EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Avaliação do Ciclo de Vida na Transição Energética Brasileira: Indicadores, Gargalos e Lacunas em uma Revisão Sistemática da Literatura

Giulihano Luis Feltz Zeni
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Micaela Inés Castillo Ulloa
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
João Victor Batista de Souza Henrique
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Vinicius Moretti
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Fabio Neves Puglieri
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Resumo: A transição energética brasileira depende de rotas que reduzam as emissões sem comprometer a viabilidade econômica, o uso da terra e o acesso à energia, e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a principal ferramenta para quantificar esse desempenho. Os resultados dos estudos, porém, estão dispersos entre os setores e são pouco comparáveis, o que dificulta a identificação de convergências e lacunas. Este artigo teve como objetivo mapear o estado da arte das aplicações da ACV nos setores brasileiros de energia e de combustíveis. Realizou-se uma revisão sistemática conforme o protocolo PRISMA 2020, na base de dados Scopus, com artigos originais em inglês publicados entre janeiro de 2022 e agosto de 2026, o que resultou em 28 estudos, agrupados em cinco eixos: biorrefinarias e combustíveis de aviação, matriz elétrica, resíduos e biogás, mobilidade e políticas públicas. A ACV foi aplicada em 26 estudos, dos quais 24 foram publicados a partir de 2023. As rotas analisadas mostraram desempenho favorável, como reduções de até 80% nas emissões da produção de metanol a partir de CO_2 biogênico e de até 55% no combustível sustentável de aviação de canola de segunda safra, além de híbridos a biocombustível com emissões inferiores às de veículos elétricos a bateria. Esses ganhos dependem do controle do uso da terra, dos custos do hidrogênio e da eletricidade renováveis, da infraestrutura e do arcabouço regulatório. Identificaram-se, ainda, heterogeneidade nas fronteiras e nas unidades funcionais, escassez de avaliações sociais e de ACV dinâmica, e predominância de estudos de caso pontuais.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, Transição Energética, Biocombustíveis, Matriz Elétrica.

Life Cycle Assessment in the Brazilian Energy Transition: Indicators, Bottlenecks, and Gaps in a Systematic Review

Abstract: Brazil's energy transition requires routes that reduce emissions without compromising economic viability, land use, or energy access, and Life Cycle Assessment (LCA) is the main tool for quantifying this performance. However, study results are scattered across sectors and are hardly comparable, hindering the identification of convergences and gaps. This article aimed to map the state of the art of LCA applications in the Brazilian energy and fuel sectors. A systematic review was conducted following the PRISMA 2020 protocol in the Scopus database, considering original English-language articles published between January 2022 and August 2026, resulting in 28 studies grouped into five axes: biorefineries and aviation fuels, electricity mix, waste and biogas, mobility, and public policies. LCA was applied in 26 studies, and 24 were published from 2023 onwards. The routes analyzed showed favorable performance, including emission reductions of up to 80% for methanol production from biogenic CO_2 and up to 55% for sustainable aviation fuel from second-crop canola, as well as biofuel hybrids with lower emissions than battery-electric vehicles. These gains depend on land-use control, the cost of hydrogen and renewable electricity, infrastructure, and the regulatory framework. The review also identified heterogeneous system boundaries and functional units, a scarcity of social assessments and dynamic LCA, and a predominance of isolated case studies.

Keywords: Life Cycle Assessment, LCA, Energy Transition, Biofuels, Electricity Mix.

1. Introdução

A transição energética brasileira precisa conciliar a demanda crescente por energia com a redução dos impactos ambientais. Peters et al. (2025) projetam que o aumento da demanda por eletricidade pode agravar os impactos ambientais globais do setor elétrico entre 2025 e 2050, o que torna estratégica a escolha das fontes de expansão. O desafio é maior em segmentos de difícil descarbonização, como a aviação, o transporte pesado e o calor de processo, e em comunidades isoladas da Amazônia, que ainda dependem de geração a diesel (MIRANDA; KULAY, 2023; COSTA; CAPAZ; BONATTO, 2023).

Nesse contexto, biocombustíveis, bioenergia e fontes renováveis assumem papéis complementares: o RenovaBio estruturou o mercado de Créditos de Descarbonização (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022); híbridos abastecidos com etanol ou biometano podem emitir menos, no ciclo Well-to-Wheel, do que veículos elétricos a bateria (GAUTO et al., 2023; DE CARVALHO; JÚNIOR; DE MENDONÇA BRASIL, 2023); os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) surgem como rota para metas como o CORSIA (FIORINI et al., 2023; PESCARINI et al., 2025); e o biogás de resíduos agropecuários amplia a oferta de energia renovável (HERRERA et al., 2026).

