PRODUTO & PRODUÇÃO, vol. 27, n.3, p. 28-58. 2026[*].

Viabilidade econômica e ambiental do uso de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio: uma revisão sistemática da literatura

Gabriela Valter Santin
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
e-mail: valtersanting@gmail.com

Caroline Rodrigues Vaz
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
e-mail: caroline.vaz@ufsc.br

Mauricio Uriona Maldonado
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
e-mail: mauricio.uriona@gmail.com

[*] RECEBIDO em 16/06/2026. ACEITO em 08/09/2026.

Resumo
A crescente demanda por geração sustentável e manejo de resíduos impulsiona tecnologias que convertem dejetos suínos em biogás e hidrogênio. Este trabalho realiza uma revisão sistemática para avaliar a viabilidade econômica e ambiental dessas rotas. A análise identificou a digestão anaeróbia como principal tecnologia para biogás, enquanto a fermentação escura e a gaseificação destacam-se para o hidrogênio. Do ponto de vista econômico, a viabilidade depende da escala, incentivos públicos, venda de subprodutos e modelos de cogeração ou purificação. Ambientalmente, ambas as rotas mitigam gases de efeito estufa e reduzem os impactos do descarte de resíduos. Contudo, altos custos iniciais, limitações tecnológicas e gargalos logísticos ainda limitam a ampla adoção. Conclui-se apontando oportunidades para pesquisas futuras em otimização de processos, políticas públicas e modelos de negócios sustentáveis.

Palavras-chave: Biogás; Hidrogênio; Resíduos Suínos; Viabilidade Econômica; Viabilidade Ambiental.

Abstract
The growing demand for sustainable power generation and waste management drives technologies that convert swine manure into biogas and hydrogen. This work performs a systematic review to assess the economic and environmental viability of these pathways. The analysis identified anaerobic digestion as the primary technology for biogas, while dark fermentation and gasification stand out for hydrogen. From an economic perspective, viability depends on production scale, public incentives, by-product sales, and cogeneration or purification models. Environmentally, both pathways mitigate greenhouse gases and reduce waste disposal impacts. However, high initial costs, technological limitations, and logistical bottlenecks still limit widespread adoption. The study concludes by highlighting opportunities for future research in process optimization, public policies, and sustainable business models.

Keywords: *Biogas; Hydrogen; Swine Waste; Economic Feasibility; Feasibility Sustainability.*

1. Introdução.

A busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis é uma prioridade global em resposta à crise climática e aos desafios associados à gestão de resíduos. A utilização de resíduos suínos na produção de biogás e hidrogênio surge como uma estratégia promissora para mitigar esses problemas, transformando rejeitos em vetores energéticos valiosos (Araujo; Oliveira, 2023). Tecnologias como a digestão anaeróbia têm demonstrado potencial significativo na conversão de dejetos suínos em biogás, servindo como processo biotecnológico central para a estabilização da matéria orgânica e para a recuperação energética (Bhatt; Tao, 2020). Nesse contexto, enquanto Castro e Silva et al. (2022) destacam o potencial de conversão desses efluentes para a geração de biogás, rotas bioquímicas e termoquímicas oferecem alternativas promissoras para a produção de hidrogênio (Sahota; Kumar; Lombardi, 2024). Conforme apontam Wijayasekera et al. (2022), a integração dessas abordagens permite não apenas reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mas também minimizar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado na agroindústria.

A produção de biogás a partir de resíduos suínos está bem estabelecida em contextos industriais e agrícolas. Por meio da digestão anaeróbia, o esterco suíno é tratado em condições controladas, liberando metano como principal componente do biogás (Avaci et al., 2013). Esse processo apresenta vantagens ambientais fundamentais, como a mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela captura de metano e a redução drástica da poluição do solo e dos recursos hídricos (Ferreira et al., 2022; Hollas et al., 2022). Por outro lado, conforme apontado por Wijayasekera et al. (2022), a produção de hidrogênio a partir de resíduos, seja por fermentação escura ou processos termoquímicos como a gaseificação, ainda enfrenta desafios relacionados à eficiência e à escalabilidade, embora ofereça perspectivas promissoras na transição para uma economia de baixo carbono.

Do ponto de vista econômico, a viabilidade da utilização de resíduos suínos depende de fatores críticos como a escala de produção da unidade geradora, os custos iniciais de investimento em infraestrutura, a proximidade logística e a inserção de incentivos públicos ou créditos de carbono (Avaci et al., 2013; Castro e Silva et al., 2022). Estudos recentes destacam que o aproveitamento de resíduos animais pode gerar benefícios financeiros significativos e viabilidade operacional, especialmente quando há otimização de parâmetros e comercialização de subprodutos, como apontado por Castro e Silva et al. (2022). Contudo, desafios associados aos elevados custos iniciais de capital e às necessidades de manutenção dos sistemas de conversão continuam a limitar sua ampla aplicação em larga escala (Lin et al., 2023).

Além disso, segundo Adnane et al. (2024), a análise ambiental evidencia benefícios relevantes na implementação dessas tecnologias. A produção de energia a partir de resíduos suínos, por meio de processos como a digestão anaeróbia e fermentação escura, contribui para reduzir os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado de esterco e à emissão de gases de efeito estufa, promovendo uma gestão mais sustentável de resíduos. Para Boldrin et al. (2016), esses processos têm demonstrado vantagens significativas em comparação com métodos convencionais, como reformação de gás natural, ao apresentarem menor pegada de carbono e maior eficiência ambiental.

Questões sociais e políticas também desempenham papel crucial no sucesso dessas tecnologias. Incentivos financeiros, regulamentações adequadas e conscientização pública são apontados como fatores essenciais para integração dessas alternativas na matriz energética. Além disso, segundo Awogbemi, Ojo e Adeleye (2024), a criação de infraestrutura local pode fomentar mercados específicos para biogás e hidrogênio, acelerando sua adoção e ampliando os benefícios socioeconômicos associados. Além disso, estudos de Bonmatí, Campos e Flotats (2003) sugerem que o engajamento social e investimentos em pesquisa podem aumentar a aceitação das tecnologias, mitigando barreiras de implementação.

Diante desse panorama, emerge a seguinte pergunta de pesquisa: “Dadas as principais rotas tecnológicas de conversão de resíduos suínos em biogás e hidrogênio, quais fatores econômicos e ambientais influenciam sua viabilidade?” O objetivo geral deste trabalho é responder a essa questão por meio do desenvolvimento de uma revisão sistemática sobre as principais rotas tecnológicas de conversão energética e seus impactos socioeconômicos e ecológicos. Para alcançá-lo, definiram-se os seguintes objetivos específicos: 1) identificar e mapear as principais rotas tecnológicas utilizadas globalmente para a produção de biogás e hidrogênio a partir de dejetos suínos e biomassas integradas; 2) analisar, de forma comparativa, as barreiras técnicas e operacionais que afetam a viabilidade econômica e a

escalabilidade industrial desses processos; e 3) avaliar os principais benefícios e limitações ambientais associados a essas tecnologias sob a perspectiva da economia circular e da mitigação de gases de efeito estufa.

2. Referencial teórico.

A busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis atua em resposta direta à crise climática global e aos desafios associados à gestão de passivos ambientais na agroindústria. No contexto da transição energética, a valorização de biomassas residuais por meio da produção de biogás e hidrogênio consolida-se como uma estratégia promissora para transformar rejeitos em vetores energéticos de alto valor agregado.

2.1. Biogás.

Nesta seção, explora-se o panorama atual da produção de biogás na suinocultura, discutindo desde os avanços em eficiência de conversão biológica até os fatores determinantes para sua viabilidade econômica e ambiental.

A produção de biogás é realizada, predominantemente, através da digestão anaeróbia, a qual segundo Ellacuriaga, García-Cascallana e Gómez (2021) consiste em um processo biológico no qual microrganismos degradam matéria orgânica em ambiente sem oxigênio, originando como produtos principais o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). Essa decomposição, conforme apontado por Ferraresi de Araujo e Walter Borges de Oliveira (2023), passa por quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo esta última responsável pela produção efetiva do metano.

Nesse contexto, modelos cooperativos e sistemas de produção descentralizada surgem como alternativas promissoras para pequenos e médios produtores rurais, permitindo a centralização do processamento de resíduos e a redução dos custos operacionais por meio de economias de escala. Segundo Posso, Siguencia e Narváez (2020) experiências de integração entre produção energética e cooperativas agrícolas, nas quais a produção descentralizada de hidrogênio ou biogás pode gerar benefícios econômicos locais e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Além disso, Avaci et al. (2013) aponta que mecanismos de mercado como créditos de carbono e políticas públicas de incentivo têm se mostrado importantes instrumentos para aumentar a atratividade econômica desses projetos, especialmente quando associados à valorização de resíduos e à expansão dos mercados de bioenergia.

2.1.1. Método de produção do biogás.

Para Castro e Silva, de et al. (2022) a tecnologia de digestão anaeróbia pode ser realizada em diferentes condições operacionais, como temperatura (mesofílica ou termofílica), carga orgânica, tempo de retenção hidráulica e tipo de substrato. As condições mesofílicas (cerca de 35 °C) são as mais comuns, devido à maior estabilidade do processo, enquanto as termofílicas (acima de 50 °C) proporcionam maior rendimento energético, embora exijam maior controle operacional.

Para Ellacuriaga, García-Cascallana e Gómez (2021), os substratos utilizados na produção de biogás são, em sua maioria, resíduos orgânicos provenientes da agropecuária, agroindústria e resíduos urbanos. Os principais resíduos incluem dejetos de suínos, bovinos e aves, palha de milho, bagaço de cana, resíduos alimentares e frações orgânicas de resíduos sólidos urbanos.

Além disso, o uso de aditivos como a magnetita tem sido explorado com sucesso para otimizar o processo de digestão. Tais aditivos agem como condutores elétricos e melhoram a atividade dos microrganismos metanogênicos, resultando em maior produção de metano (Córdova et al., 2022). Outra abordagem promissora é a utilização de colunas externas contendo zeólita, que funcionam como filtros para purificação do biogás e potencialização do rendimento energético (Wijesinghe et al., 2018).

As estratégias de codigestão, que envolvem a combinação de diferentes substratos orgânicos, também têm se mostrado eficazes no aumento do rendimento do biogás. Segundo González-González et al. (2013) e Li et al. (2011), a codigestão de resíduos, como o esgoto de suínos com bagaço de tomate

ou resíduos da indústria de ervas medicinais, promove um melhor equilíbrio de nutrientes, resultando em maior rendimento de metano. Nesse sentido, Myers et al. (2023) afirmam que a mistura de resíduos com características físico-químicas complementares, como esterco animal e restos vegetais, promove um balanço ideal de nutrientes e melhora a eficiência do processo.

Os avanços técnicos na digestão anaeróbia (DA) destacam o uso de aditivos para superar limitações cinéticas. A inclusão de nanopartículas de ferro zero valente (Fe0) e pó de magnetita (Fe3O4) tem demonstrado potencial para aumentar o rendimento de metano em até 36,9%, facilitando a transferência direta de elétrons interespécies (Córdova et al., 2022; Huang et al., 2019).

Portanto, conforme Ellacuriaga, García-Cascallana e Gómez (2021), o desenvolvimento contínuo de técnicas e o aperfeiçoamento das condições operacionais são essenciais para a maximização da produção de biogás. Inovações tecnológicas e otimizações de processos desempenham papel fundamental na disseminação da digestão anaeróbia como alternativa sustentável de geração de energia renovável. Assim, a evolução dos métodos de produção busca não apenas eficiência energética, mas também segurança sanitária e sustentabilidade ambiental.

2.2. Hidrogênio.

Enquanto a digestão anaeróbia é consolidada como uma tecnologia madura devido à sua integração histórica em modelos de economia circular (Ellacuriaga; García-Cascallana; Gómez, 2021), o hidrogênio é frequentemente rotulado como emergente por fatores políticos e de infraestrutura. Apesar do alto valor do hidrogênio e potencial de descarbonização em países em desenvolvimento Machhirake et al. (2024), a ausência de subsídios comparáveis aos da digestão anaeróbia limita a sua competitividade perante os combustíveis fósseis.

