e Competitividade | 5 | | | | 25 | 1 | 31 |
| Regulação e Governança | 1 | | | | 8 | 1 | 10 |
| Segurança de Suprimento | | | | | 7 | 1 | 8 |
| Sustentabilidade e Externalidades | | | | | 2 | | 2 |
| Uso de Resíduos e Circularidade | | | | | 2 | | 2 |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Nota-se que o código Mercado e Competitividade se destaca negativamente, concentrando 31 de 82 Fragilidades identificadas no *corpus*. Esse dado revela que, embora

haja um forte estímulo à inovação e ao uso de novas fontes, os próprios documentos reconhecem que as barreiras de mercado e os desafios de competitividade são os principais obstáculos a serem superados. Notavelmente, a maior parte dessas fragilidades, especialmente as que abordam a concorrência com o gás natural, está concentrada no PNF. Isso sugere que o PNF, embora seja o documento mais propositivo, é também o que apresenta o diagnóstico mais realista sobre os desafios de competitividade do setor.

O Quadro 7 aprofunda essa constatação ao expor qualitativamente a natureza desses obstáculos. Os exemplos revelam uma tensão crítica no arcabouço político: enquanto se propõe a inovação, ações como a “conclusão de rotas de escoamento de gás natural para aumento da disponibilidade de gás natural” (PNF, 2021, p. 136) são classificadas nesta análise como fragilidades por fortalecerem a competitividade da rota tecnológica concorrente no curto prazo. Essa evidência sugere que a principal barreira não é a ausência de políticas, mas a coexistência de diretrizes conflitantes que disputam os mesmos recursos de investimento. Não obstante, cabe a ressalva de que essa fragilidade pode ser mitigada ou contraexplorada futuramente: a infraestrutura física de gasodutos, embora motivada pelo gás natural, possui potencial técnico para o transporte de biometano, dependendo, contudo, de regulação específica para garantir o acesso de renováveis à rede.

Quadro 7 - Exemplos qualitativos das fragilidades

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|--|----------------------------|---|
| PNF | “Entretanto, para que as temáticas elencadas acima se desenvolvam no Brasil, atenção deve ser dada à formação de capital humano no setor de fertilizantes e nutrição de plantas. Embora não haja dados estatísticos que envolvam todos os cursos de Agronomia do País, um levantamento preliminar realizado em universidades brasileiras constatou que a maioria das iniciativas nesse sentido são ainda muito pontuais e, predominantemente, concentradas nas regiões Sul e Sudeste do País. Desse modo, evidencia-se a necessidade de criação de um programa de formação de RH que abarque todas as regiões/estados brasileiros”. (PNF, 2021, p. 96) | Capacitação e Formação | A fragilidade reside na ausência de medidas corretivas. Embora o plano diagnostique corretamente a escassez de capital humano, ele não apresenta mecanismos concretos, metas quantitativas ou fontes de financiamento específicas para reverter esse quadro no curto prazo, mantendo o gargalo sem solução prática. |
| PNHBC | “Os certificados de hidrogênio emitidos para o hidrogênio produzido no território nacional deverão resguardar a integralidade ambiental, assegurada a inexistência de dupla contagem”. (PNHBC, 2024, p. 7) | Certificação e Qualidade | A preocupação explícita com a "inexistência de dupla contagem" revela um risco e uma complexidade no processo de certificação. |
| PNF | “A compreensão sobre economia circular ainda é difusa. Modelos de produção e consumo são lineares e de curto prazo, e incentivos são insuficientes para o setor empresarial e consumidores se engajarem” (PNF, 2021, p. 110) | Incentivos e Financiamento | A fragilidade reside na insuficiência de incentivos e financiamento para superar a compreensão difusa e a inércia dos modelos lineares. A falta de engajamento de empresas e consumidores limita a viabilidade e o investimento em rotas circulares, como o hidrogênio musgo. |
| PNF | “Ação 4 - Conclusão de rotas de escoamento de gás natural para aumento da disponibilidade de gás natural” (PNF, 2021, p. 136) | Infraestrutura e Logística | No curto prazo, amplia a hegemonia do gás natural. Embora a infraestrutura seja tecnicamente apta para o biometano, a ausência de garantias regulatórias ou mandatos de injeção gera o risco de perpetuar a dependência da rota fóssil, em vez de assegurar a transição para renováveis. |
| PTTPNH2 | “A concretização do uso energético do hidrogênio como vetor apresenta ainda significativos desafios tecnológicos e de mercado ao longo de toda a sua cadeia energética (produção, transporte, armazenamento e consumo), impondo a necessidade de um olhar estruturado em torno do desenvolvimento deste mercado”. (PTTPNH2, 2023, p. 9). | Inovação e P&D | Essa característica representa uma fragilidade no campo de Inovação e P&D, visto que exige um esforço de pesquisa mais estruturado para superar as barreiras existentes e concretizar o desenvolvimento da inovação tecnológica. |