Avaliar se essas alternativas reduzem impactos exige uma visão de ciclo de vida, pois ganhos em uma etapa podem ser anulados em outra, como no uso da terra para matérias-primas de SAF (FIORINI et al., 2023) ou na logística de biomassa (MATHEUS et al., 2024). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a principal ferramenta para isso e vem sendo combinada a análises econômicas, sociais, espaciais e temporais (COSTA; OLIVEIRA, 2022; ALBUQUERQUE et al., 2025).

Contudo, os resultados da ACV dependem de fronteiras, unidades funcionais, fatores de emissão e condições locais, o que os torna pouco comparáveis entre si. A literatura também tende a se organizar por setor, o que oculta interdependências, como a das rotas de biocombustíveis com a matriz elétrica, e a dimensão social e a governança regulatória permanecem sub-representadas (COSTA; OLIVEIRA, 2022; GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022). Para a Engenharia de Produção, isso importa porque decisões sobre processos, localização de plantas, logística de biomassa e escolha de rotas exigem indicadores comparáveis e regionalizados.

Diante disso, este artigo tem por objetivo mapear o estado da arte das aplicações da ACV nos setores brasileiros de energia e combustíveis, respondendo a três questões: (i) quais rotas foram avaliadas e com quais indicadores; (ii) quais gargalos se repetem entre os setores; e (iii) quais lacunas persistem. Para isso, realizou-se uma revisão sistemática (PRISMA 2020) de estudos publicados entre 2022 e 2026.Os 28 estudos selecionados foram agrupados em cinco eixos temáticos: biorrefinarias e combustíveis de aviação, matriz elétrica, resíduos e biogás, mobilidade e políticas públicas. Os resultados indicam um desempenho ambiental, em geral, favorável, condicionado ao uso da terra, ao custo do hidrogênio e da eletricidade provenientes de matrizes renováveis, à infraestrutura e ao arcabouço regulatório, além de lacunas na avaliação social e na comparabilidade entre os estudos.

2. Metodologia

A revisão sistemática da literatura foi conduzida de acordo com as diretrizes do protocolo PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021), com o objetivo de mapear o estado da arte das aplicações do ACV no setor brasileiro de energia e combustíveis nos últimos 5 anos. A revisão foi estruturada para identificar estudos com aplicações práticas, permitindo compor um portfólio de artigos diretamente alinhado ao objeto da pesquisa. A utilização do protocolo PRISMA foi selecionada devido às recomendações e à aplicabilidade do

método em estudos de análise ambiental, como na seleção de indicadores (ZENI; PUGLIERI, 2024) e em estudos de oportunidades do ESG (HLUSZKO et al., 2024). Assim, para assegurar a pertinência e a consistência dos estudos selecionados, definiu-se a base de dados *Scopus*, devido à sua relevância e abrangência. A busca bibliográfica considerou artigos originais publicados em língua inglesa no período entre 01 de Janeiro de 2022 e 30 de Agosto de 2026, utilizando da *string* de pesquisa: *("life cycle assessment" OR "LCA") AND "Brazil"*.