O hidrogênio tem sido amplamente reconhecido como um vetor energético promissor na transição para fontes energéticas mais sustentáveis. Sua produção a partir de biomassas residuais representa uma alternativa viável tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico. Segundo Posso, Siguencia e Narváez (2020), a conversão de resíduos agroindustriais em hidrogênio pode impulsionar a economia circular e reduzir os impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado desses materiais. Além disso, o estudo de Martínez-Ramón et al. (2024) mostra que o hidrogênio proveniente de biogás apresenta desempenho técnico e ecológico favorável quando comparado ao hidrogênio convencional.

A versatilidade do hidrogênio, conforme Posso, Siguencia e Narváez (2020), permite sua aplicação em diferentes setores, desde o transporte até a geração de energia em sistemas estacionários, além de seu uso como insumo na indústria química. O hidrogênio também tem potencial de promover autonomia energética, principalmente em regiões rurais ou isoladas, conforme demonstrado por Luna-del Risco et al. (2024), que analisaram a viabilidade da produção descentralizada a partir de resíduos pecuários e agrícolas. Contudo, para Jain et al. (2024), é necessário notar que a percepção de viabilidade na literatura muitas vezes baseia-se no pressuposto de estabilidade operacional constante, ignorando a alta variabilidade química dos resíduos em tempo real.

A crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa tem direcionado esforços para o desenvolvimento de fontes renováveis como o bio-hidrogênio. Estudos como os de Martínez-Ramón et al. (2024) e Rocha-Meneses et al. (2023) indicam que a produção de hidrogênio a partir de resíduos pode mitigar significativamente as emissões de metano, um potente gás de efeito estufa. Ademais, para Posso, Siguencia e Narváez (2020), a substituição do hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, pelo hidrogênio vercontribui diretamente para a redução da pegada de carbono.

Além disso, tecnologias híbridas também têm sido exploradas com o intuito de aumentar a eficiência do processo de produção. Segundo Machhirake et al. (2024), a combinação de fermentação escura com digestão anaeróbia ou reforma a vapor de biogás pode aumentar a produtividade de hidrogênio. O estudo de Martínez-Ramón et al. (2024) aponta que o uso de sistemas integrados, como o "*chemical looping dry reforming*", pode maximizar a conversão de metano presente no biogás em hidrogênio de alta pureza.

Por fim, a implementação em larga escala da produção de bio-hidrogênio depende da existência de políticas públicas robustas e incentivos econômicos. De acordo com Posso, Siguencia e Narváez (2020), subsídios governamentais, créditos de carbono e regulamentações favoráveis são essenciais para fomentar a adoção dessa tecnologia. Adicionalmente, o desenvolvimento de infraestrutura e a

capacitação técnica são fatores determinantes para viabilizar a produção e distribuição do hidrogênio renovável em contextos urbanos e rurais.

2.2.1. Método de produção de hidrogênio através de biomassa.

A produção de hidrogênio a partir de biomassa é uma rota estratégica para a descarbonização da matriz energética, ela pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas, sendo as principais: gaseificação, pirólise, reforma a vapor e processos biológicos como fermentação escura. De acordo com Wijayasekera et al. (2022), os métodos termoquímicos, especialmente a gaseificação, apresentam desempenho técnico superior na conversão de resíduos sólidos urbanos e agroindustriais em hidrogênio. Ademais, Awogbemi, Ojo e Adeleye (2024) ressaltam que tecnologias como gaseificação autotérmica e pirólise assistida por micro-ondas aumentam significativamente a eficiência da conversão de resíduos agrícolas em hidrogênio verde, com menores emissões e tempos de residência reduzidos.

Já nas rotas biológicas, a fermentação escura tem ganhado destaque por sua eficiência em transformar substratos ricos em carboidratos em hidrogênio sob condições anaeróbias. Zhu l. (2009) demonstraram que a fermentação de dejetos suínos em ambiente anaeróbio resulta em rendimentos significativos de hidrogênio, especialmente quando parâmetros como pH e tempo de retenção hidráulica são otimizados. Segundo Jain et al. (2024), esse processo é vantajoso por não requerer iluminação externa, além de ser aplicável a diversos resíduos orgânicos, incluindo efluentes agroindustriais e resíduos alimentares. Nesse contexto, a codigestão de resíduos, como propõem Sahota, Kumar e Lombardi (2024), pode otimizar o equilíbrio nutricional do substrato, aumentando o rendimento de hidrogênio. Entretanto, Ferreira et al. (2018) e Jain et al. (2024) apontam que a literatura apresenta inconsistências críticas nos dados de rendimento de H_2. Essas discrepâncias derivam da heterogeneidade dos substratos e da diversidade de métodos de pré-tratamento, que resultam em comunidades microbianas distintas e produtividades variadas.

Experimentos com fermentação escura em escala laboratorial e piloto têm mostrado rendimentos promissores. Machhirake et al. (2024) ressaltam o potencial da fermentação escura aplicada a resíduos alimentares e efluentes agroindustriais. O estudo aponta que o uso combinado de diferentes substratos pode melhorar o balanço nutricional e, consequentemente, a produção de hidrogênio. Além disso, estudos como o de Ferreira et al. (2018) utilizaram microalgas cultivadas em efluentes industriais como matéria-prima para fermentação, obtendo boas taxas de remoção de nutrientes e produção de hidrogênio.

Quando analisamos o lado termoquímico, Lin et al. (2023) demonstraram a viabilidade técnica da gaseificação catalítica de resíduos de pelos suínos usando catalisadores à base de NiO/Al_2O_3. O processo apresentou boa conversão do carbono e geração expressiva de H_2, sendo uma alternativa inovadora para resíduos que geralmente são descartados sem aproveitamento energético. Por sua vez, Martínez-Ramón et al. (2024) exploraram a produção de hidrogênio via reforma a vapor de biogás derivado da digestão anaeróbia, evidenciando que a técnica de "*chemical looping dry reforming*" oferece alta eficiência energética e baixa emissão de carbono. Esse processo apresenta potencial para se integrar a sistemas já existentes de biodigestão, agregando valor à cadeia produtiva do biogás. Dessa forma, a escolha do método de produção deve considerar o tipo de resíduo disponível, os objetivos energéticos e as condições técnico-econômicas do projeto.

3. Metodologia.

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática da literatura, visando identificar, organizar e analisar os estudos existentes sobre a viabilidade econômica e ambiental do uso de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio. O processo de pesquisa foi conduzido no mês de abril de 2025, de forma estruturada seguindo as etapas identificadas na Figura 1.

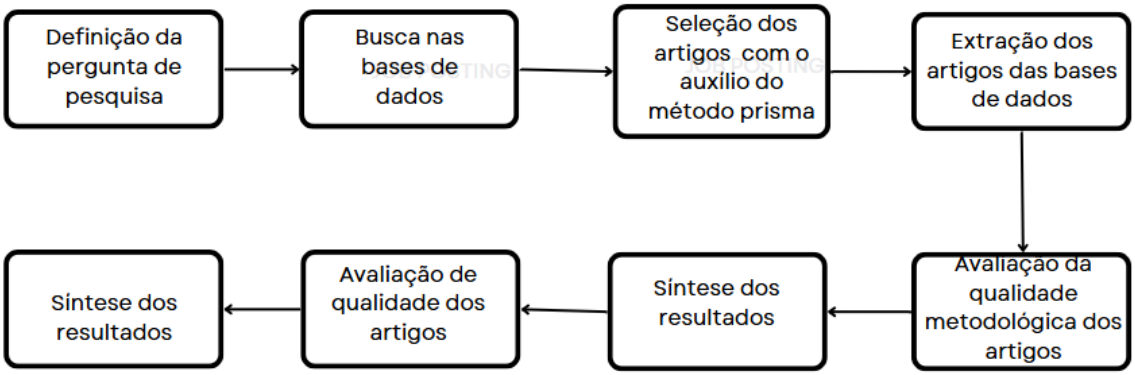


Figura 1 - Etapas para o desenvolvimento da revisão sistemática. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para a definição da pergunta de pesquisa, adotou-se como instrumento de apoio a estratégia PICo *(Population, Interest, Context)*, que auxilia na construção de questões de investigação por meio da delimitação precisa da população-alvo, do fenômeno de interesse e do contexto analisado. Com base nessa abordagem, a pergunta de pesquisa estabelecida foi: "Como é possível avaliar a viabilidade econômica e ambiental da utilização de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio?"

No presente estudo, foram definidos como elementos de pesquisa para a estratégia PICo apresentada por Lockwood et al. (2017): a População (P) refere-se aos resíduos suínos; o Interesse (I) concentra-se na avaliação da produção de biogás e hidrogênio; e, por fim, o Contexto (Co) está relacionado à viabilidade econômica e ambiental, considerando os impactos, benefícios e desafios associados à adoção de tecnologias de conversão de resíduos em energia no setor agroindustrial.

Com a definição dos acrônimos de pesquisa, foram selecionadas palavras chave com o auxílio de tesauros. No Quadro 1 está apresentado o modelo PICo com a estratégia de busca com uso de acrônimos de pesquisa dos tesauros.

Quadro 1 - Estratégia de busca estruturada com base no acrônimo PICo.

	P	**I**	**Co**
Extração	Resíduos suínos	Produção de Hidrogênio Produção de Biogás	Viabilidade econômica Viabilidade Ambiental
Conversão	*Pig Residue*	*Hydrogen Production* *Biogas Production*	*Economic viability* *Environmental viability*
Combinação	*Pig Residue, Pig Waste, Swine Manure, Porcine Effluent, Swine Waste, Pig Slurry, Manure from pigs.*	*Hydrogen Production, Biogas Production, Hydrogen Manufacturing, Green Hydrogen Production, Hydrogen Gas Production, Biogas Generation, Biomethane Production, Bioenergy Generation, Renewable Energy Production, Biohydrogen Production, Anaerobic Digestion, Methane Generation, Biofuel Production.*	*Economic viability, Financial viability, Economic efficacy, Financial efficacy, Environmental viability, Ambience viability, Climate viability, Climate efficacy, Techno-economic analysis, Feasibility study, Cost-benefit analysis.*

	P	I	Co
Construção	*"Pig Residue" OR "Pig Waste" OR "Swine Manure" OR "Porcine Effluent" OR "Swine Waste" OR "Pig Slurry" OR "Manure from pigs"*	*"Hydrogen Production" OR "Biogas Production" OR "Hydrogen Manufacturing" OR "Green Hydrogen Production" OR "Hydrogen Gas Production" OR "Biogas Generation" OR "Biomethane Production" OR "Bioenergy Generation" OR "Renewable Energy Production" OR "Biohydrogen Production" OR "Anaerobic Digestion" OR "Methane Generation" OR "Biofuel Production"*	*‘‘Economic viability" OR "Financial viability" OR "Economic efficacy" OR "Financial efficacy" OR "Environmental viability" OR "Ambience viability" OR "Climate viability" OR "Climate efficacy" OR "Techno-economic analysis" OR "Feasibility study" OR "Cost-benefit analysis"*
Uso (Scopus)	*(TITLE-ABS-KEY ("Pig Residue" OR "Pig Waste" OR "Swine Manure" OR "Porcine Effluent" OR "Swine Waste" OR "Pig Slurry" OR "Manure from pigs") AND TITLE-ABS-KEY ("Hydrogen Production" OR "Biogas Production" OR "Hydrogen Manufacturing" OR "Green Hydrogen Production" OR "Hydrogen Gas Production" OR "Biogas Generation" OR "Biomethane Production" OR "Bioenergy Generation" OR "Renewable Energy Production" OR "Biohydrogen Production" OR "Anaerobic Digestion" OR "Methane Generation" OR "Biofuel Production") AND TITLE-ABS-KEY ("Economic viability" OR "Financial viability" OR "Economic efficacy" OR "Financial efficacy" OR "Environmental viability" OR "Ambience viability" OR "Climate viability" OR "Climate efficacy" OR "Techno-economic analysis" OR "Feasibility study" OR "Cost-benefit analysis"))*		
Uso (Web of Science)	*TS=("Pig Residue" OR "Pig Waste" OR "Swine Manure" OR "Porcine Effluent" OR "Swine Waste" OR "Pig Slurry" OR "Manure from pigs") AND TS=("Hydrogen Production" OR "Biogas Production" OR "Hydrogen Manufacturing" OR "Green Hydrogen Production" OR "Hydrogen Gas Production" OR "Biogas Generation" OR "Biomethane Production" OR "Bioenergy Generation" OR "Renewable Energy Production" OR "Biohydrogen Production" OR "Anaerobic Digestion" OR "Methane Generation" OR "Biofuel Production") AND TS=("Economic viability" OR "Financial viability" OR "Economic efficacy" OR "Financial efficacy" OR "Environmental viability" OR "Ambience viability" OR "Climate viability" OR "Climate efficacy" OR "Techno-economic analysis" OR "Feasibility study" OR "Cost-benefit analysis")*		
Uso (Google Scholar)	*Pig Residue, Hydrogen Production, Biogas Production, Economic viability, Environmental viability*		

