

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA FONSECA DE ABREU

ANÁLISE ESTRATÉGICA DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE
BAIXA EMISSÃO DE CARBONO A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DO
PRINCIPAIS SUBTRATOS DISPONÍVEIS NO BRASIL

CURITIBA

2025

CAROLINA FONSECA DE ABREU

ANÁLISE ESTRATÉGICA DE ROTAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO DE
BAIXA EMISSÃO DE CARBONO A PARTIR DO BIOGÁS PROVENIENTE DO
PRINCIPAIS SUBSTRATOS DISPONÍVEIS NO BRASIL

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

Orientador: Prof. Dr. Maurício Romani

CURITIBA

2025

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, utilizando o biogás — proveniente de diferentes fontes de substrato — como rota tecnológica, por meio da aplicação da análise SWOT. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura, abordando o conceito de hidrogênio de baixa emissão de carbono, suas principais rotas de produção e destacando o uso da biomassa. Na sequência, o estudo foca no biogás, analisando suas características quando obtido a partir de resíduos agropecuários, agroindustriais, de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto. Entre esses, os resíduos agropecuários, especialmente os oriundos da avicultura e suinocultura, apresentam maior teor de metano, evidenciando elevado potencial para conversão em hidrogênio. Foram também identificados desafios relevantes, como a necessidade de infraestrutura adequada e o desenvolvimento de redes de distribuição mais eficientes. Por fim, a matriz SWOT foi aplicada para avaliar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas à produção de hidrogênio a partir do biogás, permitindo uma análise estratégica para cada tipo de substrato considerado.

Palavras-chave: hidrogênio; biogás; biometano; SWOT

ABSTRACT

This study aimed to assess the production of low-carbon hydrogen in Brazil, using biogas from different substrate sources as the technological pathway, through a SWOT analysis. A literature review was first conducted, addressing the concept of low-carbon hydrogen, its main production routes, and highlighting the use of biomass. Subsequently, the study focuses on biogas, analyzing its characteristics when derived from agricultural, agro-industrial, landfill, and wastewater treatment plant residues. Among these sources, agricultural residues, particularly those from poultry and swine farming, stand out due to their high methane content, which indicates significant potential for hydrogen conversion. Relevant challenges were also identified, including the need for adequate infrastructure and the development of more efficient distribution networks. Finally, the SWOT matrix was applied to evaluate the strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with hydrogen production from biogas, enabling a strategic assessment of each type of substrate considered.

Keywords: hydrogen; biogas; biomethane; SWOT.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética tem ganhado cada vez mais destaque mundialmente e a busca pela diversificação da matriz energética se torna fundamental para suprir a demanda por energia de forma sustentável e justa. Enquanto a matriz energética mundial é composta, essencialmente, por fontes fósseis (86,8%), o Brasil alcançou 50% de renovabilidade, com o aumento da oferta interna de fontes de biomassa, solar e eólica, um marco histórico desde 1990, segundo o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025 (ano base 2024).

Segundo a Petrobras (2024), a transição energética precisa levar em consideração três frentes: descarbonização gradual e eletrificação; novos produtos de baixo carbono, como os biocombustíveis; e outras fontes de energia, incluindo o hidrogênio. Nesse contexto, o hidrogênio surge como um importante aliado energético estratégico, especialmente quando produzido a partir de fontes de baixa emissão de carbono. No cenário brasileiro, com a vasta oferta de biomassa, a produção de hidrogênio de baixa emissão, pela rota do biogás, surge como uma oportunidade relevante para que o Brasil fortaleça seu protagonismo na transição energética.

Este artigo propõe uma análise estratégica do potencial nacional para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono, a partir das principais fontes de substrato de biogás, utilizando a análise SWOT (sigla em inglês que representa forças, fraquezas, oportunidades e ameaças), destacando os avanços tecnológicos, os desafios e as oportunidades para integrar essa rota ao cenário brasileiro de descarbonização e fomentar a diversificação da matriz energética.

2 REVISÃO DA LITERATURA

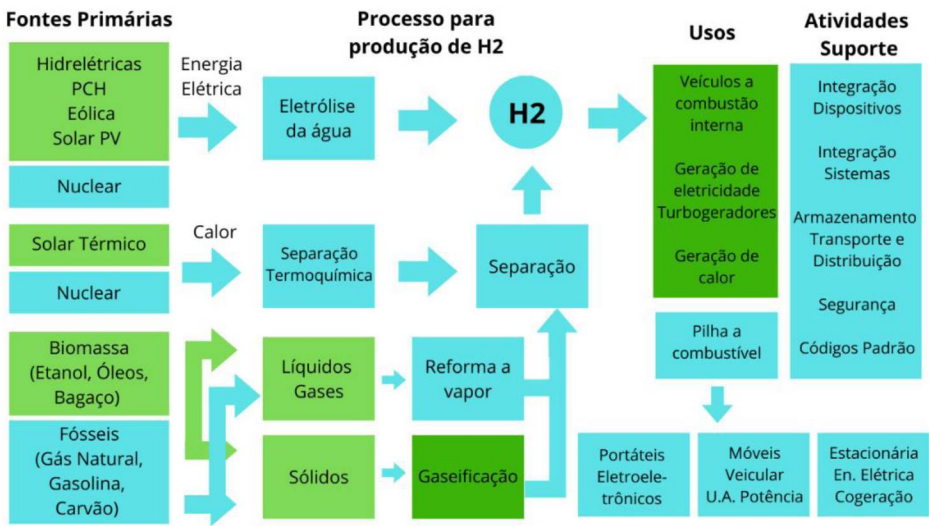
2.1 Hidrogênio de baixa emissão de carbono e suas vias de produção

O hidrogênio pode ser classificado de acordo com a origem de sua produção. Atualmente, mais de 90% da produção global de hidrogênio é de origem fóssil, e o hidrogênio de baixa emissão de carbono vem ganhando cada vez mais destaque como mais uma alternativa para a descarbonização da matriz energética (MME, 2023a).