Quadro 7 - Exemplos qualitativos das fragilidades

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|---|-----------------------------------|--|
| PTTPNH2 | “Atenção especial deve ser dada ao hidrogênio produzido a partir da eletrólise da água com base em renováveis (conhecido como hidrogênio verde), que até a presente data ainda não se mostra competitivo”. (PTTPNH2, 2023, p. 20). | Mercado e Competitividade | Revela que as rotas renováveis enfrentam um desafio estrutural de preço perante o insumo fóssil dominante, limitando a atração de capital. |
| PNF | “Em 8 de abril de 2021, foi sancionada a Lei nº 14.134/2021, também conhecida como a Nova Lei do Gás. O novo marco legal estabelece uma estrutura mais eficiente, dinâmica e atualizada para a indústria do gás natural, com base na experiência internacional, e consolida mudanças que já estavam ocorrendo no setor, de modo a atrair novos investimentos e promover a competição desse energético”. (PNF, 2021, p. 122) | Regulação e Governança | A "Nova Lei do Gás" fortalece a rota concorrente, representando um desafio para a competitividade da biomassa. |
| PNF | “Meta 13 - Garantir a oferta de fertilizantes por meio da diversificação de fornecedores internacionais, além do estímulo à indústria nacional até 2030” (PNF, 2021, p. 143) | Segurança de Suprimento | A meta foca primariamente em diversificar a importação, não em substituir pela produção nacional, perpetuando a dependência. |
| PNF | “Formalmente não há comprometimento do setor de fertilizantes com metas de redução de emissões, e sua participação é indireta, considerando, nesse caso, os compromissos de estado ou voluntários relacionados ao setor agropecuário” (PNF, 2021, p. 110) | Sustentabilidade e Externalidades | A falta de metas formais de descarbonização para o setor é uma fragilidade, pois reduz a pressão para a transição para rotas mais limpas. |
| PNF | “Ainda são necessárias informações regionalizadas sobre a disponibilidade de resíduos e seus atributos de interesse agrícola e de segurança ambiental, assim como um diagnóstico mais amplo de iniciativas de compostagem no Brasil e formas para que seja processado um volume maior de resíduos, o que pode ser feito por meio do fortalecimento de soluções consorciadas entre municípios de pequeno e médio porte”. (PNF, 2021, p. 69) | Uso de Resíduos e Circularidade | Aponta diretamente para a falta de dados sobre disponibilidade de biomassa/resíduos, uma fragilidade crítica para o planejamento de qualquer planta. |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Além das potencialidades e fragilidades diretas, a análise de conteúdo revelou um conjunto significativo de trechos de natureza ambígua, classificados como “Mista”. Esta categoria foi atribuída a trechos que, em sua formulação, contém uma dualidade intrínseca, apresentando simultaneamente elementos que podem ser interpretados como oportunidades e como barreiras para o desenvolvimento da rota de hidrogênio de biomassa. A Tabela 4 detalha os principais trechos de caráter misto.

Tabela 4 - Distribuição dos Trechos categorizados por Mistos por Código Analítico e Documento

| | ENB | ENEC | PTTPNH2 | PLANEC | PNF | PNHBC | Total |
|-----------------------------------|----------|------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| Mista | 1 | | 10 | 3 | 33 | 5 | 52 |
| Capacitação e Formação | | | 1 | | | | 1 |
| Incentivos e Financiamento | | | | 1 | 2 | 2 | 5 |
| Infraestrutura e Logística | | | 1 | | 8 | | 9 |
| Inovação e P&D | 1 | | 3 | | 8 | 1 | 12 |
| Mercado e Competitividade | | | | | 8 | 1 | 9 |
| Regulação e Governança | | | 4 | 2 | 2 | | 8 |
| Segurança de Suprimento | | | | | 3 | 1 | 4 |
| Sustentabilidade e Externalidades | | | 1 | | 1 | | 2 |
| Uso de Resíduos e Circularidade | | | | | 1 | | 1 |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A análise destes trechos é de suma importância, pois é neles que as tensões, os *trade-offs* e as consequências não intencionais das políticas públicas se tornam mais evidentes. Eles expõem, por exemplo, como um incentivo genérico pode inadvertidamente favorecer uma rota tecnológica concorrente, ou como a solução para um problema pode criar um novo desafio. O Quadro 8 ilustra essa dualidade com exemplos concretos.

Quadro 8 - Exemplos qualitativos dos trechos mistos

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|--|----------------------------|--|
| PTTPNH2 | “Conhecer a caracterização de processos e demanda atual por profissionais na área de hidrogênio, de forma a permitir projetar demanda futura. Conhecer os perfis mais necessários de forma a permitir ações para formação dos profissionais envolvidos”. (PTTPNH2, 2023, p. 50). | Capacitação e Formação | Aponta para uma Fragilidade (a falta de conhecimento sobre a demanda de profissionais) e uma Potencialidade (a ação de mapear essa demanda). |
| PNHBC | “Atrair e incentivar investimentos nacionais e estrangeiros para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados”. (PNHBC, 2024, p. 2). | Incentivos e Financiamento | O incentivo é positivo (Potencialidade), mas por ser genérico, pode acabar favorecendo rotas concorrentes com mais escala, como solar e eólica (Fragilidade). |
| PNF | Meta 26 - Reduzir os custos de transporte em 15% até 2030, 30% até 2040 e 50% até 2050, incentivando a multimodalidade e a interiorização logística”. (PNF, 2021, p. 150) | Infraestrutura e Logística | "Reduzir custos" é uma Potencialidade. Mas melhorias logísticas gerais podem favorecer mais o produto importado. "Interiorização" pode favorecer a biomassa. |
| PNF | “Ação 133 - Integração da cadeia de fertilizantes com soluções energéticas aproveitando o potencial de geração de energia limpa (potencial eólico / solar) para produção de hidrogênio / amônia verde, via rotas de eletrólise (ou processos correlatos)”. (PNF, 2021, p. 148) | Inovação e P&D | Representa uma potencialidade considerável por concentrar-se na amônia verde. Contudo, é uma fragilidade por mencionar explicitamente apenas as rotas eólica/solar, desconsiderando e potencialmente marginalizando a rota de biomassa. |
| PNF | “Ação 2 - Atração de mais dois agentes produtores de nitrogênio fertilizante no Brasil até 2030 e mais quatro até 2050”. (PNF, 2021, p. 136) | Mercado e Competitividade | A entrada de novos players é uma 'Potencialidade', mas se usarem a rota do gás natural, aumentam a competição para a biomassa ('Fragilidade'). |
| PTTPNH2 | “Do ponto de vista quantitativo, os percentuais mínimos de redução de emissões em relação ao hidrogênio de referência (obtido pela reforma a vapor do gás natural sem captura de carbono) e a fronteira de sistema considerada serão definidas em regulamento, com abordagem pragmática para não criar barreiras ao desenvolvimento do mercado e permitir a progressiva redução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do hidrogênio”. (PTTPNH2, 2023, p. 19). | Regulação e Governança | O trecho é misto porque, como potencialidade, estabelece a base de governança para a descarbonização (definindo percentuais de emissões e fronteira de sistema). Contudo, é uma fragilidade regulatória, pois os percentuais cruciais de redução serão definidos em regulamento futuro. Essa indefinição atual gera incerteza jurídica e atrasa a segurança necessária para o desenvolvimento pleno do novo mercado. |