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As buscas foram realizadas nas bases de dados Scopus e Web of Science, as quais foram selecionadas em virtude de sua abrangência. Conforme apontado por Viteri et al. (2023), elas apresentam um caráter multidisciplinar e cobertura de periódicos relevantes para esta pesquisa. Adicionalmente, realizou-se uma busca na literatura cinzenta por meio do Google Scholar, que resultou em 17.600 registros. Devido ao volume excessivo de resultados não estruturados, estabeleceu-se um ponto de corte nos 100 primeiros resultados ordenados por relevância. Essa estratégia segue as diretrizes metodológicas de Canto et al. (2020) e é corroborada por estudos empíricos, como o de Haddaway et al. (2015), que demonstram que a grande maioria dos registros relevantes se concentra nas primeiras páginas da busca, tornando a leitura além desse limite ineficiente. Ressalta-se, contudo, como limitação metodológica, que as buscas em bases de literatura cinzenta não estruturadas estão sujeitas a vieses algorítmicos inerentes às plataformas, visto que os critérios de personalização e ordenação por "relevância" podem sofrer variações dinâmicas. Após a aplicação de critérios de elegibilidade com base na adaptação do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), 42 estudos foram selecionados para a etapa de avaliação da qualidade metodológica.

A metodologia seguiu protocolos internacionalmente reconhecidos para revisões sistemáticas, com o auxílio de uma adaptação do método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews*

and Meta-Analyses) descrito por Shamseer et al. (2015). O protocolo utilizado com base no método prisma está apresentado no Apêndice A e abaixo na Figura 2 foi desenvolvido o fluxograma prisma, o qual tem por objetivo demonstrar como a pesquisa foi desenvolvida.

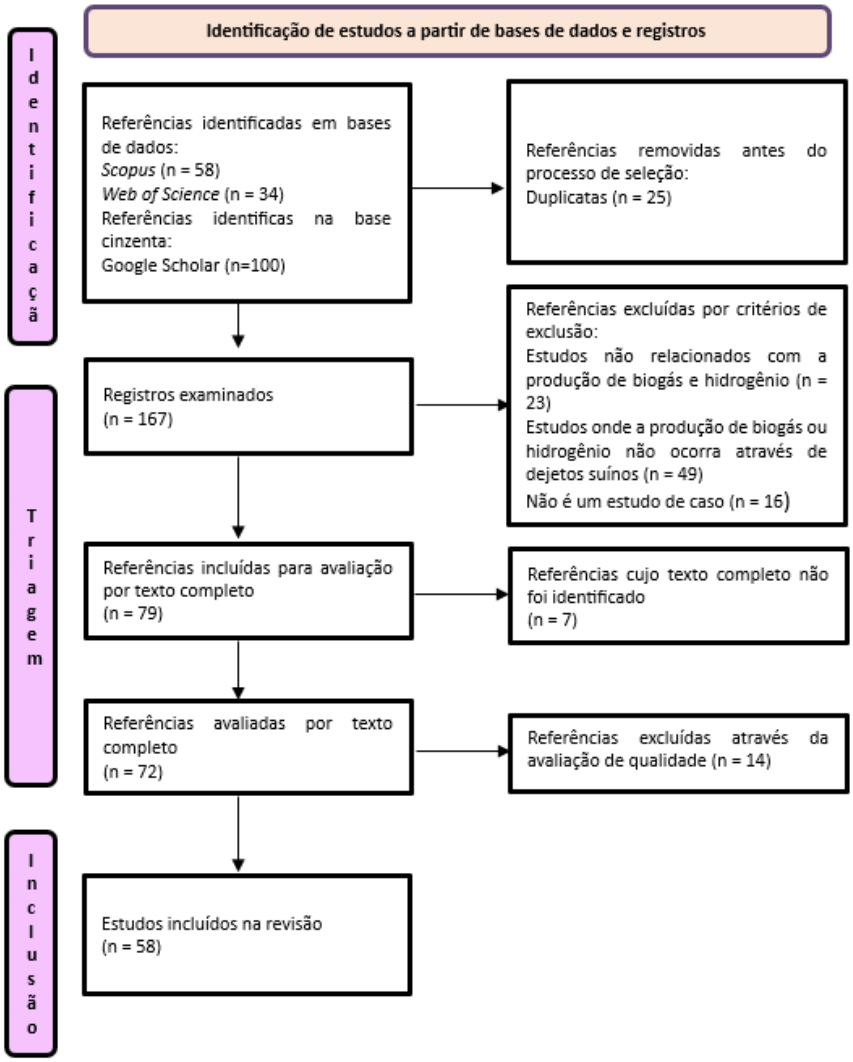


Figura 2 - Fluxograma prisma. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Conforme ilustrado na Figura 2, inicialmente, foram identificadas 192 referências nas bases de dados, das quais 58 foram da *Scopus*, 34 da *Web of Science* e 100 na base cinzenta Google Scholar. No caso do Google Scholar, para garantir a viabilidade da análise e da triagem manual dos estudos, foi estabelecido um critério de corte na análise dos resultados, priorizando os primeiros registros apresentados pela plataforma conforma apresentado por Boeker, Vach e Motschall (2013) que são ordenados por relevância e correspondência com os termos de busca. Essa estratégia permite concentrar a análise nos estudos mais alinhados com o tema investigado, ao mesmo tempo em que reconhece as limitações inerentes ao uso do Google Scholar em revisões sistemáticas da literatura.

Após a remoção de registros duplicados, os quais representam 25 artigos, restaram 167 registros para a fase de triagem. Na triagem inicial, os títulos e resumos foram analisados, resultando na exclusão de 88 registros. Para esse processo foram utilizados os critérios de inclusão e exclusão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios de elegibilidade.

Tipo	**Critério**
Inclusão	Estudos onde a produção de hidrogênio ocorra através do biogás.

Tipo	Critério
	Estudos que estejam relacionados com a produção de biogás e hidrogênio através de dejetos suínos.
Exclusão	Não é um estudo de caso ou revisão sistemática

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na etapa de avaliação por texto completo, 79 referências foram selecionadas. Dentre estas, 7 registros foram excluídos por indisponibilidade do texto completo. As 42 referências restantes foram submetidas à avaliação de qualidade metodológica apresentada no Apêndice B, utilizando-se a ferramenta de avaliação crítica do Joanna Briggs Institute (2017), especificamente o *checklist* para estudos transversais analíticos.

Para essa etapa, adotou-se como critério de corte, conforme Canto, Stefani e Massignan (2021) a média mínima de 70% de atendimento aos itens do *checklist*, considerando fatores como clareza nos critérios de inclusão, validade e confiabilidade na mensuração da exposição e dos desfechos, identificação e controle de fatores de confusão e adequação da análise estatística. Como resultado, 14 estudos foram excluídos por não atenderem aos padrões metodológicos previamente estabelecidos. Assim, 58 estudos foram considerados elegíveis e integraram a base final da revisão sistemática, esses estudos estão apresentados no Apêndice C.

4. Resultados.

A crescente demanda por fontes de energia renovável e práticas sustentáveis de manejo de resíduos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à produção de biogás e hidrogênio a partir de resíduos suínos. Nesse contexto, este capítulo apresenta uma análise crítica fundamentada em artigos de revisão e de pesquisa primária, contemplando dados experimentais de bancada, escala piloto e modelagens energéticas e ambientais associadas à conversão de resíduos agropecuários em bioenergia.

A partir da avaliação de estudos recentes, busca-se compreender as principais tendências, lacunas de pesquisa e inovações tecnológicas no campo, bem como discutir a viabilidade ambiental e econômica dessas alternativas energéticas. A análise visa ainda integrar as diferentes perspectivas encontradas na literatura, proporcionando uma visão abrangente sobre os fatores que influenciam o sucesso dessas tecnologias em escalas comerciais e sustentáveis. O Apêndice C, sintetiza os principais estudos selecionados na revisão sistemática, abordando a produção de biogás, hidrogênio e suas integrações a partir de diferentes tipos de resíduos, com destaque para resíduos suínos, agrícolas, industriais e urbanos.

Os 58 estudos analisados conforme apontado no Apêndice C foram conduzidos em diversos países, como Brasil, Espanha, China, Canadá, Polônia e França, entre outros, evidenciando o interesse global por soluções energéticas sustentáveis e alinhadas aos princípios da economia circular. Essa diversidade geográfica ressalta como a busca por alternativas energéticas de baixo impacto ambiental não se restringe a contextos regionais, mas constitui uma pauta de relevância internacional. A adoção de tecnologias limpas nesses diferentes contextos reflete tanto as demandas locais por sustentabilidade quanto os compromissos globais com a mitigação das mudanças climáticas e a transição energética.

Os métodos investigados abrangem uma ampla gama de processos, desde a digestão anaeróbia simples e codigestão até tecnologias mais avançadas, como gaseificação, pirólise, reforma de metano e processos híbridos. Essa variedade metodológica demonstra uma constante busca por maximizar a eficiência energética, econômica e ambiental, além de superar desafios inerentes à conversão de resíduos em energia. Contudo, os estudos também apontam limitações significativas, como a necessidade de pré-tratamentos eficientes, problemas relacionados à inibição por amônia, além de elevados custos operacionais e barreiras tecnológicas, especialmente em operações em escala industrial.

Além dos aspectos tecnológicos e financeiros, a literatura também aponta a necessidade de aprofundar a análise de modelos econômicos e organizacionais alternativos para viabilizar a produção de biogás e hidrogênio a partir de resíduos suínos. Estudos como o de Martins e Oliveira, De (2011) indicam que a viabilidade econômica dessas tecnologias está fortemente associada à escala de produção, incentivos públicos e possibilidade de comercialização de subprodutos energéticos, fatores que podem ser potencializados por novos arranjos institucionais e modelos de negócios.

4.1. Viabilidade da produção e utilização do biogás.

4.1.1. Viabilidade econômica.

A viabilidade econômica da produção de biogás é um fator crucial para sua disseminação em larga escala. Embora o processo de digestão anaeróbia seja consolidado, os custos de implantação e operação ainda representam um obstáculo, especialmente em pequena escala. Segundo Bhatt e Tao (2020), em muitos casos, o custo do biogás ultrapassa o do gás natural, o que limita sua competitividade no mercado energético. Porém, para Ferraresi de Araujo e Oliveira (2023), estudos no Brasil demonstram que mesmo pequenas propriedades com cerca de 100 suínos podem ser viáveis financeiramente quando há geração de energia para autoconsumo e venda de biofertilizantes.

Estudos como o de Myers et al. (2023) demonstram que a centralização de plantas digestoras, integrando resíduos de diferentes fazendas, pode reduzir custos operacionais e permitir a adoção de tecnologias mais sofisticadas, como sistemas de purificação e injeção de biometano na rede de gás natural. Essa estratégia favorece a economia de escala e torna a produção de biogás mais viável economicamente. Os autores Avaci et al. (2013) destacam que a viabilidade da microgeração melhora significativamente quando há a venda de créditos de carbono, o que reduz o custo total de produção da energia. Nesse cenário, o investimento inicial pode ser amortizado em curto prazo, promovendo independência energética e sustentabilidade ao produtor rural.

Porém, iniciativas como apoio governamental, subsídios e incentivos fiscais têm sido determinantes para viabilizar projetos de biogás, especialmente na Europa. Um exemplo disso, apontado por Igliński et al. (2012), ocorre na Polônia, onde o sistema de certificados verdes subsidia plantas que utilizam resíduos como substrato, tornando mais rentável o uso de materiais residuais em detrimento de culturas energéticas como o milho.