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2025a) aponta que a demanda mundial de hidrogênio alcançou 97 milhões de toneladas (Mt) no ano de 2023, registrando um aumento de 2,5%, se comparado ao ano anterior. Ressalta-se ainda que projetos previstos para hidrogênio de baixa emissão devem aumentar em até cinco vezes a produção de hidrogênio renovável até 2030, podendo alcançar mais de 4 milhões de toneladas por ano.

Existem diversas rotas tecnológicas para produção de hidrogênio, a depender da fonte disponível, conforme ilustra a Figura 1.

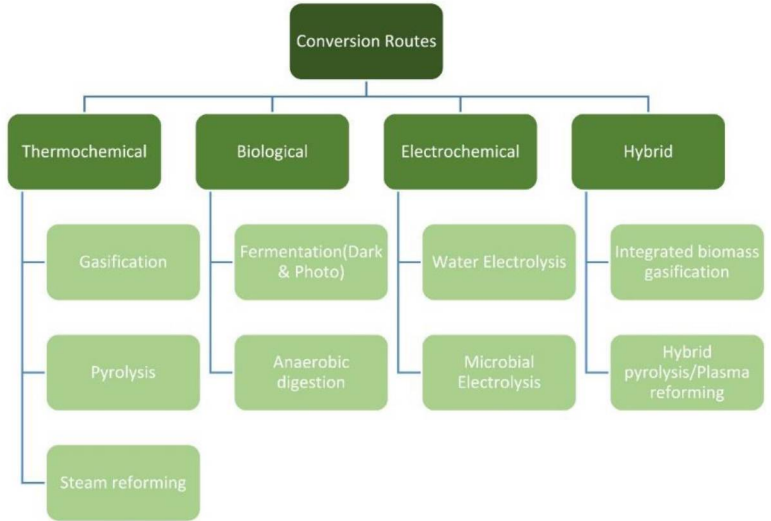
FIGURA 1: Rotas tecnológicas para obtenção de hidrogênio



FONTE: Adaptado de EPE (2021).

Entre as fontes de origem renovável, a produção de hidrogênio pode ser dada pela eletrólise da água, pelo uso da biomassa e por biocombustíveis como etanol, biogás e biometano. A biomassa pode ser compreendida como todo material orgânico utilizado como fonte de energia renovável, podendo ser de origem vegetal ou animal. Sua principal origem é vegetal, podendo ser obtida de diversas fontes, como resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais. Na matriz energética brasileira, a biomassa tem se tornado cada vez mais expressiva, destacando-se os derivados de cana de açúcar que corresponderam a 16,8% em 2023 (BEN, 2024). A conversão da biomassa em hidrogênio pode ser conduzida por diferentes rotas, que podem ser por processos termoquímicos, biológicos, eletroquímicos e até mesmo híbridos, conforme a Figura 2.

FIGURA 2: Rotas de conversão de biomassa em hidrogênio de baixa emissão



FONTE: Obiora et al. (2024).

Entre as formas de obtenção de hidrogênio por processos termoquímicos encontram-se a gaseificação, a pirólise e a reforma a vapor. Na gaseificação, uma das rotas mais utilizadas, por promover reações mais rápidas e eficientes, a biomassa é aquecida com vapor e oxigênio, a temperaturas superiores a 700° C, gerando o gás de síntese, que, na sequência, é purificado para produção do hidrogênio (US Department of Energy, 2024).

Os processos biológicos consistem na utilização da biomassa em processos bioquímicos, como a fermentação (fotofermentação e fermentação escura) e digestão anaeróbia, que permite a produção do hidrogênio a partir do biogás, com a decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio, que será o enfoque deste trabalho (Obiora et al., 2024).

A eletricidade também pode ser um caminho para a conversão da biomassa em hidrogênio, que são os processos eletroquímicos. As principais formas são a eletrólise da água e a eletrólise microbiana.

Além disso, existe a possibilidade de processos híbridos, que integram mais de um processo, como a gaseificação de biomassa e integração de pirólise e reforma de plasma.

2.2 Biogás no cenário energético brasileiro

O biogás, definido pela Resolução ANP nº 886 de 2022 (BRASIL, 2022) como o “gás bruto obtido da decomposição biológica de resíduos orgânicos”, é uma solução relevante para a segurança energética, mitigação dos gases de efeito estufa e manutenção da sustentabilidade.

Segundo o *Outlook for Biogas and Biomethane* (IEA, 2025b), atualmente, o potencial de produção sustentável de biogás é próximo de 1.000 bcm (bilhões de metros cúbicos equivalentes), o que corresponde a um quarto da demanda global de gás natural. A expectativa é que, até 2050, esse potencial aumente para quase 1.400 bcm, com os custos médios caindo 20%, principalmente pelo crescimento da produtividade agrícola, pelos avanços tecnológicos e pelas economias de escala.