Quadro 8 - Exemplos qualitativos dos trechos mistos

| Fonte | Segmento | Código Analítico | Análise |
|---------|--|-----------------------------------|--|
| PNHBC | “Fomentar a cadeia nacional de suprimento de insumos e de equipamentos para fabricação do hidrogênio de baixa emissão de carbono”. (PNHBC, 2024, p. 2). | Segurança de Suprimento | O fomento nacional é uma Potencialidade, pois reduz a dependência externa de insumos. Contudo, é uma Fragilidade se a cadeia (de equipamentos/insumos) for incipiente ou não incluir a rota da biomassa. |
| PTTPNH2 | Impactos socioambientais e sobre recursos hídricos decorrentes da produção, transporte, armazenamento, conversão e uso de hidrogênio e de seus derivados; (PTTPNH2, 2023, p. 29). | Sustentabilidade e Externalidades | Aponta a necessidade de analisar impactos, que podem ser positivos (Potencialidade para a biomassa, se bem gerida) ou negativos (Fragilidade). |
| PNF | “No cenário atual, a cadeia de fertilizantes à base de subprodutos e resíduos, principalmente os urbanos, não está consolidada. Ainda é necessário o desenvolvimento de uma base de informação mais ampla e investimentos em pesquisa, mas o principal para seu crescimento é o estímulo por meio de políticas públicas, o que tem sido recorrente em outros países, destacando-se a comunidade europeia, conforme apresentado no <i>benchmarking</i> . Nesse sentido, o Plano Nacional de Fertilizantes brasileiro deve ser o principal incentivador para a consolidação do aproveitamento de subprodutos na fertilização e/ou condicionamento de solos agrícolas”. (PNF, 2021, p. 76) | Uso de Resíduos e Circularidade | A cadeia "não consolidada" é uma Fragilidade. A necessidade de "estímulo por políticas" é um chamado à ação, uma Potencialidade se atendido. A fragilidade reside na cadeia produtiva "não consolidada". A necessidade de "estímulo por políticas" representa um potencial a ser explorado caso sejam implementadas ações adequadas. |

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.2 POTENCIALIDADES

A potencialidade mais fundamental, que serve de alicerce para toda a tese, é o explícito reconhecimento da biomassa e dos resíduos como matérias-primas estratégicas para a bioeconomia nacional.

O PNF afirma que "a valorização de biomassas residuais de processos agroindustriais, industriais e/ou urbanos é fortemente indicada como alternativa viável para compor o setor de fertilizantes" (PNF, 2021, p. 103). Essa diretriz é quantificada na Meta 5 do mesmo plano, que estabelece o objetivo de "reaproveitar os resíduos sólidos e subprodutos com potencial de uso agrícola para a produção de fertilizantes em, pelo menos, 10% da produção até 2030" (PNF, 2021, p. 138).

Essa visão encontra ressonância nos princípios da economia circular, que permeiam múltiplos documentos. O PLANECS, por exemplo, incentiva "o uso de materiais secundários, subprodutos e coprodutos no processo produtivo industrial" (PLANECS, 2025, p. 29), criando um arcabouço conceitual que legitima a transformação de um "resíduo" em um "recurso". Dessa forma, apontando para uma possível sinergia entre os planos: o que o PNF aponta como uma solução para a dependência de fertilizantes, o PLANECS enquadra como um pilar da nova economia.

A definição legal do hidrogênio na PNHBC. Ao definir o "hidrogênio renovável" como aquele "produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como biogás, biometano" (PNHBC, 2024, p. 3), a PNHBC confere legitimidade regulatória para esta rota tecnológica. Tal enquadramento é de suma importância, pois posiciona a biomassa em pé de igualdade com outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, abrindo caminho para que ela seja contemplada em futuros mecanismos de fomento.

Para viabilizar a implementação, os documentos indicam a criação de mecanismos financeiros. O PNF detalha uma série de ações de alto impacto que funcionam como um roteiro para o investidor. A "adoção de linhas de financiamento e incentivos específicos para a destinação de resíduos e subprodutos para reciclagem como fertilizantes" (PNF, 2021, p. 140) e o "estabelecimento do arcabouço legal com previsão de incentivos fiscais e desoneração de tributos para compra de equipamentos, estabelecimento e operação de empreendimentos para produção de fertilizantes à base de resíduos e subprodutos" (PNF, 2021, p. 140) são exemplos de políticas de fomento direto.

Essa abordagem é reforçada pela PNHBC, que, embora mais ampla, institui o Regime Especial de Incentivos (Rehidro), um guarda-chuva de fomento sob o qual projetos de H₂ de

biomassa podem se abrigar. O PLANECS reforça essa direção ao propor "fontes de financiamento e linhas de crédito específicas para os setores que atuam com biodigestão" (PLANECS, 2025, p. 41), mirando em uma das principais fontes de biogás e biometano, precursores do hidrogênio renovável.

A rota do hidrogênio de biomassa para fertilizantes é intensiva em tecnologia, e os documentos analisados reconhecem que sua viabilização depende de um forte ecossistema de Pesquisa e Desenvolvimento. A PNHBC, por exemplo, estabelece como um de seus princípios "fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados aos usos do hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados para fins energéticos e industriais" (PNHBC, 2024, p. 2), e o PTTPNH₂ eleva o hidrogênio à categoria de "tema prioritário para investimentos" (PTTPNH₂, 2023, p. 20), o que abre portas para o direcionamento de recursos de agências de fomento.