No Brasil, segundo Martins e Oliveira (2011), a viabilidade tem sido observada particularmente na suinocultura. Estudos apontam que a geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de dejetos suínos é economicamente vantajosa, especialmente quando há consumo energético significativo na propriedade, reduzindo o tempo de retorno do investimento. A viabilidade econômica da produção de biogás depende de diversos fatores, como escala de produção, políticas públicas, preços de energia e possibilidade de comercialização de subprodutos.

4.1.2. Viabilidade ambiental.

A viabilidade ambiental da produção e utilização do biogás é amplamente reconhecida, principalmente por sua capacidade de transformar resíduos orgânicos altamente poluentes em energia limpa. A digestão anaeróbia, processo utilizado na geração de biogás, reduz significativamente o impacto ambiental decorrente da decomposição natural de resíduos agropecuários, esgoto sanitário e resíduos orgânicos urbanos. Em particular, conforme descrito por Araujo e Oliveira (2023) o uso do esterco suíno como matéria-prima tem demonstrado grande potencial para mitigação de emissões de gases de efeito estufa, como o metano, um gás com potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono.

A substituição de combustíveis fósseis por biogás contribui diretamente para a redução da pegada de carbono das atividades agroindustriais. Em estudo realizado por Lin et al. (2023), foi demonstrado que a codigestão assistida eletricamente de efluente suíno com casca de arroz reduziu a intensidade de carbono em até 21,7%. Essa abordagem, além de melhorar o rendimento energético, promove uma estratégia de tratamento ambientalmente correta para resíduos orgânicos, transformando passivos ambientais em ativos energéticos com baixa emissão de poluentes.

Outro benefício ambiental relevante do biogás é a gestão adequada dos resíduos sólidos e líquidos. A digestão anaeróbia evita o descarte direto de dejetos em solos e cursos d’água, o que, além de causar eutrofização, pode comprometer a qualidade do solo e do lençol freático. Segundo Shih et al. (2023), a implantação de sistemas de biodigestores em propriedades suinícolas promoveu a redução de até 95,4% de material particulado e 80% de compostos orgânicos voláteis não mecânicos, contribuindo de forma expressiva para a melhoria da qualidade ambiental nas regiões rurais.

Além da geração de biogás, a digestão anaeróbia resulta na produção de digestato, um subproduto rico em nutrientes que pode ser utilizado como biofertilizante em substituição parcial ou total aos fertilizantes químicos. Essa aplicação contribui para o fechamento do ciclo de nutrientes, promovendo a recuperação da matéria orgânica e melhorando a estrutura e a fertilidade do solo. Segundo Ferraresi de Araujo e Walter Borges de Oliveira (2023), o uso do digestato pode reduzir custos com insumos agrícolas, diminuir a dependência de fertilizantes sintéticos importados e aumentar a sustentabilidade das atividades agropecuárias, sendo um componente-chave na promoção da economia circular no setor rural brasileiro.

A adoção de tecnologias complementares, como a pasteurização dos resíduos antes da digestão anaeróbia, também traz ganhos ambientais ao garantir a segurança sanitária do biofertilizante e reduzir a carga de patógenos. Michailidou et al. (2024a) destacam que a pasteurização a 70 °C por 60 minutos, conforme diretrizes europeias, contribui para o controle microbiológico dos resíduos e, em muitos casos, melhora o rendimento de metano, ao facilitar a degradação de compostos orgânicos complexos.

Por fim, a produção de biogás também se alinha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente os objetivos 7 (energia limpa e acessível), 12 (consumo e produção responsáveis) e 13 (ação contra a mudança global do clima). Para Johnson (2024), o aproveitamento de resíduos locais pode transformar problemas ambientais em soluções energéticas, com isso, o biogás se consolida como uma alternativa estratégica para promover a sustentabilidade ambiental, reduzir a dependência de fontes fósseis e valorizar os recursos disponíveis nas comunidades rurais.

4.1.3. Utilização do biogás, oportunidades e desafios.

Segundo Martins e Oliveira (2011), o biogás pode ser utilizado de diversas formas, sendo mais comum sua conversão em energia elétrica e térmica por meio de sistemas de cogeração. Esse aproveitamento é especialmente importante em áreas rurais, onde a infraestrutura de energia elétrica pode ser limitada. Para Myers et al. (2023), outra possibilidade de uso é a purificação do biogás para obtenção de biometano, um combustível com poder calorífico semelhante ao gás natural, que pode ser utilizado em veículos ou injetado na rede de distribuição. A viabilidade dessa alternativa tem crescido com os incentivos para combustíveis de baixo carbono.

O biogás também se insere no contexto da economia circular. Ellacuriaga, García-Cascallana e Gómez (2021) afirmam que, além da geração de energia, o processo de digestão anaeróbia gera digestato, um subproduto rico em nutrientes que pode ser utilizado como fertilizante agrícola, promovendo o fechamento do ciclo de nutrientes.

Bhatt e Tao (2020) e Myers et al. (2023) reforçam que, no contexto brasileiro, o uso do biogás também tem papel importante na substituição de combustíveis fósseis, na geração de biofertilizantes e no fornecimento de eletricidade para propriedades rurais. Contudo, eles alertam para desafios relacionados à ausência de políticas públicas consistentes que incentivem, de forma uniforme, a produção e utilização de biogás no país.

Nesse sentido, o biogás aparece em destaque para diversas formas de aplicação, mas as principais apontadas pelos autores são a cogeração de energia elétrica e térmica, como biometano e como fertilizante. A Figura 3 apresenta a distribuição percentual das principais formas de utilização dos produtos derivados da valorização de resíduos suínos, com base nos dados quantitativos extraídos dos estudos experimentais e de simulação elegíveis mapeados na literatura.

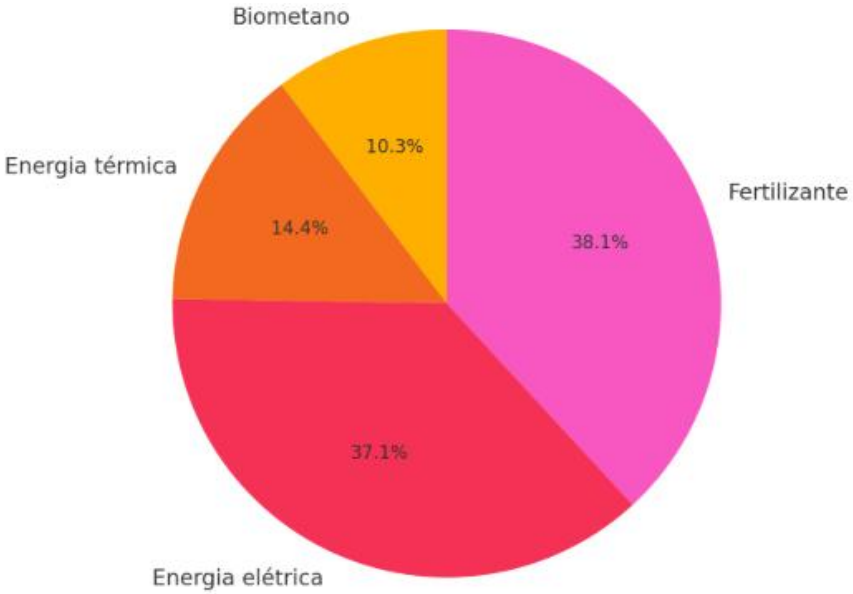


Figura 3 - Distribuição Percentual das Formas de Utilização do Biogás. Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 3 apresenta a distribuição das principais temáticas abordadas nos estudos analisados nesta revisão sistemática. Os resultados foram obtidos a partir da análise de 58 estudos publicados, selecionados com base nos critérios de elegibilidade definidos na metodologia. Conforme ilustrado, observa-se que a produção de fertilizantes representa a maior parcela das utilizações, correspondendo a 38,1% do total. Em seguida, destaca-se a geração de energia elétrica, com 37,1%, evidenciando a relevância do aproveitamento energético dos resíduos. A energia térmica apresenta uma participação de 14,4%, enquanto o biometano corresponde a 10,3%, indicando que, embora presentes, essas formas de aproveitamento ainda possuem menor representatividade em comparação às demais. Esses resultados refletem uma tendência de priorização de produtos com maior demanda econômica e facilidade de implementação tecnológica no contexto analisado.

Apesar das oportunidades, a utilização do biogás enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios, apontado por Bhatt e Tao (2020), está relacionado aos altos custos de implantação e operação dos sistemas de biodigestão, especialmente quando associados a unidades de purificação para obtenção de biometano. Estudos, como o realizado por Myers et al. (2023), mostram que, para que a produção seja economicamente viável, é necessário atingir economias de escala, geralmente com unidades que atendam múltiplas propriedades ou utilizem a codigestão com outros resíduos orgânicos, como restos agrícolas. Além disso, Bhatt e Tao (2020) afirmam que a produtividade dos biodigestores é relativamente baixa quando comparada a outros processos de bioenergia, o que exige grandes volumes de substrato para gerar quantidades significativas de energia.

Do ponto de vista técnico, a operação estável dos biodigestores depende de uma série de variáveis, como temperatura, pH, concentração de nutrientes e ausência de contaminantes. Segundo Córdova et al. (2022), a presença de metais pesados ou compostos tóxicos pode comprometer a atividade microbiológica, reduzindo a produção de metano e até levando à falha do processo. Ademais, Bonmatí, Campos e Flotats (2003) ressaltam que a alta concentração de água nos dejetos suínos torna o transporte do substrato caro e ineficiente, além de exigir grandes volumes de armazenamento. A necessidade de manutenção constante, o controle rigoroso dos parâmetros operacionais e a gestão adequada dos parâmetros operacionais e a gestão adequada do digestato também são barreiras que dificultam a adoção da tecnologia, especialmente em pequenas e médias propriedades.

4.2. Viabilidade da produção e utilização do hidrogênio.

4.2.1. Viabilidade econômica.

A viabilidade técnica e econômica da produção de hidrogênio a partir de biomassa depende de múltiplos fatores, como a disponibilidade de resíduos, a maturidade das tecnologias de conversão, a eficiência energética dos processos e a possibilidade de integração com outras cadeias produtivas. Wijayasekera et al. (2022) indicam que rotas termoquímicas como a gaseificação e a reforma a vapor, são mais eficazes em termos de rendimento energético e pureza do hidrogênio produzido. Em ambientes rurais, a produção descentralizada de hidrogênio pode ser uma alternativa viável, como demonstrado por Posso, Siguencia e Narváez (2020), que analisaram a integração da produção de hidrogênio com cooperativas agrícolas no Equador, promovendo ganhos econômicos e redução na dependência de combustíveis fósseis.

Wodołażski, Magdziarczyk e Smoliński (2023) conduziram uma análise econômica de uma planta piloto de reforma a vapor de biogás de suinocultura, estimando um custo de produção inferior a US$ 3/kg. O estudo sugere que, com incentivos fiscais e apoio regulatório, essa tecnologia pode se tornar competitiva frente ao hidrogênio cinza.

A valorização de resíduos orgânicos para produção energética é também destacada por Worawimut et al. (2019), que reforçam a sustentabilidade da cadeia produtiva do biohidrogênio em comparação com fontes fósseis, devido à baixa pegada de carbono e ao aproveitamento de recursos locais. Adicionalmente, a digestão anaeróbia em duas etapas tem sido proposta como uma solução tecnológica eficiente para aumentar o rendimento energético. Deng et al. (2024) demonstraram que esse arranjo permite a produção sequencial de bio-hidrogênio e biometano, aproveitando de forma mais completa os resíduos com alto teor de sólidos.

Outros estudos, como o de Martínez-Ramón et al. (2024), propõem a utilização de *chemical looping dry reforming* como estratégia para otimizar a reforma de biogás. Essa tecnologia reduz as emissões e melhora a eficiência do processo, tornando-se uma alternativa atrativa para integração em plantas de biogás existentes.

Finalmente, Sahota, Kumar e Lombardi (2024) observam que a viabilidade do bio-hidrogênio depende também da aceitação social e da adoção de políticas públicas de incentivo à energia renovável. O apoio institucional é crucial para superar as barreiras econômicas iniciais e criar um ambiente favorável à inovação tecnológica.