Entre os países de economia mais avançada, os Estados Unidos possuem maior produção de biogás, mas 80% do potencial sustentável para produção de biogás está concentrado nos países emergentes e em desenvolvimento, liderados por Brasil, China e Índia (IEA, 2025b). O Brasil tem avançado cada vez mais na produção de biogás e biometano e, para o ano de 2024, foram registrados 4,7 bilhões Nm³/ano de capacidade instalada em operação e 641 milhões Nm³/ano produzidos (aumento de 16%, em relação a 2023) (CIBiogás, 2025).

No território nacional, o biogás pode ser encontrado em 24 estados, tendo maior concentração no Centro-Sul do país. O maior número de plantas de biogás está presente no estado do Paraná, enquanto o estado de São Paulo lidera em termos de capacidade instalada.

Segundo a CIBlogás (2023a), no Brasil, o biogás pode ser produzido por três principais categorias de substratos, sendo elas:

- **Agropecuária:** Relacionado a atividades de criação de animais como suinocultura, bovinocultura, entre outros. Alguns exemplos de substratos dessa fonte são dejetos de animais, resíduos de ração etc.
- **Indústria:** Envolve o segmento industrial como um todo, incluindo usinas de açúcar e etanol, cervejarias, indústrias de óleo vegetal, abatedouros, frigoríficos e outros. O substrato proveniente dessa categoria corresponde ao próprio efluente industrial desses locais.
- **Saneamento:** Representa aterros sanitários (RSU), estações de tratamento de esgoto (ETE) e usinas de tratamento de resíduos orgânicos. Os substratos são resíduos sólidos urbanos, resíduos alimentares e esgoto sanitário.

O Panorama do Biogás 2024 aponta que, em 2023, a principal fonte de substrato de biogás foi obtida dos resíduos sólidos urbanos ou esgoto. A energia elétrica segue sendo a principal aplicação do biogás no Brasil (59%), mas o biometano vem crescendo a cada ano e atualmente é a segunda finalidade escolhida (37%). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), o Brasil possui um grande potencial de produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais (como vinhaça, torta de filtro, e efluentes da suinocultura), além de resíduos urbanos. O setor sucroenergético é destaque, com capacidade técnica e logística já estabelecidas.

2.3 Caracterização das principais fontes de substrato de biogás

Dentre as principais categorias de substrato para a produção de biogás no Brasil (agropecuária, indústria e saneamento), é possível propor uma análise das características de cada fonte, elencando: composição do biogás e frações parciais; impurezas e tecnologias de tratamento requeridas; e infraestrutura.

2.3.1 Composição do biogás e frações parciais

O estudo de Defiltro (2020) analisou a composição do biogás oriundo de resíduos agropecuários no Sudoeste do Paraná e identificou que o percentual de metano (CH_4) de biogás proveniente de efluentes de avicultura, bovinocultura e suinocultura ficou entre 65 e 70%, enquanto a faixa de dióxido de carbono (CO_2) compreendeu uma concentração entre 30 e 35%, conforme a Tabela 1.

TABELA 1: COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS

Substrato	Componentes			
	CH_4 (%)	CO_2 (%)	H_2S (ppm)	NH_3 (ppm)
Avicultura	70	30	0,83	6,48
Bovinicultura	65	35	0,07	4,6
Suinocultura	70	30	0,53	2,76

FONTE: Adaptado de Defiltro (2020).

Com relação aos resíduos industriais, dando enfoque no setor sucroalcooleiro, o biogás de vinhaça (parte residual derivada da produção do etanol) e de torta de filtro (resíduo decorrente do processo de filtração do caldo de cana-de-açúcar), normalmente possui em sua composição, cerca de 55% de CH₄ e 45% de CO₂ (Stuchi, 2024).

Candiani e Torres (2015) propuseram um estudo para analisar a produção de biogás no Aterro Sanitário de Caieiras, São Paulo, e conseguiram determinar uma composição média de biogás, com 58,7 % CH₄, 40,5% de CO₂ e 0,6% de O₂. Tais valores compreendem a composição média típica de biogás de aterros sanitários definida por Tchobanoglous et al. (1993), conforme a Tabela 2.

TABELA 2: COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS

Componentes	%
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrogênio	2,0 - 5,0
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre	0 - 1,0
Amônia	0 - 0,2
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Outros gases	0,01 - 0,6

FONTE: Adaptado de Tchobanoglous (1993).

Analisando as particularidades do biogás dos mais variados tipos de substrato, é possível comparar a composição de cada fonte, em termos de metano e dióxido de carbono, principais componentes, de acordo com a tabela 3. É possível observar que, em termos de eficiência energética, o biogás de fonte de resíduos agropecuários, sobretudo de aves e suínos, destaca-se pelo alto teor de metano, em torno de 70%.

TABELA 3: COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE ACORDO COM A ORIGEM DO SUBSTRATO

Origem do substrato	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Resíduos agropecuários (avicultura e suinocultura)	70	30
Resíduos agropecuários (bovinocultura)	65	35
Resíduos industriais (setor sucroalcooleiro)	55	45
Resíduos sólidos urbanos (aterros sanitários)	45 - 60	40 - 60

FONTE: Autoria própria (2025).