A "Ação 132" do PNF mira no "fomento do desenvolvimento tecnológico para a implantação de plantas de nitrogenados baseadas em hidrogênio verde/azul" (PNF, 2021, p. 148). Embora não especifique a biomassa, ela legitima o objetivo tecnológico. De forma ainda mais direta, o PTTPNH₂ menciona explicitamente a realização de "Estudos de potencial de produção de hidrogênio a partir de biomassa" (PTTPNH₂, 2023, p. 29), o que confirma o lugar desta rota na agenda de pesquisa nacional.

Para além dos incentivos diretos, o arcabouço político busca criar um novo ambiente de negócios. O PNF reconhece que "novas tendências de mercado, como economia circular, agricultura de baixo carbono, análise de ciclo de vida impulsionam o aproveitamento de resíduos como fertilizantes" (PNF, 2021, p. 69). É aqui que emergem duas potencialidades que podem alterar a equação econômica da rota de biomassa. A primeira é a precificação de carbono. A "Ação 76" do PNF propõe a "integração da cadeia de fertilizantes no Mercado de Carbono e Mercado de Sustentabilidade Ambiental (ESG)" (PNF, 2021, p. 143). Para uma rota de baixa emissão como a da biomassa, que utiliza carbono biogênico, isso representa a possibilidade de gerar uma nova e crucial linha de receita por meio da comercialização de créditos de carbono, tornando o projeto mais competitivo frente à rota fóssil.

A segunda potencialidade de mercado identificada refere-se à diferenciação por meio da certificação. A PNHBC institui o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH₂), fundamentado na avaliação da intensidade de emissões de GEE com base em análise de ciclo de vida. A criação desse instrumento constitui uma potencialidade, pois viabiliza o reconhecimento formal do hidrogênio de origem em biomassa como produto de

baixa emissão, agregando legitimidade e valor ambiental ao seu uso na produção de fertilizantes.

Entretanto, a efetividade desse mecanismo como fator de competitividade depende de parâmetros regulatórios ainda indefinidos. A determinação dos limites de emissão que qualificam o hidrogênio como “verde” ou de “baixa emissão” representa um aspecto crítico. Caso o Brasil adote critérios menos restritivos que os de mercados estratégicos, como a União Europeia, o certificado nacional poderá ter reconhecimento limitado, comprometendo o acesso a mercados externos e a obtenção de diferenciais de preço. Dessa forma, a certificação, embora concebida como instrumento de valorização comercial, pode, dependendo de sua regulamentação, restringir-se ao contexto doméstico e reduzir o potencial competitivo da rota de biomassa no cenário internacional.

Finalmente, a "expressiva dependência do agronegócio brasileiro em relação ao produto importado" (PNF, 2021, p. 27) é apresentada como a justificativa central para a instituição do PNF, funcionando como uma potencialidade contextual. Essa vulnerabilidade estratégica cria a urgência política e econômica que serve de argumento central para o fomento de projetos que buscam o desenvolvimento de rotas de produção nacionais.

Nesse sentido, ações que visam criar um "ambiente tributário isonômico entre produtos nacionais e importados" (PNF, 2021, p. 140) e promover "políticas públicas adequadas para o desenvolvimento sustentável do setor" (PNF, 2021, p. 143) são potencialidades habilitadoras. Elas não financiam o projeto diretamente, mas buscam estabelecer o ambiente de negócios, a previsibilidade regulatória e a segurança jurídica consideradas necessárias para atrair os investimentos de longo prazo que uma nova indústria de fertilizantes de base biológica requer.

5.3 FRAGILIDADES E BARREIRAS

A fragilidade mais proeminente e de maior impacto é o contínuo e explícito fortalecimento da rota concorrente baseada no gás natural. Enquanto as políticas acenam para um futuro de baixo carbono, elas simultaneamente implementam ações que reforçam a infraestrutura e a competitividade da economia fóssil. A "Nova Lei do Gás" (Lei nº 14.134/2021) é o exemplo mais claro, sendo descrita no PNF como um marco para "atrair novos investimentos e promover a competição deste energético" (PNF, 2021, p. 122).

Essa diretriz se materializa em ações concretas de alto impacto dentro do PNF, como a "Ação 4 - Conclusão de rotas de escoamento de gás natural para aumento da disponibilidade" (PNF, 2021, p. 136) e a "Ação 6 - Redução de tarifas de transporte de gás natural no Brasil"

(PNF, 2021, p. 136). A dominância desta rota é um fato consolidado, uma vez que 87% do hidrogênio produzido no Brasil atualmente é proveniente da reforma a vapor do gás natural (PTTPNH₂). Além disso, o PTTPNH₂ aponta que as unidades de geração de hidrogênio existentes operam com uma capacidade ociosa de cerca de 200 mil toneladas por ano, majoritariamente de origem fóssil, indicando um potencial de oferta já instalado que compete com novas plantas.

Tais medidas, ao baratear e aumentar a capilaridade da matéria-prima concorrente, criam uma barreira de competitividade direta para o hidrogênio de biomassa, que ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento. Fica evidente, portanto, uma dualidade estratégica: o governo aposta em novas tecnologias, mas, ao mesmo tempo, otimiza a infraestrutura do modelo que se pretende substituir. Contudo, é possível contraexplorar a fragilidade, visto que a expansão da malha de gasodutos prevista na Ação 4, embora motivada pela disponibilidade de gás natural fóssil, cria a infraestrutura física necessária para o escoamento futuro de biometano. A fragilidade, portanto, não reside na infraestrutura em si, mas na ausência de garantias regulatórias de que o acesso a essa rede será priorizado para os gases renováveis em detrimento do fóssil.

Essa dualidade reflete um descompasso histórico no planejamento energético nacional. Em uma cronologia de transição linear, a consolidação da malha de gás natural teria precedido as atuais demandas por descarbonização profunda. Contudo, devido à maturação tardia da rede de gasodutos, o país vivencia a implementação concomitante de estratégias para o hidrocarboneto e para os renováveis.