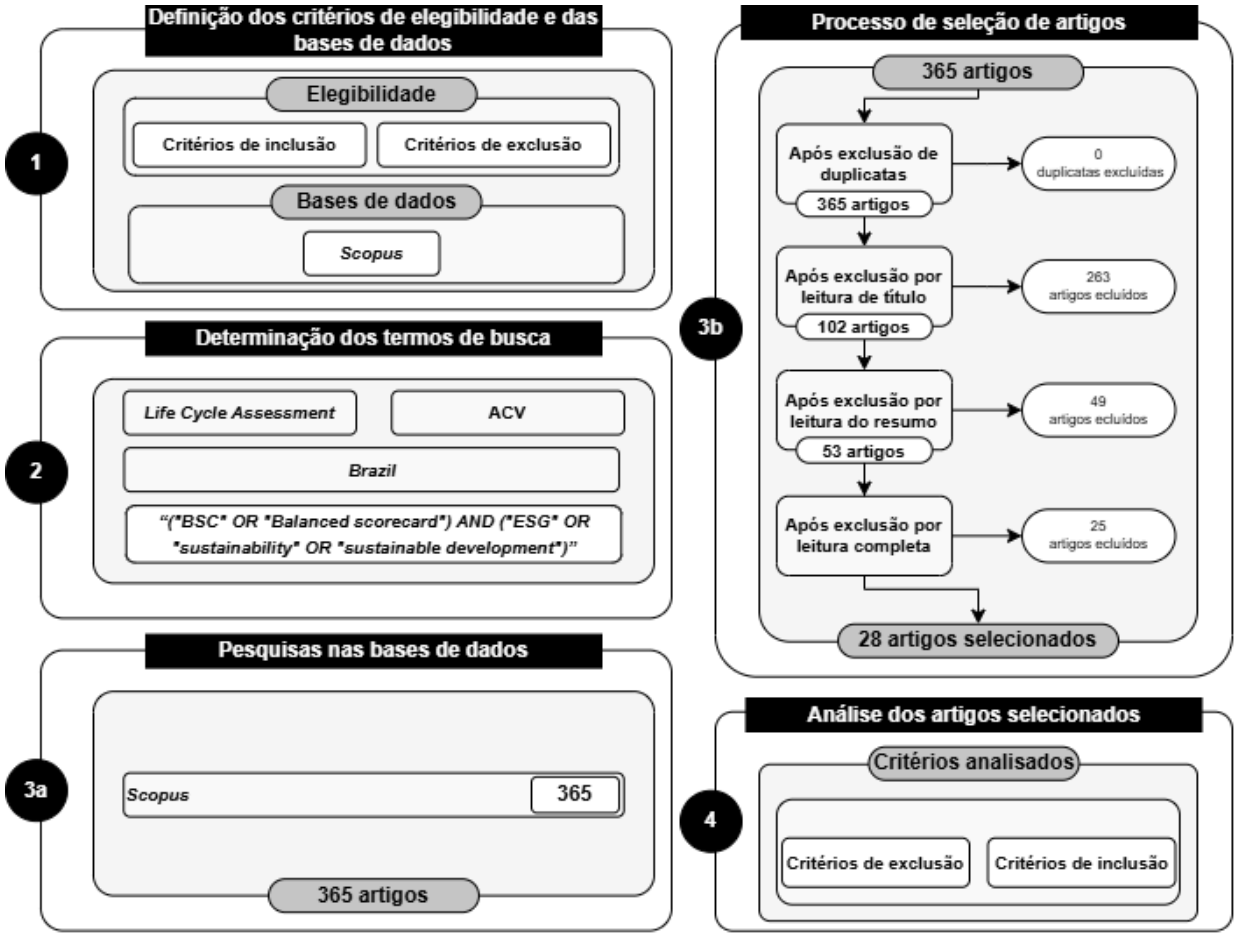
Para tal, os critérios de inclusão analisados foram: (i) Estudos que aplicam metodologias formais de ACV; (ii) Trabalhos com escopo geográfico e dados primários ou secundários regionalizados para o território brasileiro; (iii) Pesquisas focadas em sistemas de bioenergia, matriz elétrica, biocombustíveis ou mobilidade. Já os critérios de exclusão corresponderam a (i) capítulos de livro, (ii) artigos publicados em conferências; (iii) artigos sem aplicação prática; (iv) artigos que não foram publicados em língua inglesa. A adoção desses critérios buscou restringir a análise a estudos científicos que apresentassem evidências de aplicação do ACV no setor investigado, excluindo trabalhos predominantemente conceituais ou sem correspondência direta com o escopo definido.

O processo de seleção dos estudos seguiu as diretrizes PRISMA 2020 e foi organizado em quatro fases estruturadas, conforme ilustrado na Figura 1.

Para assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), toda a estrutura metodológica e os formulários de extração de dados foram submetidos a uma revisão cruzada entre os autores, visando a identificação e correção de potenciais inconsistências. Adicionalmente, os achados foram discutidos coletivamente e validados por meio de comparação com estudos correlatos previamente selecionados na literatura.

Na etapa final da RSL, utilizou-se suporte computacional constituído por duas ferramentas principais: (i) a versão mais recente do *Mendeley Reference Manager*, empregada no gerenciamento bibliográfico, na eliminação de duplicatas e na organização dos artigos selecionados; e (ii) o *Microsoft Excel*, utilizado no desenvolvimento dos formulários de coleta de dados, na síntese analítica das informações e na elaboração dos resultados e da discussão deste trabalho

Figura 1 – Revisão sistemática de literatura baseada no PRISMA 2020



Fonte: Autoria própria (2026).