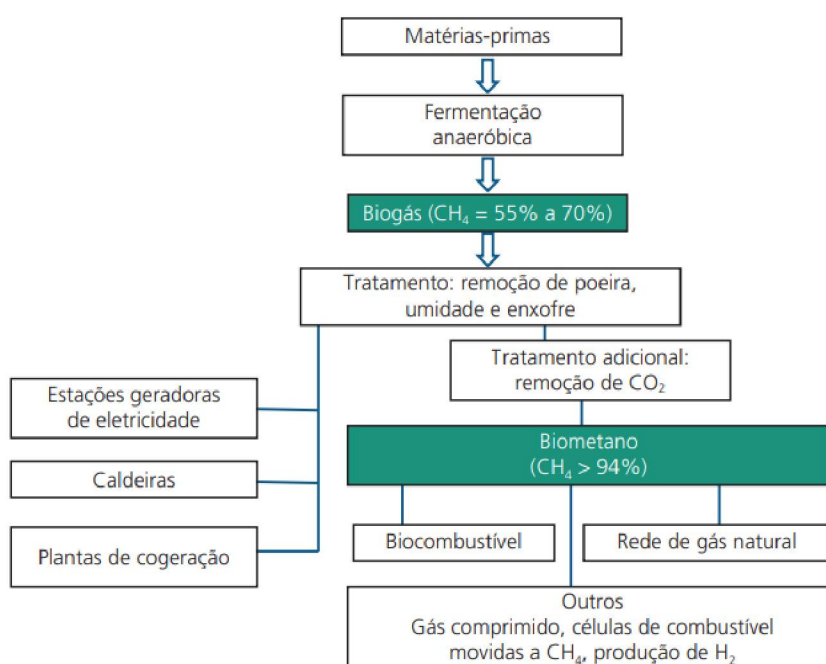
2.3.2 Impurezas e Tecnologias de Tratamento

As tecnologias de purificação e tratamento do biogás são necessárias para remover contaminantes presentes no gás, como sulfeto de hidrogênio (H₂S), vapor d'água, oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂) e dióxido de carbono (CO₂ – maior contaminante no biogás) (CIBiogás, 2023b).

Retirando essas impurezas, o biogás purificado pode ser convertido, por exemplo, em biometano e até mesmo hidrogênio. Destaca-se que a escolha do(s) tratamento(s) depende não só do uso final desse biogás, mas também da origem do substrato, uma vez que a fonte de obtenção influencia na qualidade do gás e sua composição.

Conforme a Figura 3, para que o biogás seja utilizado para fins de geração de energia elétrica, uso em caldeiras ou cogeração, é necessário um pré-tratamento para remoção de impurezas como poeira, umidade e sulfeto de hidrogênio. Entretanto, se o uso final é a obtenção de biometano, células de combustível ou hidrogênio, o biogás precisa passar por tratamentos adicionais, que incluem, principalmente, a retirada de dióxido de carbono (CO_2).

FIGURA 3: Processos de produção de biogás



FONTE: BNDES, 2018.

Segundo Gois (2023), para obtenção de hidrogênio a partir do biogás de resíduos como vinhaça de cana-de-açúcar ou efluentes de suinocultura, é necessário o tratamento do lodo, como um tratamento térmico. Já o estudo de Stuchi (2024) aponta que tanto o biogás de vinhaça quanto o de torta de filtro possuem alta concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S), sendo requerida a tecnologia de dessulfurização.

Para o caso do biogás oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, além dos contaminantes já mencionados, há presença de siloxanos em sua composição. Os siloxanos são elementos compostos de sílica, normalmente derivados de cosméticos, desodorantes, tipos de sabões, entre outros, que podem danificar equipamentos e prejudicar a eficiência do biogás. A remoção de siloxanos é mais uma etapa que deve ser considerada para produção de hidrogênio, sendo o tratamento com carvão ativado a alternativa mais eficiente (Portal Biogás e Energia, 2022; Santos, 2018).

2.3.3 Infraestrutura

A infraestrutura demandada para projetos de plantas de biogás ainda são uma barreira para o avanço dessa fonte de energia renovável. Em uma análise SWOT proposta por Santos (2024), entre as fraquezas avaliadas, na avaliação estratégica para o aproveitamento do biogás, encontram-se a falta de infraestrutura adequada e os altos custos de implementação e manutenção de tecnologias de biogás.

Com relação ao transporte de biogás, um dos desafios encontrados está na escassez de redes de distribuição adequadas, devido à complexidade e custo mais elevado do deslocamento desse produto (Santos, 2024).

2.4 Conversão de biogás em biometano

Para a produção de hidrogênio a partir do biogás, a rota tecnológica é essencial para definir o nível de tratamento requerido. Dessa forma, o biogás pode passar por menos etapas de remoção de contaminantes, ou pode ser necessário o *upgrading*, convertendo biogás em biometano, até obter o hidrogênio, dependendo da tecnologia escolhida.

O biometano pode ser compreendido como o “gás constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás” (ANP, 2022). O processo de *upgrading* é definido como aquele em que se converte o biogás pré-tratado em biometano, removendo essencialmente o CO₂ presente, que é o contaminante em maior concentração no gás.

Existem diversas tecnologias disponíveis para essa etapa de purificação do biogás, sendo as principais: lavagem com aminas, lavagem com água, lavagem por solventes orgânicos, separação por membranas e adsorção por balanço de pressão (PSA – *Pressure Swing Adsorption*). As mais utilizadas são lavagem com água, PSA e separação por membranas (Coelho *et al.*, 2018).

Uma vez removido o CO₂ do biogás, o biometano, já com concentrações muito altas de metano, pode ser insumo para obtenção do hidrogênio.

2.5 Conversão de biogás em hidrogênio

A conversão de biogás em hidrogênio é uma rota tecnológica promissora para produção de energia renovável, que utiliza o metano, que compõe essencialmente o biogás, como matéria-prima. Esse processo requer a reação de reforma, independente se o biogás está purificado ou não (Silva, 2023).