Esse cenário engendra uma competição por recursos, na qual a otimização do modelo energético vigente ocorre simultaneamente à introdução de alternativas sustentáveis, resultando em assimetrias competitivas. Lopes e Leite (2024) corroboram esse diagnóstico ao apontar que, diferentemente da rota fóssil consolidada, o setor de hidrogênio verde enfrenta barreiras de desenvolvimento atreladas à ausência de incentivos regulatórios específicos. Segundo os autores, a indefinição quanto à alocação de custos de infraestrutura constitui um desafio crítico que inibe a decisão de investimento e retarda a consolidação do novo vetor energético.

Os documentos reconhecem abertamente que o custo é o principal gargalo para a viabilização de novas rotas. O PTTPNH₂ é taxativo ao afirmar que "atualmente esses combustíveis (de baixa emissão) ainda possuem altos custos de produção, sofrem de infraestrutura limitada" (PTTPNH₂, 2023, p. 12). O PNF corrobora essa visão, explicando que "a competitividade dos fertilizantes depende fortemente dos custos de investimento em

plantas produtoras, dos custos de operação... (e) dos custos de matérias-primas" (PNF, 2021, p. 40). Para uma tecnologia de capital intensivo como a produção de amônia verde, esses fatores representam o desafio central. O PTTPNH2 também destaca que o hidrogênio verde via eletrólise, rota concorrente à biomassa, "até a presente data ainda não se mostra competitivo" (PTTPNH2, 2023, p. 20) e é "altamente dependente do custo das fontes de eletricidade disponíveis" (PTTPNH2, 2023, p. 20). Adicionalmente, a PNHBC estabelece a necessidade de "proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta" (PNHBC, 2024, p. 2), o que pode gerar um conflito com o fomento a novas tecnologias de custo inicial mais alto.

Nesse contexto, a "Ação 47" do PNF, que propõe a "criação de mecanismos de mitigação de riscos contra volatilidade dos preços internacionais" (PNF, 2021, p. 140), emerge como uma fragilidade crítica. Desta forma, um mecanismo mal desenhado pode ter o efeito colateral de subsidiar o fertilizante importado para o consumidor final, tornando-o artificialmente mais atrativo e criando uma barreira de preço quase intransponível para o novo produto nacional. Além disso, a competição pela própria biomassa com outros setores, como o de geração de energia, também é vista como uma fragilidade, pois "se visualiza uma competição entre setores pelo uso da biomassa" (PNF, 2021, p. 107), o que pode elevar o custo da matéria-prima.

Para além dos desafios econômicos, a análise aponta para a existência de lacunas fundamentais de conhecimento e infraestrutura. O PNF admite abertamente que "ainda são necessárias informações regionalizadas sobre a disponibilidade de resíduos" (PNF, 2021, p. 69). Essa falta de um inventário claro e detalhado de biomassa é uma fragilidade primária, pois sem o mapeamento da matéria-prima, o planejamento de novas plantas e a atração de investimentos se tornam tarefas de alto risco. De forma mais ampla, o PTTPNH2 reconhece que a cadeia do hidrogênio sofre de "infraestrutura limitada" (PTTPNH2, 2023, p. 12) e que sua consolidação "apresenta ainda significativos desafios tecnológicos e de mercado ao longo de toda a sua cadeia energética" (PTTPNH2, 2023, p. 9). O documento reforça que "as cadeias de produção do hidrogênio de baixa emissão ainda encontram grandes necessidades de desenvolvimento tecnológico em nível global" (PTTPNH2, 2023, p. 20).

A infraestrutura logística geral do país também é apontada como um ponto fraco. O PNF descreve a "excessiva dependência do modal rodoviário, o alto custo da navegação de cabotagem e a baixa eficiência das operações portuárias" (PNF, 2021, p. 24) como queixas recorrentes do setor. Embora a produção regionalizada de biomassa possa mitigar parte desse problema, ela ainda dependerá de uma malha logística eficiente para escoamento.

Por fim, os documentos revelam um gargalo no capital humano. O PNF é claro ao afirmar que "evidencia-se a necessidade de criação de um programa de formação de RH" (PNF, 2021, p. 96) , admitindo que a "deficiência constatada em relação à formação de RH também se reflete na produção bibliográfica e tecnológica sobre fertilizantes no Brasil" (PNF, 2021, p. 96). Contudo, a análise classifica este ponto como uma fragilidade não pelo diagnóstico em si — que é um reconhecimento necessário —, mas pela carência de propostas efetivas para mitigá-lo. O documento identifica o problema, mas não detalha instrumentos operacionais ou orçamentários para a capacitação massiva e imediata necessária. Sem uma estratégia definida de formação profissional para projetar e operar as novas plantas, a transição tecnológica corre o risco de estagnar no nível do planejamento. Mas essa necessidade de mudança não é apenas técnica, pois o PLANEC aponta que a transição para a economia circular requer "a adoção de uma nova mentalidade pelas empresas e pelos consumidores" (PLANEC, 2025, p. 15).

No campo regulatório, o PTTPNH2 adverte para o risco de que "limites de redução de emissões muito elevados" (PTTPNH2, 2023, p. 19) no início possam "gerar custos excessivos" (PTTPNH2, 2023, p. 12) e quebrar a "estabilidade e previsibilidade de mercado" (PTTPNH2, 2023, p. 12). Adicionalmente, a PNHBC exige que os empreendimentos adotem "medidas para gestão de risco de acidentes" (PNHBC, 2024, p. 5), o que representa mais uma camada de complexidade e custo para novos projetos, e que os certificados garantam a "inexistência de dupla contagem" (PNHBC, 2024, p. 7), sem, contudo, detalhar os mecanismos para tal.