3. Resultados e Discussões

A revisão sistemática da literatura, realizada com as etapas do *PRISMA 2020 statement* (PAGE et al., 2021), ilustrado na Figura 1, resultou em um portfólio final constituído de 28 artigos. Esses artigos são apresentados na Tabela 1, acompanhados de suas respectivas referências.

Tabela 1 – Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa

Título	Autores
Environmental impacts of sugarcane wax biorefining via Swenson process: a life cycle perspective with regional analysis of energy advantages	PRIMO *et al.* (2026).
Brazilian bioenergy generation from cattle and pig manure: An economic life cycle assessment	HERRERA et al. (2026).
Techno-economic and life cycle assessment of biomethane production from sugarcane vinasse: A pathway to circular bioeconomy in Brazil	GONG; LEONE; LUNELLI (2026).
Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass via circular salt recycling: Techno-economic and life cycle assessment	KANG; KIM (2026).
Uncovering environmental and economic hotspots of nuclear research reactors: A life cycle perspective	HONÓRIO *et al.* (2026).
Energy-environmental nexus in green hydrogen-assisted conversion of second-crop canola to sustainable aviation fuel: Toward low-carbon bioenergy systems	LAMAS *et al.* (2026).

Toward Sustainable Rail Transport: Well-to-Wheel Analysis of Locomotive Emissions Using Alternative Fuels	CALIMAN *et al.* (2026).
Strategic productive arrangements to leverage greenhouse gas emissions mitigation in the production of sustainable aviation fuels in Brazil	PESCARINI et al. (2025).
Understanding the environmental impact of residential electricity consumption in Brazil: integrating top-down and bottom-up approaches with Life Cycle Assessment	VAZ; SCOLARO; GHISI(2025).
Integrated Exergy, Exergoeconomic, and Exergoenvironmental Evaluations of Ethanol Production Using a Sugarcane Bagasse Cogeneration System	CAVALCANTI *et al.* (2026).
Integrated Spatiotemporal Life Cycle Assessment Framework for Hydroelectric Power Generation in Brazil	ALBUQUERQUE *et al.* ()2025.
Greenhouse Gas Payback of a Solar Photovoltaic System in Northeast Brazil: Effects of the Application of a Solar Coating	FONSECA *et al.* (2025).
A holistic analysis of environmental impacts and improvement pathways for the Brazilian electric sector based on long-term planning and life cycle assessment	PETERS *et al.* (2025)
Lifecycle assessment and environmental impacts of hybrid electric vehicles fuelled by bioethanol and biogas	SOARES; SODRE; BOLOY (2025).
Waste biogenic carbon to alternative methanol production: A comprehensive analysis for ethanol distilleries	RESTREPO-VALENCIA; CAPAZ; ORTIZ (2025).
The effect of transportation choices for mitigating climate-related impacts: The case of solid biofuels exported to Europe produced by Latin American countries	MATHEUS *et al. (*2024).
Livestock waste management for energy recovery in Brazil: a life cycle assessment approach	HOLLAS *et al.* (2024).
Carbon savings from sugarcane straw-derived bioenergy: Insights from a life cycle perspective including soil carbon changes	DE OLIVEIRA BORDONAL *et al.* (2024).
Sustainable aviation fuels must control induced land use change: an integrated assessment modelling exercise for Brazil	FIORINI *et al.* (2023).
Towards greater sustainability of sugarcane production by precision agriculture to meet ethanol demands in south-central Brazil based on a life cycle assessment	SANCHES *et al.* (2023).
Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol	DE CARVALHO; JÚNIOR; DE MENDONÇA BRASIL (2023).
A prospective study on the environmental feasibility of supplying electricity to the Brazilian Amazon through biogas power generation	MIRANDA; KULAY. (2023).
Small steps towards energy poverty mitigation: Life cycle assessment and economic feasibility analysis of a photovoltaic and battery system in a Brazilian indigenous community	COSTA; CAPAZ; BONATTO (2023).
Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles	GAUTO *et al.* (2023).
Social life cycle assessment of feedstocks for biodiesel production in Brazil	COSTA; OLIVEIRA (2022).
Energy balance and carbon footprint of very large-scale photovoltaic power plant	PAMPONET *et al.* (2022).
The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects	GRANGEIA; SANTOS; LAZARO (2022).