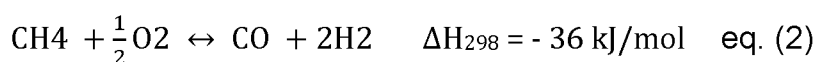
As principais técnicas de reforma de biogás são:

- **Reforma a seco:** utiliza o biogás parcialmente tratado e isento de H₂S em processos termoquímicos a elevadas temperaturas (700 °C a 800 °C), gerando um gás de síntese (composto por uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio).

- Reforma a vapor: biogás e vapor de água são utilizados, gerando dióxido de carbono e hidrogênio. Para que o processo ocorra, é necessária uma grande quantidade de biogás, a concentrações baixas de H₂S, além de boas condições de temperatura, vapor de água e catalisadores.
- Oxidação parcial do metano: utiliza o metano aquecido com oxigênio puro em um reformador, sendo considerada uma reação mais rápida que a reforma a vapor, mas não possui tanta escalabilidade comercial.
- Reforma autotérmica: propõe a combinação dos processos de reforma a vapor e oxidação parcial do metano.

A tecnologia mais comercializada atualmente é a reforma a vapor, mas a reforma a seco vem ganhando espaço com novas possibilidades e crescimento de maturidade tecnológica (TRL), assim como técnicas que utilizam catalisadores que potencializam os pontos fortes das técnicas de reforma básicas de forma integrada, como a bi-reforma e tri-reforma. Segundo a CIBiogás (2023a), “a escolha da tecnologia de reforma dependerá de aspectos como a razão entre CH₄/CO₂, volume de gás e finalidade da utilização do H₂, entre outros.”

O estudo de Carapelucci e Giordano (2020) apresentou uma análise termodinâmica das técnicas básicas de reformas para produção de hidrogênio, representada pelas equações abaixo, na qual a equação (1) representa a reforma a vapor; a equação (2) equivale a reforma autotérmica; e a equação (3) corresponde a reforma a seco.



Pelas equações acima, pode-se compreender que a reforma a vapor, representada pela equação (1) pode ser utilizada para conversão do biometano (biogás purificado com alta concentração de metano) em hidrogênio, sendo o biogás de qualquer origem de substrato. Cabe destacar que, pela concentração de CO₂ presente no biogás de aterros sanitários, uma alternativa relevante seria a reforma a seco, representada pela equação (3), que, para a produção do hidrogênio, precisa do dióxido de carbono.

3 METODOLOGIA

A análise SWOT, ou FOFA (em português), é uma ferramenta amplamente utilizada por organizações, para identificar, de forma simples e objetiva, os pontos fortes e fracos de um negócio (fatores internos), assim como suas oportunidades e ameaças (fatores externos) (SEBRAE, 2021).

As forças representam as iniciativas, técnicas e características que já possuem um bom desempenho e/ou são bem-sucedidas, enquanto as fraquezas correspondem os pontos internos que poderiam ser melhorados, aumentando a

performance do objeto de análise. Por sua vez, as oportunidades estão relacionadas a iniciativas externas que tenham potencial de mitigar as fraquezas e dar robustez às forças, enquanto as ameaças são impactos externos que não estão sob nosso controle (ASANA, 2025).

Para o presente trabalho, será utilizada como metodologia a análise SWOT (FOFA), a fim de avaliar os cenários de escolha de biogás, de acordo com cada tipo de substrato, para conversão em hidrogênio. Como base para o desenvolvimento e construção da análise, foram utilizadas diversas fontes da literatura, como os trabalhos de Freitas (2022) e Santos (2024).

A matriz SWOT elaborada, fundamentada pela revisão da literatura e trabalhos disponíveis, consistiu na definição de perguntas para cada campo da análise (forças, fraquezas, ameaças e oportunidades), conforme abaixo:

- Forças:
 - Quais características cada tipo de biogás possui que o tornam um produto competitivo frente a outras fontes renováveis disponíveis?
 - Quais tecnologias já são amplamente utilizadas no Brasil para produção de biogás?
 - Quais rotas tecnológicas já são empregadas para obtenção de hidrogênio a partir do biogás?
 - Como as políticas públicas e regulamentações atuais favorecem o biogás e o hidrogênio de baixa emissão de carbono?
 - Quais as vantagens econômicas e ambientais?
- Fraquezas:
 - Quais as limitações técnicas são enfrentadas para a produção de biogás e hidrogênio, a partir de biogás, no Brasil?
 - Quais as barreiras de infraestrutura e logística ainda existem para que o biogás, e, conseqüentemente, o hidrogênio de biogás, seja comercializado?
 - Quais as dificuldades econômicas e os custos de implantação e manutenção das plantas de produção de biogás?
- Oportunidades:
 - Qual o potencial de produção de biogás, biometano e hidrogênio para os próximos anos no Brasil?
 - Quais as políticas públicas e acordos internacionais que podem impulsionar o avanço do biogás e do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil?
 - Quais ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) são contemplados ao inserir o biogás na matriz energética?
- Ameaças:
 - Qual o nível de competitividade do biogás e hidrogênio frente a outras fontes de energia renovável?

- Quais as incertezas de incentivo político e econômico para o biogás?
- Quais os riscos que podem impactar na falta de interesse de investidores?

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um ponto forte do biogás é a sua eficiência energética. O trabalho de Defiltra (2020) permitiu avaliar a composição do biogás obtido a partir de resíduos agropecuários, e evidenciou a alta eficiência energética dessa fonte de substrato, devido ao seu elevado percentual de metano, principalmente de resíduos da avicultura e suinocultura (70%).