4.2.2. Viabilidade ambiental.

A viabilidade ambiental do hidrogênio, especialmente do hidrogênio verde, está fortemente ligada ao seu potencial de substituição dos combustíveis fósseis com impactos significativamente menores ao meio ambiente. Segundo Jain et al. (2024), um dos maiores atrativos ambientais do hidrogênio é o fato de que, durante sua combustão, o único subproduto gerado é o vapor d'água, não havendo emissão direta de dióxido de carbono (CO_2), o que contribui para a mitigação das mudanças climáticas.

A produção de hidrogênio a partir de resíduos orgânicos via fermentação escura tem se mostrado uma alternativa ecologicamente sustentável. Para Ferreira et al. (2018), essa tecnologia permite a valorização de resíduos agroindustriais, urbanos e alimentares, utilizando bactérias anaeróbias para a conversão de matéria orgânica em biohidrogênio, reduzindo a carga poluidora desses rejeitos. Dados apontados por Myers et al. (2023) indicam que a implementação desses sistemas pode resultar em uma redução média de 21,7% na intensidade de carbono e até 95,4% na emissão de material particulado em propriedades rurais.

Awogbemi, Ojo e Adeleye (2024) destacam que a conversão termocatalítica de resíduos agrícolas, como palha, cascas e bagaço, para a produção de hidrogênio verde evita a queima a céu aberto e o descarte inadequado desses materiais, promovendo uma gestão sustentável dos resíduos e diminuindo a emissão de poluentes atmosféricos. Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular e da neutralidade de carbono, promovendo benefícios ambientais e energéticos.

Ademais, para Sahota, Kumar e Lombardi (2024), a integração de tecnologias, como a fermentação escura seguida da digestão anaeróbia (DF-AD), permite a obtenção de *biohythane* (mistura

de H_2 e CH_4), aumentando a eficiência energética da conversão e reduzindo a geração de resíduos orgânicos não aproveitados. Esse processo integrado contribui para a economia de recursos e menor emissão de gases de efeito estufa, tornando-se uma estratégia viável ambiental e tecnicamente. Contudo, a viabilidade da implementação integrada, conforme apontado por Rajagopal et al. (2011), enfrenta barreiras específicas, como a incompatibilidade de pH entre os reatores (pH ~5,5 para H_2 e ~7,0 para metano) e o manejo do nitrogênio amoniacal, que pode ser insuficiente para desnitrificação se a matéria orgânica for consumida excessivamente nas fases iniciais.

Por fim, Zhang et al. (2024) realizaram a avaliação de sistemas piloto de produção de bio-hidrogênio por fermentação, identificando que a emissão de CO_2 equivalente por tonelada de H_2 produzido é significativamente menor que em métodos convencionais, o que reforça o papel ambiental positivo do bio-hidrogênio. Apesar de desafios operacionais e energéticos, os autores demonstram que os impactos ambientais podem ser mitigados com o controle de temperatura, estratégias de iluminação e otimização dos reatores.

Dessa forma, a produção de bio-hidrogênio a partir de resíduos representa uma alternativa tecnicamente promissora e ambientalmente viável, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável, à redução de emissões e à valorização de recursos antes considerados descartáveis.

4.2.3. Fontes de resíduos utilizadas para produção de hidrogênio.

Diversas fontes de biomassa residual vêm sendo exploradas para a produção de hidrogênio, com destaque para resíduos agrícolas, agroindustriais, alimentares e pecuários. Segundo Posso, Siguencia e Narváez (2020), resíduos lignocelulósicos, como palha de milho e bagaço de cana, são amplamente disponíveis em países agrícolas e oferecem grande potencial de aproveitamento energético.

Zhu et al. (2009) demonstraram que dejetos de suínos são uma fonte viável para a fermentação escura, sendo ricos em matéria orgânica e amplamente disponíveis em regiões com produção pecuária intensiva. Adicionalmente, o estudo de Xu e Deshusses (2015) indicou o uso de *duckweed* cultivado em águas residuárias suinícolas como um substrato eficaz para a produção de hidrogênio em fermentação escura, com significativa remoção de nutrientes e produção de H_2.

Machhirake et al. (2024) apontam que resíduos alimentares urbanos, como restos de frutas e vegetais, são altamente biodegradáveis e ricos em carboidratos, favorecendo a fermentação escura e melhorando o rendimento de hidrogênio quando usados em codigestão. Sahota, Kumar e Lombardi (2024) também reforçam o uso de resíduos alimentares como uma rota sustentável, destacando seu potencial na produção combinada de *biohythane*.

Lin et al. (2023) ressaltam o uso inovador de resíduos de pelos suínos, tradicionalmente descartados sem aproveitamento energético, demonstrando que tais resíduos podem ser utilizados em processos de gaseificação catalítica com alto rendimento de H_2.

Martínez-Ramón et al. (2024) destacam que o biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, como esterco, vinhaça ou resíduos agrícolas, pode ser utilizado uma reforma química de alta eficiência energética, especialmente por meio da técnica de *chemical looping dry reforming*. Ferreira et al. (2018) ampliam a discussão ao considerar o uso de resíduos líquidos, como águas residuais industriais e efluentes de laticínios, os quais, após tratamento com microalgas, tornam-se substratos promissores para produção de hidrogênio via rotas biológicas. Tal abordagem também contribui para a economia circular e para o tratamento de efluentes.

Por fim, Deng et al. (2024) estudaram a utilização da manipueira, subproduto da produção de farinha de mandioca, como fonte de biomassa com alta carga orgânica. A digestão anaeróbia em duas fases demonstrou que, com pré-tratamento adequado e sólidos elevados, o rendimento de hidrogênio pode ser significativamente aumentado.

4.2.4. Utilização do hidrogênio, oportunidades e desafios.

O hidrogênio gerado a partir de biomassa tem aplicações promissoras em setores diversos, destacando-se como alternativa estratégica para a descarbonização da matriz energética. Wijayasekera et al. (2022) afirmam que sua utilização em células a combustível pode substituir combustíveis fósseis no transporte pesado e na indústria, reduzindo significativamente as emissões de gases de efeito estufa.

Apesar de seu potencial, a produção de hidrogênio a partir de biomassa ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos significativos. Machhirake et al. (2024) relatam que os processos biológicos, como a fermentação escura, apresentam baixos rendimentos de hidrogênio e a produção de subprodutos indesejáveis, o que compromete a eficiência geral do sistema.

Segundo Luna-delRisco et al. (2024), a descentralização da produção permite que comunidades rurais tenham acesso a fontes limpas de energia, aumentando a segurança energética e promovendo inclusão socioeconômica. Posso, Siguencia e Narváez (2020) apontam que o hidrogênio pode ser integrado a microrredes híbridas, combinando-se a sistemas fotovoltaicos e eólicos, elevando a confiabilidade do suprimento energético. Porém, segundo Worawimut et al. (2019), o transporte e armazenamento da biomassa residual representam gargalos logísticos importantes, especialmente em áreas distantes dos centros de consumo de energia. Isso impõe limitações à escalabilidade de projetos descentralizados.

Além de sua aplicação direta, o hidrogênio pode ser convertido em vetores energéticos, como amônia ou metanol. Martínez-Ramón et al. (2024) destacam que essas rotas facilitam o armazenamento e o transporte do hidrogênio, especialmente em regiões com infraestrutura energética limitada. O uso industrial do hidrogênio também se mostra estratégico. Awogbemi, Ojo e Adeleye (2024) salientam sua aplicação na indústria química e siderúrgica, substituindo o hidrogênio cinza em processos de síntese e redução, o que contribui para a meta global de neutralidade de carbono.

Na mobilidade, veículos movidos a células a combustível de hidrogênio já vêm sendo testados em diversos países. Machhirake et al. (2024) reforçam que o avanço das tecnologias de armazenamento de hidrogênio pressurizado ou líquido poderá tornar os veículos a hidrogênio mais competitivos em comparação aos elétricos a bateria.

Do ponto de vista ambiental, a substituição do hidrogênio cinza pelo hidrogênio verde pode reduzir drasticamente a pegada de carbono de setores industriais intensivos em energia. Nesse sentido, Sahota, Kumar e Lombardi (2024) defendem a adoção de critérios de sustentabilidade e rastreabilidade para garantir que o hidrogênio produzido a partir de biomassa seja efetivamente classificado como renovável. Por fim, Ferreira et al. (2018) apontam que políticas de incentivo, incluindo subsídios e créditos de carbono, são fundamentais para ampliar o uso do hidrogênio de biomassa, uma vez que ele ainda enfrenta competição com fontes mais consolidadas. Posso, Siguencia e Narváez (2020) enfatizam a necessidade urgente de políticas públicas claras para regulamentar, certificar e incentivar a produção de hidrogênio verde. Sem mecanismos legais e econômicos robustos, como subsídios e incentivos fiscais, a competitividade do hidrogênio de biomassa frente ao hidrogênio cinza continuará limitada. Nessa perspectiva, a transição energética dependerá não apenas da inovação tecnológica, mas também de marcos regulatórios claros e de investimentos em infraestrutura.

5. Conclusões.

Diante dos resultados obtidos, é possível concluir que a avaliação da viabilidade econômica e ambiental da utilização de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio exige uma análise integrada de aspectos técnicos, econômicos, ambientais e regulatórios. A produção de biogás a partir de resíduos suínos, por meio da digestão anaeróbia, apresenta-se como uma tecnologia madura, consolidada e amplamente validada tanto no contexto técnico quanto ambiental. Esse processo oferece benefícios significativos, como a mitigação de gases de efeito estufa, especialmente metano, a valorização de resíduos agropecuários e a geração de subprodutos como o biofertilizante, que contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Do ponto de vista econômico, a viabilidade do biogás está diretamente relacionada à escala de operação, à existência de incentivos financeiros, à possibilidade de geração de energia para autoconsumo e à comercialização de subprodutos e créditos de carbono. Modelos de negócios baseados em plantas centralizadas, cooperativas e sistemas de codigestão vêm se mostrando alternativas eficazes para reduzir custos operacionais e viabilizar economicamente a tecnologia, especialmente em pequenas e médias propriedades. Contudo, desafios persistem, principalmente relacionados aos altos custos de implantação, à logística de transporte dos resíduos e às necessidades de manutenção e operação dos sistemas.

Por sua vez, a produção de hidrogênio a partir de resíduos suínos, embora apresente elevado potencial na transição para uma matriz energética de baixo carbono, encontra-se em estágio tecnológico menos consolidado. As rotas tecnológicas, como a fermentação escura, a gaseificação e a reforma a

vapor do biogás, demonstram viabilidade ambiental expressiva, com significativa redução na pegada de carbono quando comparadas aos processos convencionais de hidrogênio cinza. No entanto, os desafios econômicos e técnicos ainda são consideráveis, sobretudo no que se refere aos custos elevados, à eficiência dos processos, à pureza do hidrogênio produzido e à necessidade de desenvolvimento de tecnologias mais robustas, acessíveis e escaláveis.

Em termos ambientais, tanto o biogás quanto o hidrogênio provenientes de resíduos suínos oferecem contribuições relevantes, promovendo a redução da emissões de gases de efeito estufa, o aproveitamento de resíduos orgânicos e a substituição parcial ou total de combustíveis fósseis, além de estarem alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os relacionados à energia limpa, à ação climática e à produção responsável.

Apesar dos avanços observados, permanecem lacunas que precisam ser enfrentadas para a consolidação dessas tecnologias. Destacam-se a escassez de estudos aplicados em contextos específicos, como regiões tropicais, a ausência de modelos econômicos adaptados à realidade de pequenos produtores, a necessidade de desenvolvimento de sistemas modulares e de baixo custo, bem como a carência de políticas públicas mais robustas que incentivem a adoção dessas soluções, tanto no setor agropecuário quanto na matriz energética.

Por outro lado, o cenário apresenta diversas oportunidades, como o desenvolvimento de processos integrados que combinem a produção de biogás, hidrogênio e biofertilizantes, a expansão dos mercados de bioenergia e créditos de carbono e o fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis e de baixo carbono. Ademais, o avanço tecnológico em sistemas de reforma química, digestão em múltiplas fases e gaseificação assistida por catalisadores ou micro-ondas representa um caminho promissor para aumentar a eficiência e a viabilidade econômica dessas soluções.