Autoria própria (2026).

A análise do portfólio de artigos selecionado com o PRISMA mostra um campo recente e metodologicamente ancorado na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Do total, 24 (85,7%) foram publicados a partir de 2023, e a ACV é empregada explicitamente em 26 (92,9%). Outros 11 (39,3%) incorporam também a dimensão econômica, por meio de análise técnico-econômica (TEA), custo ao longo do ciclo de vida (LCC), exergoeconomia e otimização com critérios de custo ou indicadores financeiros, como VPL, TIR e LCOE.

A leitura dos objetivos, objetos de estudo, abordagens metodológicas, unidades funcionais, indicadores e gargalos de cada trabalho permitiu agrupá-los em cinco eixos temáticos: biorrefinarias, SAF e BECCU (10 estudos; 35,7%); expansão da matriz elétrica (7; 25,0%); resíduos agropecuários, biogás e sistemas isolados (5; 17,9%); mobilidade sustentável (4; 14,3%); e políticas públicas e avaliação social (2; 7,1%). Os resultados são apresentados por eixo nos itens 3.1 a 3.5, com destaque para os indicadores quantitativos, as abordagens adotadas e os gargalos identificados. O item 3.6 discute, de forma integrada, as convergências, as interdependências e as lacunas entre os eixos.

3.1 Biorrefinarias Integradas 1G2G: Metanol Renovável (BECCU) e Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF)

A integração das biorrefinarias sucroenergéticas de primeira e segunda geração (1G2G) amplia o valor agregado e reduz o impacto ambiental ao longo da cadeia produtiva. Bordonal et al. (2024) mostram que a remoção moderada de palha (3-4 t/ha) maximiza a bioenergia sem comprometer o carbono orgânico do solo e amplia a geração de CBIOs, e Sanches et al. (2023) reportam que a aplicação de fertilizantes em taxa variável reduz em até 35,4% as emissões de N_2O nas soqueiras. Entre os coprodutos, o biometano de vinhaça atinge preço mínimo de US$ 0,47/m^3, VPL de US$ 1,98 milhão e intensidade de carbono de 11,8 g CO_2eq/MJ, 80% inferior à do gás natural (GONG; LEONE; LUNELLI, 2026), e o ganho de escala reduz o preço mínimo do ácido láctico (KANG; KIN, 2024). Cavalcanti et al. (2026) apontam a fornalha como principal ponto de perda de energia (32,53%).

A captura e a conversão do CO_2 biogênico da fermentação em metanol renovável (BECCU) é economicamente atraente: o VPL varia de US$ 87,4 milhões (modelo 1G padrão) a US$ 609,3 milhões (cenário 1G2G otimizado), com Preço Mínimo de Venda (MSP) entre US$ 35,0/m³ (US$ 2,2/GJ) e US$ 95,9/m^3 (US$ 6,0/GJ). A rota reduz em 40% as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em relação à gasolina fóssil com hidrogênio cinza e em 70% a 80% com hidrogênio verde (H_2V) fotovoltaico, cujo custo é o principal gargalo (RESTREPO-VALENCIA; CAPAZ; ORTIZ, 2025).

Nos Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF), a Liquefação Hidrotermal (HTL) de bagaço e palha reduz as emissões em 73% a 82% em relação ao querosene fóssil (Jet-A1), com MSP de US$ 15,4/GJ contra US$ 16,2/GJ, mas exige a secagem da borra e o tratamento do efluente (DEUBER et al., 2023). Em escala territorial, Pescarini et al. (2025) estimam intensidades de carbono de −25,06 a +29,67 g CO_2eq/MJ no Centro-Sul. Atender à demanda dos aeroportos de Guarulhos, Galeão e Brasília exigiria entre 2,4 e 5,6 milhões de hectares de pastagens degradadas, com mitigação de 3 a 7 Mt CO_2eq/ano. O aproveitamento de 18 milhões de hectares permitiria abater 101 - 160 Mt CO_2eq/ano (8% a 13% da NDC), com até 270 TWh de bioeletricidade excedente.