O biogás oriundo de resíduos agroindustriais também se mostrou com uma eficiência energética considerável, que foi discutida por Stuchi (2024), especificamente no contexto do setor sucroalcooleiro, e apontou que a composição de biogás derivado de vinhaça e torta de filtro compreende em torno de 55% de metano.

Já o biogás de aterros sanitários apresentou uma porcentagem com uma variação maior de metano, com uma faixa entre 45 e 60%, conforme apresentado por Candiani e Torres (2015), devendo-se levar em consideração as características dos resíduos sólidos urbanos que, entre alguns contaminantes, pode conter siloxanos, derivados de sílica presentes em objetos de uso cotidiano, como cosméticos.

Atualmente existem diversas tecnologias disponíveis para o tratamento do biogás, desde a remoção de contaminantes mais simples, como vapor d'água e ácido sulfídrico (H_2S), até o *upgrading* desse biogás, removendo dióxido de carbono (CO_2) e convertendo em biometano. São tecnologias já empregadas a nível comercial e que também representam uma força na escolha dessa fonte de energia renovável. Com o tratamento adequado para cada tipo de substrato, o biogás possui alta eficiência energética e se torna um importante aliado na diversificação da matriz energética e mais um caminho para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono.

Do ponto de vista da conversão do biogás em hidrogênio, tendo ele sido purificado para chegar a biometano ou não, as principais rotas tecnológicas envolvem a reforma. Dentre essas, a reforma a vapor é a mais empregada comercialmente e, a partir da análise das reações químicas de reforma a vapor, reforma autotérmica e reforma a seco, apresentadas no estudo de Carapelucci e Giordano, a melhor rota tecnológica para o biogás é a reforma a vapor.

Entretanto, pela concentração de dióxido de carbono presente no biogás oriundo de aterros sanitários, a reforma a seco também se mostra como mais uma possibilidade tecnológica para produção de hidrogênio, mesmo que ainda não seja amplamente comercializada. Analisando as fraquezas, alguns desafios ainda são encontrados para que o biogás consiga ter maior escalabilidade e

visibilidade, entre eles a falta de infraestrutura para produção, incluindo a logística e redes de distribuição pouco desenvolvidas. Além disso, os custos de investimento com tecnologias de produção e manutenção ainda são bastante elevados, o que se torna um ponto de atenção para avaliar a implementação dessa fonte de energia.

Entre fatores externos, as políticas públicas e regulamentações são pontos fundamentais para o avanço de energias renováveis, incluindo biogás e hidrogênio, e muitos autores reconhecem a progressão dessas políticas, como o Renovabio, a Lei do Combustível do Futuro (MME, 2024) e Resoluções ANP (BRASIL, 2022) que determinam a regulamentação do biogás e biometano no país.

Frente às mudanças climáticas, as energias renováveis se tornam cada vez mais importantes, e o biogás tem ganhado mais espaço, ano a ano. Levantamentos da CIBiogás (2025), como o Panorama Mundial de Biogás 2024, ilustram o potencial de produção de biogás no Brasil que registrou 641 milhões Nm³ produzidos em 2024.

Para avaliar todos os fatores de forma estratégica, clara e objetiva, a análise SWOT se mostra eficaz, permitindo uma avaliação de pontos positivos e negativos, tanto no âmbito interno (apontando as forças e fraquezas), quanto no ambiente externo (com a visão das oportunidades e ameaças).

A Figura 4 apresenta a análise SWOT, elencando as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças para escolha do biogás para obtenção de hidrogênio, de acordo com a origem do substrato (resíduos agropecuários, agroindustriais ou de sólidos urbanos).

FIGURA 4: Análise SWOT da produção de hidrogênio a partir de biogás dos principais substratos disponíveis no Brasil.

Fatores Positivos	Fatores Negativos
Forças	Fraquezas
Biogás de resíduos agropecuários: - Alta eficiência energética (70% de CH₄ - avicultura e suinocultura; 65% CH₄ – bovinocultura) - Tecnologias de tratamento e <i>upgrading</i> de biogás e biometano bem desenvolvidas - Reforma a vapor como melhor rota tecnológica para conversão de biometano em hidrogênio – mais utilizada no Brasil - Políticas e regulamentações que favorecem a maturidade do arcabouço regulatório, como a Resolução ANP nº 886/2022 e a Política Nacional do Hidrogênio (MME, 2023b) - Possibilidade de geração de energia elétrica e veicular, promovendo diversificação da matriz energética nacional - Redução dos gases de efeito estufa	Biogás de resíduos agropecuários: - Presença de ácido sulfídrico (H₂S) no biogás pode causar danos para os equipamentos - Necessidade de tecnologias avançadas para remoção dos contaminantes e para <i>upgrading</i> do biogás a biometano e, posteriormente a hidrogênio - Infraestrutura pouco desenvolvida, com poucas redes de distribuição e valores elevados de transporte - Altos custos de instalação e manutenção
Biogás de resíduos agroindustriais: - Alta eficiência energética (55% CH₄, sem tratamento). Com tratamento e remoção de contaminantes simples, o teor de metano aumenta significativamente - Tecnologias de tratamento e <i>upgrading</i> de biogás e biometano bem desenvolvidas - Reforma a vapor como melhor rota tecnológica para conversão de biometano em hidrogênio – mais utilizada no Brasil - Políticas e regulamentações que favorecem a maturidade do arcabouço regulatório, como a Resolução ANP nº 886/2022 e a Política Nacional do Hidrogênio (MME, 2023b) - Possibilidade de geração de energia elétrica e veicular, promovendo diversificação da matriz energética nacional - Redução dos gases de efeito estufa	Biogás de resíduos agroindustriais: - Presença de ácido sulfídrico (H₂S) no biogás pode causar danos para os equipamentos - Necessidade de tecnologias avançadas para remoção dos contaminantes e para <i>upgrading</i> do biogás a biometano e, posteriormente a hidrogênio - Infraestrutura pouco desenvolvida, com poucas redes de distribuição e valores elevados de transporte - Altos custos de instalação e manutenção