Adicionalmente, é imperativo reconhecer a influência da heterogeneidade operacional e do próprio substrato nos resultados de viabilidade. Ao contrário das condições controladas ideais, os sistemas reais apresentam variações constantes em parâmetros operacionais críticos, como temperatura e carga orgânica, que impactam diretamente a estabilidade microbiológica. Nesse sentido, a heterogeneidade intrínseca do dejeto suíno, o qual não é um resíduo padronizado e frequentemente é misturado a outros substratos nos estudos analisados, isso introduz uma complexidade adicional à modelagem desses processos. Tais variações têm o potencial de moderar significativamente a viabilidade econômica e o desempenho ambiental das rotas de conversão, sendo fatores determinantes para a transição de escalas laboratoriais para aplicações industriais robustas.

Portanto, a utilização de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio configura-se como uma estratégia tecnicamente viável, ambientalmente necessária e economicamente promissora. Contudo, sua plena implementação depende de um conjunto de ações coordenadas, envolvendo investimentos em pesquisa, desenvolvimento tecnológico, capacitação técnica, criação de marcos regulatórios favoráveis e incentivos financeiros adequados. Dessa forma, essa solução se apresenta como um vetor estratégico para a transição energética, para a descarbonização da agroindústria e para o fortalecimento de práticas sustentáveis na gestão de resíduos.

A partir do mapeamento do panorama global consolidado nesta revisão, evidencia-se que o próximo passo metodológico lógico para o avanço da área consiste na aplicação prática desses modelos teóricos em estudos de caso focados em regiões que concentram alta densidade suinícola e forte demanda por descarbonização logística. Sob essa perspectiva, o Meio-Oeste Catarinense sobressai-se como um cenário estratégico para investigação, uma vez que a região é marcada pela proeminência da agroindústria e por expressivos desafios logísticos no escoamento de sua produção pecuária.

No horizonte das pesquisas sobre biogás, uma linha promissora envolve a integração entre a produção de biogás e a geração de hidrogênio veicular (H_2V), com foco na substituição gradual do diesel no transporte rodoviário de cargas. Considerando o potencial do Meio-Oeste Catarinense, região marcada pela alta densidade da suinocultura e pelo papel estratégico da agroindústria, torna-se fundamental investigar a viabilidade técnica e econômica dessa integração, de modo a consolidar o biogás e o hidrogênio como vetores energéticos sustentáveis e competitivos.

Assim, uma linha promissora para investigações futuras envolve a integração entre a geração local de biogás e a produção de hidrogênio veicular (H_2V), direcionada especificamente à substituição gradual do diesel no transporte rodoviário de cargas desse ecossistema regional. Para tanto, torna-se fundamental o desenvolvimento de modelos baseados em dinâmica de sistemas que permitam simular

cenários integrados, avaliar os impactos de políticas públicas locais e prever o comportamento da cadeia de suprimentos sob restrições técnicas e econômicas reais.

O estudo futuro intitulado "Modelagem da Produção Integrada de Biogás e Hidrogênio a partir de Resíduos Suínos para o Transporte Rodoviário de Cargas no Meio-Oeste Catarinense: Uma Abordagem Baseada em Dinâmica de Sistemas" será direcionado a esse objetivo, verticalizando os achados globais desta revisão na realidade produtiva catarinense. Além disso, recomenda-se que futuras investigações explorem a integração do biogás e do hidrogênio com outras fontes renováveis, como solar e eólica, em sistemas híbridos que atendam à demanda energética do setor de transporte. A combinação dessas fontes tem potencial para aumentar a resiliência e a eficiência da matriz energética, ao mesmo tempo em que reduz os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, o avanço no conhecimento sobre modelagem, transporte e uso do biogás e do hidrogênio poderá contribuir significativamente para a consolidação de soluções energéticas mais limpas, alinhadas à transição energética global.

Referências.

ADNANE, I. et al. *Valorization of crop residues and animal wastes: Anaerobic co-digestion technology.* ***Heliyon***, v. 10, n. 5, p. e26440, 15 mar. 2024.

ANKATHI, S. K. et al. *Sustainability of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Food Waste and Animal Manure.* ***Applied Microbiology***, v. 4, n. 1, p. 418–438, 21 fev. 2024.

AVACI, A. B. et al. *Financial economic scenario for the microgeneration of electric energy from swine culture-originated biogas.* ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 25, p. 272–276, 1 set. 2013.

AWOGBEMI, O.; OJO, A. A.; ADELEYE, S. A. *Advanced Thermochemical Conversion Approaches for Green Hydrogen Production from Crop Residues.* ***Journal of Renewable Materials***, v. 12, n. 1, p. 1, 1 jan. 2024.

BHATT, A. H.; TAO, L. *Economic Perspectives of Biogas Production via Anaerobic Digestion.* ***Bioengineering***, v. 7, n. 3, p. 74, 14 jul. 2020.

BOEKER, M.; VACH, W.; MOTSCHALL, E. *Google Scholar as replacement for systematic literature searches: good relative recall and precision are not enough.* ***BMC Medical Research Methodology***, v. 13, n. 1, p. 131, 26 out. 2013.

BOLDRIN, A. et al. *Optimised biogas production from the co-digestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHG and economic accounting.* ***Energy***, v. 112, p. 606–617, 1 out. 2016.

BONMATÍ, A. et al. *Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry.* ***Water Science and Technology***. Anais...IWA Publishing, 2001.

BONMATÍ, A.; CAMPOS, E.; FLOTATS, X. *Concentration of pig slurry by evaporation: Anaerobic digestion as the key process.* ***Water Science and Technology***. Anais...IWA Publishing, 2003.

CASTRO E SILVA, H. L. DE et al. *Lab-scale and economic analysis of biogas production from swine manure.* ***Renewable Energy***, v. 186, p. 350–365, 1 mar. 2022.

CHATELLARD, L. et al. *Trends and challenges in biohydrogen production from agricultural waste. In*: ***Biohydrogen Production***: *Sustainability of Current Technology and Future Perspective*. Springer India, 2016. p. 69–95.

CHETAWAN, W. et al. *Practical approaches for retrofitting plug flow digester and process control to maximize hydrolysis and methane yield from piggery waste.* ***Journal of Environmental Chemical Engineering***, v. 9, n. 4, p. 105620, 1 ago. 2021.

CÓRDOVA, M. E. H. et al. *Analysis of viable biogas production from anaerobic digestion of swine manure with the magnetite powder addition.* ***Environmental Technology & Innovation***, v. 25, p. 102207, 1 fev. 2022.

DENG, C. et al. *Economic viability of two-stage biohydrogen and biomethane production from cassava stillage residue focusing on solids content and pretreatment.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 52, p. 110–121, 2 jan. 2024.

ELLACURIAGA, M.; GARCÍA-CASCALLANA, J.; GÓMEZ, X. *Biogas Production from Organic Wastes: Integrating Concepts of Circular Economy.* ***Fuels***, v. 2, n. 2, p. 144–167, 29 abr. 2021.

FERRARESI DE ARAUJO, G. J.; WALTER BORGES DE OLIVEIRA, S. V. *Economic, energetic and environmental analysis of the utilization of swine manure in Brazil: Opportunities and challenges.* ***Energy Strategy Reviews***, v. 47, p. 101089, 1 maio 2023.

FERREIRA, A. et al. *Combining biotechnology with circular bioeconomy: From poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen.* ***Environmental Research***, v. 164, p. 32–38, 1 jul. 2018.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C.; MOLINUEVO-SALCES, B.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. C. *Evaluation of anaerobic codigestion of microalgal biomass and swine manure via response surface methodology.* ***Applied Energy***, v. 88, n. 10, p. 3448–3453, 1 out. 2011.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, A. et al. *Energy-environmental benefits and economic feasibility of anaerobic codigestion of Iberian pig slaughterhouse and tomato industry wastes in Extremadura (Spain).* ***Bioresource Technology***, v. 136, p. 109–116, 1 maio 2013.

HADDAWAY, N. R. et al. *The Role of Google Scholar in Evidence Reviews and Its Applicability to Grey Literature Searching.* ***PLOS ONE***, v. 10, n. 9, p. e0138237, 17 set. 2015.

HOLLAS, C. E. et al. *Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production.* ***Journal of Cleaner Production***, v. 354, p. 131654, 20 jun. 2022.

HU, Y. Y. et al. *Study of an enhanced dry anaerobic digestion of swine manure: Performance and microbial community property.* ***Bioresource Technology***, v. 282, p. 353–360, 1 jun. 2019.

HUANG, W. et al. *Low-temperature hydrothermal pretreatment followed by dry anaerobic digestion: A sustainable strategy for manure waste management regarding energy recovery and nutrients availability.* ***Waste Management***, v. 70, p. 255–262, 1 dez. 2017.

HUANG, W. et al. *Enhancing hydrogenotrophic activities by zero-valent iron addition as an effective method to improve sulfadiazine removal during anaerobic digestion of swine manure.* ***Bioresource Technology***, v. 294, p. 122178, 1 dez. 2019.

IGLIŃSKI, B. et al. *Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential.* ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 16, n. 7, p. 4890–4900, 1 set. 2012.

IPIALES, R. P. et al. *Swine manure management by hydrothermal carbonization: Comparative study of batch and continuous operation.* ***Environmental Research***, v. 245, p. 118062, 15 mar. 2024.

JAIN, R. et al. *Bio-hydrogen production through dark fermentation: an overview.* ***Biomass Conversion and Biorefinery***. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 1 jun. 2024.

JIANG, Y. et al. *Improved environmental sustainability and bioenergy recovery through pig manure and food waste on-farm co-digestion in Ireland.* ***Journal of Cleaner Production***, v. 280, p. 125034, 20 jan. 2021.

JOANNA BRIGGS INSTITUTE, *Checklist* for Analytical Cross Sectional Studies Critical Appraisal *Checklist* for Analytical **Cross Sectional Studies 2** .Disponível em: <http://joannabriggs.org/research/critical-appraisal-tools.htmlwww.joannabriggs.org>.

JOHNSON, N. *Fueling a Sustainable Future: Surmounting Challenges And Expanding The Frontisers Of* ***Biogas Generation From Pig Slurry***. 12 jan. 2024.

LI, Y. et al. *Feasibility of biogas production from anaerobic co-digestion of herbal-extraction residues with swine manure.* ***Bioresource Technology***, v. 102, n. 11, p. 6458–6463, 1 jun. 2011.

LIN, H. C. et al. *Enhanced biomethane production with a low carbon footprint via anaerobic co-digestion of swine wastewater with rice husk.* ***Science of The Total Environment***, v. 891, p. 164612, 15 set. 2023.

LIN, K. S. et al. *Hydrogen generation by gasification of pig hair biowaste over NiO/Al2O3 nanocatalyst.* ***Materials Today Sustainability***, v. 24, p. 100495, 1 dez. 2023.

LOCKWOOD, C.; PORRITT, K.; MUNN, Z.; RIGGINS, R. *Systematic reviews of qualitative evidence. In*: AROMATARIS, E.; MUNN, Z. (ed.). ***Joanna Briggs Institute Reviewer's Manual***. Adelaide: Joanna Briggs Institute, 2017.

LUCA CANTO, G. DE et al. Revisões sistemáticas da literatura: guia prático. **Revisões sistemáticas da literatura: guia prático**, 2020.

LUNA-DELRISCO, M. et al. *Geospatial analysis of hydrogen production from biogas derived from residual biomass in the dairy cattle and porcine subsectors in Antioquia, Colombia.* ***Renewable Energy Focus***, v. 50, p. 100591, 1 set. 2024.

LYMPERATOU, A. et al. *Improving the Anaerobic Digestion of Swine Manure through an Optimized Ammonia Treatment: Process Performance, Digestate and Techno-Economic Aspects.* ***Energies***, v. 14, n. 3, p. 787, 2 fev. 2021.

MACHHIRAKE, N. P. et al. *Biohydrogen from waste feedstocks: An energy opportunity for decarbonization in developing countries.* ***Environmental Research***, v. 252, p. 119028, 1 jul. 2024.