Na rota HEFA com canola de segunda safra, o ciclo Well-to-Wake (WTW) emite 40,32 g CO_2eq/MJ com H_2V fotovoltaico e 39,19 g CO_2eq/MJ com H_2V eólico, com abatimento de até 55% em relação ao Jet-A1 (87,90 g CO_2eq/MJ), e a etapa agrícola responde pela maior parcela (34,2 g CO_2eq/MJ). O resultado depende do uso da terra: o cultivo em áreas degradadas, sem desmatamento, gera um balanço líquido de até −286,8 g CO_2eq/MJ, enquanto taxas históricas de desmatamento geram até +15,0 g CO_2eq/MJ por mudança direta do uso da terra (dLUC) (LAMAS et al., 2026). Fiorini et al. (2023) reforçam a necessidade de controlar o desmatamento e a mudança indireta do uso da terra (iLUC) na expansão das áreas destinadas à produção de matérias-primas de SAF.

3.2 Mobilidade Sustentável e Análise Well-to-Wheel (WTW)

Os quatro estudos adotam a fronteira WTW e indicam que os biocombustíveis, isolados ou associados à hibridização, competem com a eletrificação plena da frota brasileira. Gauto et al. (2023) estimam 59,5 g CO_2eq/km para híbridos a biometano e 77,5 g CO_2eq/km para E100, abaixo dos valores dos veículos elétricos a bateria (BEV) no Brasil (104,8) e na Europa (145,3). Em escala de frota, E100 e híbridos levam as emissões a 69 Mt CO_2eq em 2050, resultado melhor do que o dos cenários de eletrificação rápida com baterias (CARVALHO; BRASIL JR.; BRASIL, 2023). No transporte pesado, o biometano de vinhaça reduz as emissões da logística agrícola (SOARES; SODRÉ; BOLOY, 2025), e as misturas B25 e GNL diminuem GEE e MP2,5 em locomotivas em relação ao B10 (CALIMAN et al., 2025). Os gargalos são de infraestrutura (postos de biometano, compressão e distribuição, adaptação de motores) e de emissões na fabricação e na reciclagem de baterias. A diferença entre o BEV no Brasil e na Europa mostra que a vantagem da eletrificação depende da matriz elétrica.

3.3 Resíduos Agropecuários, Biogás e Sistemas Isolados (SISOL)

Na pecuária, a biodigestão anaeróbia com aproveitamento do biometano neutraliza até 90% das emissões de metano provenientes dos dejetos suínos, desde que não haja vazamentos (HOLLAS et al., 2024). No Centro-Oeste, o custo de geração é de US$ 0,01/kWh (suínos) e US$ 0,09/kWh (bovinos), e a geração distribuída eleva a rentabilidade em até 38,5%, mas a exclusão do setor agropecuário do SBCE (Lei nº 15.042/2024) limita a monetização dos créditos (NARANJO HERRERA et al., 2026). Nos Sistemas Isolados (SISOL) da Amazônia, o biogás de codigestão reduz a ecotoxicidade e os GEE em mais de 70% em relação ao diesel, com restrição da logística fluvial na estiagem (MIRANDA; KULAY, 2023). Na comunidade indígena Catual (RR), o sistema fotovoltaico com baterias evita 189,8 t CO_2eq e, em média, economiza US$ 9.000 ao longo de 25 anos, mas depende de financiamento não reembolsável devido ao CAPEX (COSTA; CAPAZ; BONATTO, 2023). Na exportação de biocombustíveis sólidos, o transporte rodoviário até os portos é o principal *hotspot*, e o consumo local é ambientalmente preferível (MATHEUS et al., 2024).

3.4 Expansão da Matriz Elétrica e Avaliação do Ciclo de Vida

Peters et al. (2025) projetam que o crescimento da demanda pode deteriorar os impactos ambientais globais do sistema elétrico entre 2025 e 2050, e identificam hidrelétrica, eólica *onshore* e fotovoltaica centralizada como as opções de melhor compromisso custo-impacto (com incerteza sobre a eólica *offshore*). No consumo residencial, as emissões variam de 384 a 766 kg CO_2eq/moradia/ano, com chuveiros e refrigeradores como *hotspots* (VAZ; SCOLARO; GHISI, 2025). A fotovoltaica de 158 MWp em Bom Jesus da Lapa (BA) apresenta 38,3 - 44,8 g CO_2eq/kWh e tempo de retorno energético (EPBT) de 4,5 - 5,3 anos

(PAMPONET; RODRIGUES, 2021), e o revestimento autolimpante reduz as perdas por sujidade e o tempo de retorno de GEE (FONSECA et al., 2025). Para o calor de processo, o solar térmico emite 50 vezes menos GEE do que o gás natural, com TIR de 29,46% (BARBOSA et al., 2022). Na hidroeletricidade, as emissões do reservatório de Sinop (MT) são elevadas nos primeiros anos e decaem exponencialmente, com forte variabilidade entre os biomas (ALBUQUERQUE et al., 2025). Em um reator nuclear de pesquisa, a operação e o combustível de urânio são os principais determinantes de custo e de toxicidade (HONÓRIO et al., 2026). Nenhuma tecnologia domina em todas as dimensões: há *trade-offs* entre custo e categorias de impacto, e o desempenho depende de fatores temporais e espaciais.