FIGURA 4: continuação

Fatores Positivos	Fatores Negativos
Forças	Fraquezas
Biogás de resíduos sólidos urbanos: - Alta eficiência energética (45 a 60% CH₄, a depender das condições do resíduo). Com tratamento e remoção de contaminantes simples, o teor de metano aumenta significativamente - Tecnologias de tratamento e upgrading de biogás e biometano bem desenvolvidas - Reforma a vapor como melhor rota tecnológica para conversão de biometano em hidrogênio – mais utilizada no Brasil - Possibilidade de aproveitamento da composição do biogás de aterro sanitário, que possui maior concentração de CO₂ para utilização da reforma a seco na produção de hidrogênio de baixa emissão - Políticas e regulamentações que favorecem a maturidade do arcabouço regulatório, como a Resolução ANP nº 886/2022 e a Política Nacional do Hidrogênio (MME, 2023b) - Possibilidade de geração de energia elétrica e veicular, promovendo diversificação da matriz energética nacional - Redução dos gases de efeito estufa	Biogás de resíduos sólidos urbanos: - Presença de ácido sulfídrico (H₂S) no biogás pode causar danos para os equipamentos - Necessidade de tecnologias avançadas para remoção dos contaminantes e para <i>upgrading</i> do biogás a biometano e, posteriormente a hidrogênio - Necessidade de tecnologias para remoção de siloxanos - Infraestrutura pouco desenvolvida, com poucas redes de distribuição e valores elevados de transporte - Altos custos de instalação e manutenção

FIGURA 4: continuação

Fatores Positivos	Fatores Negativos
Oportunidades	Ameaças
Biogás de resíduos agropecuários: - Fortalecimento de políticas públicas como a Lei do Combustível do Futuro, o Renovabio, as Resoluções ANP que versam sobre a especificação do biogás e biometano, a Política Nacional do Hidrogênio e outros - Acordos e eventos internacionais que impulsionam o uso de fontes renováveis, como o Acordo de Paris, as NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) e a COP30 no Brasil - Fontes renováveis contemplam diversos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU), como: ODS 7 (Energia Limpa e Acessível); ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima)	Biogás de resíduos agropecuários: - Competitividade com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica - Incertezas políticas e econômicas - Necessidade de maior maturidade da regulamentação na distribuição de biometano
Biogás de resíduos agroindustriais: - Fortalecimento de políticas públicas como a Lei do Combustível do Futuro, o Renovabio, as Resoluções ANP que versam sobre a especificação do biogás e biometano, a Política Nacional do Hidrogênio e outros - Acordos e eventos internacionais que impulsionam o uso de fontes renováveis, como o Acordo de Paris, as NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) e a COP30 no Brasil - Fontes renováveis contemplam diversos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU), como: ODS 7 (Energia Limpa e Acessível); ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima)	Biogás de resíduos agroindustriais: - Competitividade com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica - Incertezas políticas e econômicas - Necessidade de maior maturidade da regulamentação na distribuição de biometano

FIGURA 4: continuação

Fatores Positivos	Fatores Negativos
Oportunidades	Ameaças
Biogás de resíduos sólidos urbanos: - Fortalecimento de políticas públicas como a Lei do Combustível do Futuro, o Renovabio, as Resoluções ANP que versam sobre a especificação do biogás e biometano, a Política Nacional do Hidrogênio e outros - Acordos e eventos internacionais que impulsionam o uso de fontes renováveis, como o Acordo de Paris, as NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas) e a COP30 no Brasil - Fontes renováveis contemplam diversos ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU), como: ODS 7 (Energia Limpa e Acessível); ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima)	Biogás de resíduos sólidos urbanos: - Competitividade com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica - Incertezas políticas e econômicas - Necessidade de maior maturidade da regulamentação na distribuição de biometano

FONTE: Autoria própria (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por novas fontes de energia renovável é uma crescente realidade e o hidrogênio de baixa emissão de carbono é um caminho amplamente estudado para diversificação da matriz energética brasileira e mundial. O enfoque do trabalho foi dado na produção de hidrogênio a partir de biogás, evidenciando as mais diversas fontes de substrato.

Levantamentos de órgãos internacionais, como a Agência Internacional de Energia mostraram que os projetos para hidrogênio de baixa emissão devem aumentar em até cinco vezes a produção de hidrogênio renovável até 2030 e o biogás será fundamental para tornar essa projeção uma realidade.

Com uma análise SWOT, foi possível identificar que, para as mais diversas origens (agropecuária, indústria e aterros sanitários), o biogás possui grandes vantagens que o permitirão aumentar ainda mais sua demanda ao longo dos anos. Ressaltou-se a elevada concentração de metano em biogás de resíduos agropecuários, mostrando uma alta eficiência energética e grande potencial para conversão em hidrogênio.