MADEIRA, J. G. F. et al. *Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 46, n. 13, p. 8961–8971, 19 fev. 2021.

MARTÍNEZ-RAMÓN, N. et al. *Life-cycle assessment of hydrogen produced through chemical looping dry reforming of biogas.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 78, p. 373–381, 12 ago. 2024.

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. DE. *Economic analysis of the generation of electric energy from biogas in pig production.* ***Engenharia Agrícola***, v. 31, n. 3, p. 477–486, 2011.

MASSÉ, D. I.; RAJAGOPAL, R.; SINGH, G. *Technical and operational feasibility of psychrophilic anaerobic digestion biotechnology for processing ammonia-rich waste*. ***Applied Energy***, v. 120, p. 49–55, 1 maio 2014.

MASSIGNAN, C.; STEFANI, C. M.; CANTO, G. L. Introdução à análise do risco de viés em revisões sistemáticas. *In*: CANTO, G. L.; STEFANI, C. M.; MASSIGNAN, C. (org.). **Risco de viés em revisões sistemáticas**: guia prático. Florianópolis: Centro Brasileiro de Pesquisas Baseadas em Evidências – COBE UFSC, 2021. Cap. 1. Disponível em: https://guiariscodeviescobe.paginas.ufsc.br/capitulo-1-introducao/. Acesso em: 20 fev. 2026.

MENEZES LIMA, J. A. et al. *Techno-economic and performance evaluation of energy production by anaerobic digestion in Brazil: bovine, swine and poultry slaughterhouse effluents.* ***Journal of Cleaner Production***, v. 277, p. 123332, 20 dez. 2020.

MICHAILIDOU, I. et al. *Enhancing Biogas Production: An Assessment of Pasteurization Effects on Poultry, Swine, Bovine Manure and Food Waste Substrates.* ***Sustainability***, v. 16, n. 16, p. 7130, 20 ago. 2024a.

MICHAILIDOU, I. et al. *Enhancing Biogas Production: An Assessment of Pasteurization Effects on Poultry, Swine, Bovine Manure and Food Waste Substrates.* ***Sustainability***, v. 16, n. 16, p. 7130, 20 ago. 2024b.

MYERS, G. M. et al. *Cost Assessment of Centralizing Swine Manure and Corn Stover Co-Digestion Systems*. ***Energies***, v. 16, n. 11, p. 4315, 1 jun. 2023.

NAKASHIMA, R. N.; JUNIOR, S. O. *Trade-offs between productivity, efficiency and costs of biogas plants for agriculture wastes*. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS, 34., 2021. ***Proceedings*** [...]. ECOS 2021 Program Organizer, 2021.

PALOMAR, C. R. et al. *Ozonation as Pretreatment of Digested Swine Manure Prior to Microalgae Culture*. ***Water (Switzerland)***, v. 16, n. 12, p. 1740, 1 jun. 2024.

PARAMESWARAN, P.; RITTMANN, B. E. *Feasibility of anaerobic co-digestion of pig waste and paper sludge*. ***Bioresource Technology***, v. 124, p. 163–168, 1 nov. 2012.

PINTO, J. A. et al. *Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis*. ***Cleaner Waste Systems***, v. 5, p. 100097, 1 ago. 2023.

POSSO, F.; SIGUENCIA, J.; NARVÁEZ, R. *Residual biomass-based hydrogen production: Potential and possible uses in Ecuador*. ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 45, n. 26, p. 13717–13725, 11 maio 2020.

RAJAGOPAL, R. et al. *Combined anaerobic and activated sludge anoxic/oxic treatment for piggery wastewater*. ***Bioresource Technology***, v. 102, n. 3, p. 2185–2192, 1 fev. 2011.

ROCHA-MENESES, L. et al. *An Overview of the Socio-Economic, Technological, and Environmental Opportunities and Challenges for Renewable Energy Generation from Residual Biomass: A Case Study of Biogas Production in Colombia*. ***Energies***, v. 16, n. 16, p. 5901, 9 ago. 2023.

SAHOTA, S.; KUMAR, S.; LOMBARDI, L. *Biohythane, Biogas, and Biohydrogen Production from Food Waste: Recent Advancements, Technical Bottlenecks, and Prospects.* ***Energies***, v. 17, n. 3, p. 666, 30 jan. 2024.

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. *Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil.* ***Biomass and Bioenergy***, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 1 set. 2009.

SHAMSEER, L. et al. *Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: elaboration and explanation.* ***BMJ***, v. 349, 2 jan. 2015.

SHI, B. et al. *Opportunities for centralized regional mode of manure and sewage management in pig farming: The evidence from environmental and economic performance.* ***Waste Management***, v. 170, p. 240–251, 1 out. 2023.

SHIH, M. F. et al. *Exploring the environmental and economic potential for biogas production from swine manure wastewater by life cycle assessment.* ***Clean Technologies and Environmental Policy***, v. 25, n. 2, p. 451–464, 1 mar. 2023.

VRIEZE, J. DE et al. *Resource recovery from pig manure via an integrated approach: A technical and economic assessment for full-scale applications.* ***Bioresource Technology***, v. 272, p. 582–593, 1 jan. 2019.

WIJAYASEKERA, S. C. et al. *Waste-to-hydrogen technologies: A critical review of techno-economic and socio-environmental sustainability.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 47, n. 9, p. 5842–5870, 29 jan. 2022.

WIJESINGHE, D. T. N. et al. *Developing an anaerobic digester with external Zeolite filled column for enhancing methane production from swine manure–A feasibility study.* ***Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes***, v. 53, n. 11, p. 751–760, 2 nov. 2018.

WODOŁAŻSKI, A.; MAGDZIARCZYK, M.; SMOLIŃSKI, A. *Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production from Swine Manure Biogas via Steam Reforming in Pilot-Scale Installation.* ***Energies***, v. 16, n. 17, p. 6389, 3 set. 2023.

WORAWIMUT, C. et al. *Performance evaluation of biogas upgrading systems from swine farm to biomethane production for renewable hydrogen source.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 44, n. 41, p. 23135–23148, 30 ago. 2019.

XU, J.; DESHUSSES, M. A. *Fermentation of swine wastewater-derived duckweed for biohydrogen production.* ***International Journal of Hydrogen Energy***, v. 40, n. 22, p. 7028–7036, 15 jun. 2015.

ZHANG, Q. et al. *Biological fermentation pilot-scale systems and evaluation for commercial viability towards sustainable biohydrogen production.* ***Nature Communications***, v. 15, n. 1, p. 1–12, 28 maio 2024.

ZHU, J. et al. *Swine manure fermentation for hydrogen production.* ***Bioresource Technology***, v. 100, n. 22, p. 5472–5477, 1 nov. 2009.

Apêndice A – Protocolo de análise de viés.

Item	
1. Framework conceitual	Viabilidade Econômica e Ambiental do Uso de Resíduos Suínos para a Produção de Biogás e Hidrogênio
2. Contexto	Análise da viabilidade econômica, ambiental e o uso de biogás e hidrogênio com matéria prima principal os resíduos suínos
3. Horizonte	Sem limitação de anos
4. Correntes teóricas	Energias renováveis, economia circular, descarbonização, viabilidade econômica e ambiental.
5. Idiomas	Português, Inglês, Espanhol
6. Questão de revisão	Como é possível avaliar a viabilidade econômica e ambiental da utilização de resíduos suínos para a produção de biogás e hidrogênio?
7. Estratégia de revisão	( ) Agregativa (X) Configurativa
8. Critérios de busca	**Inclusão:** - Estudos onde a produção de hidrogênio ocorra através de biogás; - Estudos que estejam relacionados com a produção de biogás e hidrogênio através de dejetos suínos;
	Exclusão: - Estudos onde a produção de hidrogênio não ocorra através do biogás; - Estudos que não estejam relacionados com a produção de biogás e hidrogênio através de dejetos suínos; - Não é um estudo de caso
9. Fontes de busca	Scopus, Web of Science
10. Busca Adicional	Google Scholar
11. Softwares	Parsifal

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Apêndice B – Protocolo de análise de qualidade.

Nº	Critério de Avaliação
1	O artigo inclui avaliação ou menção aos impactos ambientais do método utilizado?
2	O artigo aborda sobre a temática de biogás e hidrogênio?
3	O artigo apresenta dados de produtividade?
4	O artigo inclui análise de viabilidade econômica ou ambiental do método utilizado?
5	O artigo discute a escalabilidade ou aplicabilidade prática do método de produção?
6	O artigo sugere melhorias ou recomendações para métodos de produção futuros?
7	O artigo utiliza resíduos suínos como biomassa principal?
8	O artigo compara diferentes métodos ou tecnologias de biodigestão ou de produção de hidrogênio?
9	O artigo conta com uma estruturação boa, com resumo, referencial teórico, metodologia e conclusões?
10	O escopo da revisão está em conformidade com a produção de biogás e hidrogênio?

Critérios de avaliação	**Percentual considerado**
- Alta qualidade	Acima de 70%
- Moderada qualidade	Entre 50% e 69%
- Baixa qualidade	Abaixo de 49%
- Não aplicável	0%

Fonte: Adaptado de Joanna Briggs Institute (2017).

Apêndice C – Matriz de extração de dados dos artigos incluídos na revisão.

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Ankathi et al., 2024)	Biogás	Digestão anaeróbia	Alimentos + esterco animal	EUA	Gás natural barato, alto custo inicial	Políticas públicas, bioenergia em expansão	Energia, biometano, combustível, circular	Energia elétrica, térmica, biometano e fertilizante
(Avaci et al., 2013)	Biogás	Digestão anaeróbia	Dejetos suínos	Brasil	Alto custo, dependência de crédito carbono	Uso de créditos, políticas de incentivo	Energia elétrica	Energia elétrica e fertilizante
(Awogbemi et al., 2024)	H_2	Pirólise, gaseificação, micro-ondas	Resíduos agrícolas	Nigéria	Custo alto, baixa qualidade, tempo longo	Integração de processos, hidrogênio verde	Energia, transporte, indústria	Energia limpa
(Bhatt; Tao, 2020)	Biogás	Digestão anaeróbia	Lodo ETE, alimentos, esterco	EUA	Custo alto, variabilidade, escala	Tecnologias menores e mais baratas	Energia, combustível, redes de gás	Energia, térmica e fertilizante
(Boldrin et al., 2016)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Chorume suíno + beterraba	Dinamarca	Custo alto com silagem, impactos econômicos	Plantas de médio a grande porte	Energia, térmica, redução de GEE	Energia, térmica, biometano e fertilizante
(Bonmatí et al., 2001)	Biogás	Digestão mesofílica + pré-tratamento térmico	Chorume suíno	Espanha	Pouco biogás sem pré-tratamento, inibição	Pré-tratamento abaixo de 90ºC reduz amônia	Energia elétrica e térmica	Energia elétrica, térmica e fertilizante
(Bonmatí et al., 2003)	Biogás	Digestão anaeróbia	Esterco suíno	Espanha	Transporte caro, emissões	Otimizar cogeração	Cogeração, uso rural	Energia térmica e fertilizante
(de Castro e Silva et al., 2022)	Biogás	Digestão (ASBRs)	Esterco suíno	Brasil	Escala limitada sem venda de biofertilizante	Valorização com biofertilizante	Energia, fertilizantes	Energia elétrica e fertilizante
(Chetawan et al., 2021)	Biogás	Digestão plug flow + microaeração + pré-hidrólise	Efluente suinícola	Tailândia	Digestores antigos, baixa degradação	Aumento de 20% na produção de metano	Energia elétrica e térmica	Energia elétrica, térmica e fertilizante