5.4 CONVERGÊNCIAS E DIVERGÊNCIAS

A análise dos trechos mistos revela ambiguidades no discurso político que podem se traduzir em riscos para a rota de biomassa. O exemplo mais notável é a "Ação 133" do PNF, que, ao detalhar a produção de amônia verde, menciona explicitamente o "potencial eólico / solar" (PNF, 2021, p. 148) e "rotas de eletrólise" (PNF, 2021, p. 148), omitindo por completo a biomassa. Esse tipo de "esquecimento" é uma fragilidade significativa, pois sinaliza um viés da política que pode direcionar os recursos e a atenção regulatória para as rotas elétricas, marginalizando a rota de base biológica.

A ambiguidade mais recorrente é a que promove o hidrogênio de baixo carbono de forma genérica, ao mesmo tempo em que continua a fortalecer a rota concorrente do gás natural. Diversas ações e metas propõem a "atração de mais agentes produtores de nitrogênio" (PNF, 2021, p. 136) ou a "ampliação da capacidade nacional de produção" (PNF, 2021, p.

136). Embora pareçam positivas, essas metas são tecnologicamente neutras no papel. Na prática, sem um direcionamento claro, o capital tende a fluir para a tecnologia dominante e de menor risco percebido: o gás natural. Assim, uma Potencialidade para o aumento da produção nacional se converte em uma Fragilidade para a inovação, ao intensificar a competição com o modelo incumbente.

Essa contradição é ainda mais crítica do ponto de vista da sustentabilidade, pois enquanto a produção convencional de fertilizantes responde por cerca de 2,5% das emissões globais de GEE, o PNF aponta que "formalmente não há comprometimento do setor de fertilizantes com metas de redução de emissões" (PNF, 2021, p. 110).

Essa tensão é explicitada na "Ação 131" do PNF, que visa a "Integração das Política Nacional de Gás Natural e de Hidrogênio com a cadeia de fertilizantes" (PNF, 2021, p. 148). A integração com a política de hidrogênio é uma clara Potencialidade. Contudo, a integração simultânea com a política de gás natural reforça a dependência da matéria-prima fóssil, criando um cenário de competição direta por investimentos e infraestrutura, que, na prática, retarda a transição para um modelo de economia efetivamente circular.

Há um padrão recorrente nos trechos analisados: a proposta de uma solução (Potencialidade) que, por sua própria existência, admite uma carência fundamental (Fragilidade). Por exemplo, a diretriz para "Apoio a esquemas de financiamento e de redução dos riscos de investimento" (PTTPNH2, 2023, p. 17) é positiva, mas o fato de ser necessária confirma que o setor é percebido como de alto risco e carente de financiamento. O mesmo ocorre com a "necessidade de criar um ambiente para atrair investimentos para PD&I" (PNF, 2021, p. 94) ou com a constatação de que é preciso "desenvolver recursos humanos nacionais com competências" (PTTPNH2, 2023, p. 26).

De forma mais direta, o PNF aponta que "no cenário atual, a cadeia de fertilizantes à base de subprodutos e resíduos não está consolidada" (PNF, 2021, p. 76) e que ainda "são necessárias informações regionalizadas sobre a disponibilidade de resíduos" (PNF, 2021, p. 69). A mesma fonte aponta para barreiras técnicas, como a dificuldade de "padronização" (PNF, 2021, p. 68) da matéria-prima e a necessidade de garantir a "estabilidade do composto" (PNF, 2021, p. 68). Em todos esses casos, a ação propositiva serve como um diagnóstico de que o ecossistema de inovação e a infraestrutura para a economia circular ainda são frágeis.

Outro exemplo de ambiguidade observa-se na formulação dos incentivos à inovação. A diretriz da PNHBC que prevê o "investimento mínimo em pesquisa, desenvolvimento e inovação" (PNHBC, 2024, p. 8) evidencia essa dualidade. Por um lado, configura uma potencialidade ao institucionalizar o compromisso governamental com o avanço tecnológico e

orientar as ações das agências de fomento. Por outro, a ausência de parâmetros quantitativos para o termo “mínimo” caracteriza uma fragilidade relevante, uma vez que permite o cumprimento formal da exigência com aportes de baixa expressividade.

Por fim, a análise dos trechos mistos aponta para riscos inerentes ao processo regulatório e à dinâmica de mercado. A proposta de definir "percentuais mínimos de redução de emissões em relação ao hidrogênio de referência (gás natural)" (PTTPNH2, 2023, p. 19) é uma potencialidade, pois valoriza a baixa pegada de carbono da biomassa. Contudo, o próprio texto adverte para uma "abordagem pragmática para não criar barreiras" (PTTPNH2, 2023, p. 19), o que pode resultar em metas pouco ambiciosas que não diferenciam suficientemente as rotas, tornando-se uma fragilidade. Isso é particularmente relevante dado o PNF reconhecer que a "pegada de carbono na produção de fontes nitrogenadas deve ser foco da ciência e tecnologia" (PNF, 2021, p. 108). Ao mesmo tempo, é preciso considerar que a própria transição para o hidrogênio pode gerar novos "impactos socioambientais e sobre recursos hídricos" (PTTPNH2, 2023, p. 29), indicando que a sustentabilidade da nova rota não é automática e dependerá de uma regulamentação rigorosa.

6. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do arcabouço político-regulatório brasileiro, composto pela ENB, ENEC, PLANEC, PNF, PNHBC e seu Plano de Trabalho Trienal, aponta para um cenário de dualidade para o fomento da bioeconomia circular e à descarbonização da cadeia de fertilizantes.

Identifica-se um conjunto de potencialidades que indica um interesse governamental em valorizar a biomassa, promover a economia circular e desenvolver uma indústria nacional de fertilizantes de baixa emissão de carbono. O reconhecimento dos resíduos como matéria-prima estratégica, quantificado em metas como a do PNF, que visa reaproveitar os resíduos com potencial de uso agrícola em, pelo menos, 10% da produção até 2030, a apresentação do hidrogênio de biomassa na PNHBC, e a estruturação de mecanismos de fomento como o Regime Especial de Incentivos (Rehidro) formam uma base para o desenvolvimento da rota tecnológica do hidrogênio musgo. A ênfase em Inovação e P&D, o estímulo à criação de um mercado de carbono e a instituição de um sistema de certificação (SBCH2) completam este quadro de oportunidades.