Outros tipos de biogás, do setor sucroalcooleiro e de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, mesmo tendo concentrações menores de metano, também são fontes promissoras para produção de hidrogênio.

Ainda existem dificuldades enfrentadas, como questões de infraestrutura e necessidade de melhores condições de redes de distribuição, além de custos elevados com a com tecnologias de implantação e tratamento, mas que vêm sendo estudadas.

As políticas públicas são ponto fundamental no avanço dessas tecnologias e aumento da escalabilidade de projetos de biogás e hidrogênio.

Com isso, a escolha do tipo de biogás para a conversão em hidrogênio deve avaliar todos os pontos negativos e positivos, como apresentados na análise, mas, foi possível perceber a similaridade entre o biogás das mais variadas fontes de substrato e vislumbrar cenários para a expansão dessas rotas tecnológicas no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ASANA, 2025. Análise SWOT/FOFA: o que é e como usá-la (com exemplos). Disponível em: < [Análise SWOT/FOFA: o que é e como usá-la \(com exemplos\) \[2025\] • Asana](#)>. Acesso em 31 de ago. de 2025.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022. Rio de Janeiro, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022.
- CANDIANI, Giovano e TORRES, Diego. Análise Qualitativa e Quantitativa da Produção de Biogás em Aterro Sanitário. Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais. Aquidabã, v.6, n.1, p.285-292, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2015.001.0022>
- CIBIOGÁS, 2023a. Do Biogás ao Hidrogênio – O que é necessário para migrar para a quarta rota?. Disponível em: < [Do biogás ao hidrogênio - o que é necessário para migrar para a quarta rota?](#)>. Acesso em 29 de ago. de 2025.
- CIBIOGÁS, 2023b. Tecnologias de Tratamento e purificação de biogás. Disponível em: < [Tecnologias de tratamento e purificação de biogás - O que você precisa saber!](#)>. Acesso em 10 de ago. de 2025.
- CIBIOGÁS. Panorama do Biogás 2024. 2025.
- COELHO *et al.* Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. São Paulo: Série RCGI/USP/SYNERGIA – Gases Combustíveis e Sustentabilidade, 2018.
- DEFILTRO, Jéssica. Avaliação da Composição do Biogás Proveniente de Resíduos Agropecuários em Propriedades Rurais do Sudoeste do Paraná. Monografia (Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos, Dois Vizinhos, 2020. 56f.
- EPE. Bases para Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. 2021.
- EPE. BEN Relatório Síntese 2025 (Ano Base 2024). 2025.
- EPE. Nota Técnica Hidrogênio e Biomassa: Oportunidades para produção e uso de hidrogênio em sistemas de bioenergia. 2025.
- EPE. Panorama do Biometano Setor Sucroenergético. 2023.
- FREITAS, Milena. Mapeamento e identificação de janelas de oportunidades para o biogás no Brasil via análise SWOT. Monografia (Graduação em Engenharia de Bioprocessos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. 113f.
- GOIS, Georgia. Resíduos Agrícolas e Agroindustriais na Geração de Biogás: Desenvolvimento de um Roteiro Experimental. Especialização (Docência em Educação Profissional e Tecnológica) – Instituto Federal de Alagoas, Maceió, 2023. 22f.

IEA, 2025a. Hidrogênio. Disponível em: <[Hydrogen - IEA](#)>. Acesso em 02 de jul. de 2025.

IEA, 2025b. Outlook for Biogas and Biomethane. Disponível em: <[Outlook for Biogas and Biomethane – Analysis - IEA](#)>. Acesso em: 03 de jul. de 2025.

MME, 2023a. Hidrogênio de baixa emissão é considerado fundamental para a transição energética. Disponível em: <[Hidrogênio de baixa emissão é considerado fundamental para a transição energética — Ministério de Minas e Energia](#)>. Acesso em: 27 de jun. de 2025.

MME, 2023b. Programa Nacional de Hidrogênio – PNH2. Disponível em: <[Programa Nacional de Hidrogênio - PNH2 — Ministério de Minas e Energia](#)>. Acesso em: 04 de jul. de 2025.

MME, 2024. Combustível do Futuro. Disponível em: <[Combustível do Futuro — Ministério de Minas e Energia](#)>. Acesso em 04 de jul. de 2025.

OBIORA, Nebechi Kate *et al.* Production of hydrogen energy from biomass: Prospects and challenges. Revista Green Technologies and Sustainability. KeAi Chinese Roots Global Impact. 2024.

Portal Biogás e Energia, 2022. O que são siloxanos. Disponível em: <[O que são Siloxanos? - Portal Energia e Biogás](#)>. Acesso em 10 de ago. de 2025.

SANTOS, Rafael. Estudo de Caso: Remoção de Siloxanos do Biogás Produzido no Aterro Sanitário de Brusque/SC através do Carvão Ativado. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. 93f.

SANTOS, Sthéfani. “Waste to energy”: Oportunidades e Desafios do Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários via Análise SWOT. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2024. 67f.

SEBRAE. Ferramenta: Análise SWOT (Clássico). 2021.

STUCHI, Antonio. Perspectivas para produção de bioenergia, captura e uso (*Beccus*) no setor sucroalcooleiro no Brasil. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Bioenergia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024. 108f.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL, S.. Integrated Solid Waste Management: Engineering principles and management issues. Washington: McGraw-Hill, 1993.

US DEPARTMENT OF ENERGY, 2024. Produção de hidrogênio: gaseificação de biomassa. Disponível em: <[Hydrogen Production: Biomass Gasification | Department of Energy](#)>. Acesso em 02 de jul. de 2025.