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Córdova et al., 2022)	Biogás	Digestão + magnetita	Esterco suíno	Brasil	Dosagem, traços, microbiologia	Nanomateriais, mais metano	Energia, redução de gases, fertilizante	Energia e fertilizante
(Deng et al., 2024)	Ambos	Fermentação escura + Digestão anaeróbia	Resíduo de manipueira	China	Alto custo e pré-tratamento complexo	Produção integrada de biohythane	Energia, combustível veicular	Energia e combustível
(Ellacuriaga et al., 2021)	Biogás	Digestão + complementares	Orgânicos, agrícolas	Espanha	Custo, metais, resíduos inertes	Pré-tratamento, redes, biofertilizantes	Cogeração, gás, fertilizantes	Energia, biometano e fertilizante
(Ferraresi de Araujo; Walter Borges de Oliveira, 2023)	Biogás	Digestão anaeróbia	Dejetos suínos	Brasil	Falta de políticas e infraestrutura	Políticas coordenadas e incentivos	Energia, biometano, biofertilizantes	Energia, biometano e fertilizante
(Ferreira et al., 2018)	H_2	Cultivo + fermentação escura	Efluentes diversos	Portugal	Composição variável, rendimento incerto	Economia circular, integração bioenergia	Energia elétrica, mobilidade sustentável	Energia limpa
(González-Fernández et al., 2011)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Matadouro e tomate	Espanha	Resíduo variável, balanço de nutrientes	Escala industrial e uso hídrico	Energia, térmica, irrigação	Energia e fertilizante
(Hollas et al., 2022)	Biogás	Digestão anaeróbia	Resíduos da suinocultura	Brasil	Emissões e infraestrutura para purificação	Substituição de fósseis em pequenas fazendas	Energia, biometano, cogeração	Energia, biometano e fertilizante
(Hu et al., 2019)	Biogás	Digestão seca + pré-tratamento térmico	Esterco suíno	China/França	Pouco metano sem pré-tratamento	390% mais metano com pré-tratamento	Energia elétrica e térmica	Energia elétrica e fertilizante
(Huang et al., 2017)	Biogás	Digestão seca + pré-tratamento hidrotérmico	Esterco suíno	Japão	Compostos inibitórios, controle térmico	Recuperação de nutrientes e bioenergia	Energia, fertilizantes	Energia elétrica e fertilizante
(Huang et al., 2019)	Biogás	Digestão + ferro metálico	Esterco + sulfadiazina	China/Japão	Antibióticos, segurança ambiental	Nanomateriais e controle de antibióticos	Energia e aplicações agrícolas	Energia e fertilizante

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Igliński et al., 2012)	Biogás	Digestão anaeróbia	Esterco, alimentos, silagem	Polônia	Alto custo, regulação, subsídios	Mais substratos, incentivos, cogeração	Cogeração, venda de excedente	Energia elétrica e térmica
(Ipiales et al., 2024)	Biogás	Carbonização hidrotérmica (HTC)	Esterco suíno (fração sólida)	Espanha	Qualidade do hydrochar, viabilidade econômica	HTC contínuo, recuperação de nutrientes	Biochar, nutrientes, combustível sólido	Energia elétrica, térmica e fertilizante
(Jain et al., 2024)	H_2	Fermentação escura	Alimentos e agrícolas	Índia	Baixo rendimento, competição	Integração com digestão e biorrefinarias	Energia, biohythane, célula combustível	Energia limpa
(Jiang et al., 2021)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Esterco + resíduos alimentares	Irlanda	Emissão de CH_4 e NH_3, energia do processo	Fertilizantes otimizados, eficiência	Energia, térmica, fertilizantes	Energia elétrica, biometano, fertilizante
(JOHNSON, 2024)	Biogás	Digestão + pré-tratamento (zeólita/ferro)	Chorume suíno	Nigéria	Amônia, pH, umidade, microbiota	Pré-tratamento, metas ODS da ONU	Cogeração, combustível, redes de gás	Energia elétrica, térmica e fertilizante
(Li et al., 2011)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Ervas medicinais + esterco	China	Balanceamento C/N, estabilidade	Integração com indústrias fitoterápicas	Energia, cogeração	Energia elétrica e fertilizante
(H. C. Lin et al., 2023)	Biogás	Codigestão com campo elétrico (EAAD)	Efluente suinícola + casca arroz	Taiwan	Infra elétrica, controle C/N	Retrofit para redução de carbono	Energia, redução de emissões	Biometano
(K. S. Lin et al., 2023)	H_2	Gaseificação catalítica	Pelo de suíno	Taiwan	Resíduo difícil, eficiência variável	Plantas piloto com H_2 de alta pureza	Energia, transporte, indústria	Energia limpa
(Luna-delRisco et al., 2024)	H_2	Digestão + reforma de metano	Biomassa de leite e suínos	Colômbia	Falta de incentivos e infraestrutura	Energia renovável, apoio ao hidrogênio	Combustível, indústria, energia	Energia e combustível

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Lymperatou et al., 2021)	Biogás	Digestão + pré-tratamento com amônia (AAS)	Esterco + fibras tratadas	Dinamarca	Alto teor de amônia, baixa degradação	Recuperação de NH_3, escala industrial	Energia, cogeração	Energia elétrica, térmica e fertilizante
(Machhirake et al., 2024)	H_2	Digestão, fermentação escura e foto	Resíduos urbanos, industriais	Índia	Barreiras econômicas e tecnológicas	Integração com renováveis e escalonamento	Energia, transporte, doméstico	Energia limpa
(Madeira et al., 2021)	H_2	Reforma a vapor + Water Gas Shift	Biogás de esterco suíno	Brasil	Eficiência energética, emissões	H_2 com eficiência exergética >76%	Indústria, transporte, célula combustível	Energia limpa
(Martínez-Ramón et al., 2024)	H_2	Reforma seca + looping químico (CLDRM)	Biogás	Espanha	Vazamentos de biogás, alto consumo energético	H_2 verde com melhores catalisadores	Células combustível, transporte, energia	Energia limpa
(Martins; De Oliveira, 2011)	Biogás	Digestão anaeróbia	Dejetos suínos	Brasil	Alto custo, demanda elevada	Políticas e alta demanda aumentam viabilidade	Cogeração	Energia e fertilizante
(Massé et al., 2014)	Biogás	Digestão psicrófila (PADSBR)	Esterco suíno + NH_4Cl	Canadá	Inibição por amônia	Estabilidade com controle de TKN e amônia	Energia elétrica	Energia elétrica e fertilizante
(Menezes Lima et al., 2020)	Biogás	Digestão anaeróbia UASB	Efluentes de abatedouro	Brasil	Custos elevados em HRT alto	Viabilidade com HRTs reduzidos	Energia, economia circular	Energia elétrica e fertilizante
(Michailidou et al., 2024)	Biogás	Digestão + pasteurização	Esterco (aves, suínos, bovinos), alimentos	Grécia	Efeito variável por substrato	Ajuste de processos e rendimento	Cogeração, saneamento, biofertilizantes	Energia e fertilizante
(Myers et al., 2023)	Biogás	Digestão anaeróbia	Esterco, palha de milho	EUA	Custo alto, crédito dependente	Reduzir transporte, usar créditos	Cogeração, biometano, rede	Energia, biometano e fertilizante

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Palomar et al., 2024)	Biogás	Digestão + microalgas (pós ozonização)	Digestato de esterco	Espanha	Alto consumo na ozonização, cultivo sensível	Microalgas para remoção de nutrientes	Tratamento, biomassa, economia circular	Fertilizante
(Parameswaran; Rittmann, 2012)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Esterco + lodo de papel	EUA	Inibição por amônia, equilíbrio nutrientes	Uso combinado de resíduos	Energia elétrica e térmica	Energia elétrica e fertilizante
(Pinto et al., 2023)	Biogás	Codigestão anaeróbia	Esterco bovino + suíno	Brasil	Escala da planta e proporção dos resíduos	Microgeração, redução de GEE em áreas rurais	Energia, fertilizantes	Energia elétrica e fertilizante
(Rajagopal et al., 2011)	Biogás	Digestão + lodo ativado	Efluente suíno	França	C/N baixo, carga variável	Otimizar N e bypass	Cogeração, redução de gases	Energia e fertilizante
(Rocha-Meneses et al., 2023)	Ambos	Digestão anaeróbia	Biomassa, alimentos, esterco	Colômbia	Baixa eficiência, alto custo	Políticas públicas, inovação, financiamento	Energia, aquecimento, biometano	Energia, biometano e fertilizante
(Sahota et al., 2024)	Ambos	Digestão + fermentação escura combinada	Resíduos alimentares	Índia/Itália	Instabilidade, custo operacional	Integração termoquímica, biorrefinarias	Energia, biometano, biofertilizantes	Energia e combustível renovável
(Salomon; Silva Lora, 2009)	Biogás	Digestão anaeróbia	Vinasse, urbanos, efluentes, esterco	Brasil	Baixo uso do potencial, falta de políticas	Apoio a políticas energéticas	Energia, cogeração, combustível alternativo	Energia elétrica
(Shi et al., 2023)	Biogás	Digestão centralizada	Dejetos + esgoto	China	Transporte, aceitação regional	Expansão do modelo regional	Energia, fertilizantes, economia circular	Energia, biometano e fertilizante
(Shih et al., 2023)	Biogás	Digestão + módulo rápido	Efluente suinícola	Taiwan	Reduzir impacto sem aumentar consumo	Fermentação rápida, renda rural sustentável	Energia, redução de carbono	Energia elétrica e fertilizante
(De Vrieze et al., 2019)	Biogás	Digestão + recuperação de nutrientes	Esterco suíno	Bélgica/Espanha	Alto custo de produtos refinados	Valorização de nutrientes, economia circular	Energia, fertilizantes	Energia elétrica, térmica e fertilizante

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Wijesinghe et al., 2018)	Biogás	Digestão + zeólita	Esterco suíno	Austrália	Amônia, baixa retenção de biomassa	Escalonamento, adsorção	Cogeração, substitui combustível fóssil	Energia e fertilizante
(Xu; Deshusses, 2015)	H_2	Fermentação escura + pré-tratamento ácido	Lentilha-d'água + efluente suíno	EUA	Baixa eficiência e pré-tratamento necessário	Escalação da fermentação de biomassa	Energia, substituição de fósseis	Energia limpa
(Zhang et al., 2024)	H_2	Fermentação escura + fotofermentação	Palha de milho hidrolisada	China	Consumo energético, controle térmico	Design otimizado (LEDs, enzimas)	Energia limpa, célula a combustível	Energia limpa
(Adnane et al., 2024)	Biogás	Codigestão com pré-tratamento	Resíduos agrícolas + esterco	Marrocos	Baixa biodegradabilidade, precisa pré-tratar	Escala industrial, tecnologias integradas	Energia, térmica, circular	Energia, térmica, biometano e fertilizante
(Chatellard et al., 2016)	H_2	Fermentação, fotofementação, bioeletroquímico	Resíduos agrícolas e alimentares	França	Biomassa pouco degradável, competição microbiana	Integração com biorrefinarias e pré-tratamento	Energia, insumos químicos, áreas rurais	Energia limpa
(Nakashima; Junior, 2021)	Biogás	Digestão + célula combustível SOFC	Esterco suíno	Brasil	Baixa densidade energética, alto custo SOFC	Otimização de HRT e densidade	Energia (SOFC), cogeração	Energia elétrica, térmica e fertilizante
(Posso et al., 2020)	H_2	Gaseificação e outras rotas	Biomassa agrícola, pecuária, florestal	Equador	Infraestrutura limitada	Suprir 38% da demanda energética do país	Energia, fertilizantes, indústria química	Energia e insumos industriais
(Wijayasekera et al., 2022)	H_2	Gaseificação, pirólise, fermentação, eletrólise	Resíduos urbanos, agrícolas e industriais	Canadá	Baixa maturidade tecnológica, custos altos	Integração com renováveis, redução de custos	Transporte, energia, indústria química	Energia e hidrogênio
(Wodołażski et al., 2023)	H_2	Reforma a vapor + WGS	Biogás de esterco suíno	Polônia	Alto custo inicial, controle térmico	Redução de GEE, captura de CO_2	Eletricidade, combustível limpo	Hidrogênio

Autor/Ano	Foco	Método	Resíduo	Local	Desafios	Oportunidades	Uso	Oportunidade Geral
(Worawimut et al., 2019)	Ambos	Digestão + purificação com DEA	Esterco suíno	Tailândia	Otimização de absorção e custos	Alta pureza (>96%) e produção de H_2	Biometano, H_2, energia	Energia e biometano
(Zhu et al., 2009)	H_2	Fermentação escura semi-contínua	Esterco suíno + glicose	EUA	Controle da metanogênese	Otimizar produtividade de H_2	Transporte, indústria	Hidrogênio

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).