Contudo, esta base é confrontada por fragilidades estruturais e contradições políticas. A mais proeminente é o fortalecimento simultâneo da rota concorrente baseada no gás natural. Ações no PNF, como a conclusão de rotas de escoamento e a redução de tarifas de transporte de gás, aliadas à "Nova Lei do Gás", criam uma barreira de competitividade para tecnologias emergentes.

Evidencia-se uma dualidade: enquanto o discurso político aponta para a descarbonização, medidas de impacto econômico reforçam a infraestrutura do modelo fóssil. Outra tensão identificada é um viés em favor das rotas elétricas para a produção de hidrogênio. A omissão da biomassa em ações-chave do PNF sinaliza um risco de que os mecanismos de fomento possam marginalizar as rotas termoquímicas e bioquímicas, mesmo estas apresentando sinergias com os princípios da bioeconomia circular no agronegócio.

Conclui-se que o arcabouço político-regulatório brasileiro apresenta elementos contraditórios. As potencialidades manifestam-se na construção de uma base legal que reconhece a biomassa como ativo estratégico, alinha a produção de fertilizantes aos princípios da economia circular e institui a necessidade de inovação e descarbonização. Contudo, as fragilidades limitam a materialização desse potencial em três níveis: (1) o conflito estratégico com o fortalecimento do gás natural; (2) o viés tecnológico que pode privilegiar as rotas elétricas; e (3) as lacunas de informação, infraestrutura e capital humano, como a falta de dados regionalizados sobre a disponibilidade de resíduos. Portanto, o conjunto de políticas

cria um ambiente de oportunidade e de risco, que abre espaço para a inovação, mas mantém um cenário que favorece a tecnologia dominante.

A abrangência destas conclusões, contudo, é delimitada pelo escopo e pelas escolhas metodológicas desta pesquisa. Primeiramente, o *corpus* documental é um recorte, e a inclusão de outras normativas, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), poderia oferecer perspectivas adicionais.

Em segundo lugar, a metodologia de análise de conteúdo, embora sistemática, apresenta limitações. A análise restringe-se ao texto dos documentos, não capturando as dinâmicas de poder e os interesses dos *stakeholders*. Adicionalmente, o livro de códigos analíticos utilizado, enquanto ferramenta de organização, representa um *framework* interpretativo. O processo de categorização, por sua natureza, implica um nível de abstração que foca em padrões recorrentes, não abarcando a totalidade das particularidades dos textos originais. Por fim, o cenário político analisado é recente, com várias das políticas instituídas entre 2021 e 2024. Esta pesquisa oferece um retrato do "dever-ser" estratégico, e não uma avaliação de seus impactos efetivos.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma direção para pesquisas futuras reside na expansão do escopo de análise para o conceito de biorrefinarias integradas no setor sucroenergético. O setor já possui uma cadeia produtiva consolidada e é um dos maiores geradores de biomassa do país, com resíduos como a palha e o bagaço excedente apresentando elevado potencial para aplicações na bioeconomia.

Futuros trabalhos poderiam investigar modelos de negócio e arranjos tecnológicos que permitam a valorização simultânea desses coprodutos. Tais estudos poderiam avaliar a produção consorciada de biocombustíveis de segunda geração, bioquímicos de alto valor agregado e o hidrogênio renovável para fertilizantes, otimizando os fluxos de matéria e energia dentro da usina e maximizando a receita e a sustentabilidade do sistema como um todo.

8. REFERÊNCIAS

- ACAR, C.; DINCER, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v. 39, n. 1, p. 1–12, 2014.
- ALFIAN, M.; PURWANTO, W. W. Multi-objective optimization of green urea production. **Energy Science & Engineering**, v. 7, n. 2, p. 292-304, 20 fev. 2019.
- ALMEIDA, B. D. C.; LASMAR, D. J.; MAFRA, R. Z. O CICLO DA BIOECONOMIA. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 4, p. e702, 19 set. 2025.
- ALVES, M., PONCE, G.H.S.F., SILVA, M.A., ENSINAS, A.V. Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. **Energy**, nº 91, p. 751-757, 2015.
- ANDRADE, Maria Clara. **Avaliação das tecnologias de geração de hidrogênio visando à produção de fertilizantes nitrogenados**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.
- ARGENTA, Gilber; SILVA, Paulo Regis Ferreira da; BORTOLINI, Clayton Giani. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, v. 31, n. 4, p. 715-722, 2001.
- BABCOCK-JACKSON, Lisa; SCHIPPER, Willem. Emissões ocultas de gases de efeito estufa no crescimento das plantas. **American Chemical Society**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.cas.org/pt-br/resources/cas-insights/sustainability/hiddengreenhousegasemissionsplantgrowth>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- BALAT, Havva; KIRTAY, Elif. Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 14, p. 7416-7426, 2010.
- BARDIN, Laurence. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BENÍCIO, L. P. Overview of the use of phosphate fertilizers in Brazil: a review. **Agri-Environmental Sciences**, v. 8, n. 2, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36725/agries.v8i2.7761>.

BRASIL. **Decreto nº 12.044, de 5 de junho de 2024.** Institui a Estratégia Nacional de Bioeconomia - ENB e a Comissão Nacional de Bioeconomia - CNBio. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 108, p. 7, 6 jun. 2024.

BRASIL. **Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024.** Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular - ENEC e o Comitê Interministerial sobre Economia Circular. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 123, p. 11, 28 jun. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024.** Institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 148, p. 1, 5 ago. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).** Brasília, DF: MME, 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviço. **Plano Nacional de Economia Circular (PLANEC).** Brasília, DF: MDIC, 2025.

BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes (PNF):** Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil. Brasília: SAE, 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília: MME/EPE, 2007.

CALIGARIS, B. S. A. et al. A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 3-8, 2022. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1793/pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CARVALHO, Letícia. Aprovação do Plano Nacional de Economia Circular é um avanço para a agenda verde, diz CNI. **Agência de Notícias da Indústria**, Brasília, 8 maio 2025. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/aprovacao-do-plano-nacional-de-economia-circular-e-um-avanco-para-a-agenda-verde-diz-cni/>>. Acesso em: 5 nov. 2025.

CHANTRE, Caroline et al. Hydrogen economy development in Brazil: An analysis of stakeholders' perception. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 26-41, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922002342>.

Acesso em: 5 nov. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: safra 2025/26, v. 13, n. 2, segundo levantamento, nov. 2025. Brasília: Conab, 2025a.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: safra 2025/26, v. 12, n. 3, terceiro levantamento, nov. 2025. Brasília: Conab, 2025b.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café**: safra 2025, v. 11, n. 4, quarto levantamento, dez. 2025. Brasília: Conab, 2025c.

DEMAREST. **Marco Legal do Hidrogênio é Publicado**. São Paulo: Demarest, 2 ago. 2024. Disponível em: <https://www.demarest.com.br/marco-legal-do-hidrogenio-e-publicado/>. Acesso em: 5 nov. 2025.

DIAZ, L. **Liberalization: the key to unlocking natural gas potential in Brazil?**. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies, 2021. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2021/12/Liberalization-the-key-to-unlocking-natural-gas-potential-in-Brazil-NG173.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. Nota Técnica. [S.l.]: EPE, 2021a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma do gás natural com CCUS**. Nota Técnica. [S.l.]: EPE, 2021b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Hidrogênio e biomassa: oportunidades para produção e uso de hidrogênio em sistemas de bioenergia. **Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/02**. Rio de Janeiro: EPE, 2025c.

FERNANDES, M. C. S. **Estudo da Indústria de Fertilizantes Nitrogenados: Fontes, Produção, Mercado e Impacto Ambiental**. 2022. 63 f. Monografia (Curso de Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34949/1/EstudoDaInd%C3%BAstria.pdf>.

Acesso em: 5 nov. 2025.

FERREIRA-LEITÃO, Viridiana *et al.* Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65-76, 2010.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2025**: ano base 2024. Brasília: Ibá, 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Hydrogen**: Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. [S.l.]: IEA, 2019. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>. Acesso em: 5 nov. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); UN CLIMATE CHANGE HIGH-LEVEL CHAMPIONS. **The Breakthrough Agenda Report 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023>. Acesso em: 5 nov. 2025.

INTERNATIONAL FERTILIZERS ASSOCIATION (IFA). **Food and Nutrition Security**. [S.l.]: IFA, 2023. Disponível em: <https://www.fertilizer.org/about-fertilizers/why-we-need-fertilizers/food-and-nutrition-security/>. Acesso em: 5 nov. 2025.

KALINCI, Y.; HEPBASLI, A.; DINCER, I. Biomass-based hydrogen production: A review and analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 21, p. 8799-8817, nov. 2009.

LOPES, C. C. M. O.; LEITE, F. A. Hidrogênio Verde no Nordeste: Análise da implantação de sistemas de conversões à infraestrutura de redes elétricas a fim de integrar o armazenamento do hidrogênio verde no Nordeste. **Revista FT**, v. 29, n. 141, 2024.

MAO, C. et al. Green urea production for sustainable agriculture. **Joule**, v. 8, n. 5, p. 1224-1238, 1 maio 2024.

MAKHOLM, Jeff D. There Is But One True Hub, and His Name Is Henry. **Natural Gas & Electricity**, v. 32, n. 11, p. 27-30, jun. 2016.

MARTÍN, M.; SÁNCHEZ, A. Biomass Pathways to Produce Green Ammonia and Urea. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 47, p. 100933, 1 jun. 2024.

MILNE, T. A.; ELAM, C. C.; EVANS, R. J. **Hydrogen from biomass: state of the art and research challenges**. [S.l.: s.n.], 1 fev. 2002.

MIRANDA, R. O. et al. ECONOMIA CIRCULAR: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA EMPRESAS BRASILEIRAS. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 4, p. e709, 22 set. 2025.

PAL, D. B.; SINGH, A.; BHATNAGAR, A. A review on biomass based hydrogen production technologies. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 3, p. 1461-1480, jan. 2022.

SANCHEZ, N. et al. Unlocking sustainable solutions: Harnessing residual biomass from Colombia's non-centrifugal sugar chain for green market deployment. **Bioresource Technology Reports**, v. 26, p. 101858, jun. 2024.

SANTANA, Rafaela Silva. **Marcha de absorção de macronutrientes e produção de variedades de cana-de-açúcar**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5139>. Acesso em: 5 nov. 2025.

SCHIPFER, Fabian et al. The circular bioeconomy: a driver for system integration. **Energy Sustainability and Society**, v. 14, n. 1, 2024.

UNGUREANU, Nicoleta; VLĂDUȚ, Valentin; BIRIȘ, Sorin-Ștefan. Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. **Sustainability**, v. 14, n. 17, p. 11089, 2022.

VIEIRA, Rosana Faria. **Ciclo do Nitrogênio em Sistemas Agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1090589/1/2017LV04.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2025.

WANG, Yujie; CHEN, Dawei; CHEN, Chen; WANG, Shuangyin. Electrocatalytic Urea Synthesis via C–N Coupling from CO₂ and Nitrogenous Species. **Accounts of Chemical Research**, v. 57, p. 247-256, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00633>. Acesso em: 24 nov. 2025

WELFLE, Andrew. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v. 105, p. 83-95, 2017.

ZAYED, O. et al. Nitrogen journey in plants: from uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. **Biomolecules**, v. 13, n. 10, p. 1443, 25 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biom1310144>. Acesso em: 5 nov. 2025.