3.5 Políticas Públicas e Avaliação Social do Ciclo de Vida

Apenas dois estudos (7,1%) tratam de governança e impactos sociais. Grangeia, Santos e Lazaro (2022) apontam a necessidade de consolidar o arcabouço legal do RenovaBio, melhorar a rastreabilidade das matérias-primas e aprimorar a RenovaCalc, e destacam a sensibilidade das metas de CBIOs a choques macroeconômicos e a preços de commodities. Na S-LCA do biodiesel, as cooperativas melhoram o bem-estar dos trabalhadores, mas o trabalho forçado e as disparidades salariais por gênero e raça persistem nas cadeias de pecuária e de milho (COSTA; OLIVEIRA, 2022). Os demais eixos dialogam com essa agenda: CBIOs (BORDONAL et al., 2024), RenovaCalc (SANCHES et al., 2023), SBCE (NARANJO HERRERA et al., 2026) e CORSIA (FIORINI et al., 2023).

3.6 Convergências, Interdependências e Lacunas

A Tabela 2 sintetiza os principais indicadores e gargalos de cada eixo. Os indicadores são, em geral, favoráveis, mas os gargalos se repetem entre os eixos, e a leitura conjunta é qualitativa, pois as métricas e as unidades funcionais diferem.

Tabela 2 – Síntese de indicadores e gargalos por eixo temático

Eixo	Indicadores	Gargalos
Biorrefinarias, SAF, BECCU	VPL de US$ 87,4 - 609,3 milhões e redução de até 80% de GEE (BECCU); abatimento de até 55% (SAF-HEFA); 101 - 160 Mt CO_2eq/ano (SAF, Centro-Sul)	Custo do H_2V; uso da terra; infraestrutura aeroportuária
Mobilidade sustentável	59,5 (híbrido a biometano) e 77,5 (E100) vs. 104,8 g CO_2eq/km (BEV)	Rede de abastecimento; emissões de baterias
Resíduos, biogás e SISOL	US$ 0,01 - 0,09/kWh; até 90% do metano evitado; redução >70% frente ao diesel	Vazamentos; logística; CAPEX; exclusão do SBCE
Matriz elétrica	38,3 - 44,8 g CO_2eq/kWh e EPBT de 4,5 - 5,3 anos (FV)	Incerteza sobre eólica offshore; dados secundários; emissões de reservatórios
Políticas públicas e S-LCA	Avaliação predominantemente qualitativa	Consolidação legal; rastreabilidade; trabalho forçado e disparidades salariais

Autoria própria (2026).

A ACV predomina, mas as fronteiras (*cradle-to-gate, cradle-to-grave, Well-to-Wheel* e *Well-to-Wake*) e as unidades funcionais (ao menos dez, como ha, MJ, kWh, km, tkm, kg e m^3)

variam, o que impede a comparação direta dos indicadores da Tabela 2 e recomenda bases energéticas comuns (MJ ou kWh). Somam-se à dependência de dados secundários (VAZ; SCOLARO; GHISI, 2025) e à sensibilidade a fatores locais de N_2O (DE OLIVEIRA BORDONAL et al., 2024; LAMAS et al., 2026).

Há também interdependências entre os eixos. O abatimento de até 80% do BECCU e a menor intensidade do HEFA com hidrogênio verde pressupõem eletricidade renovável a custo viável, e a competitividade do veículo elétrico depende da matriz elétrica (GAUTO et al., 2023), o que sugere planejar de forma conjunta a matriz elétrica (PETERS et al., 2025) e as rotas de biocombustíveis. O uso da terra é outra variável transversal: em Fiorini et al. (2023), Pescarini et al. (2025) e Lamas et al. (2026), o sinal do balanço climático depende do tipo de área e do desmatamento, e a remoção de palha só é benéfica em limites que preservem o carbono do solo.

A valorização de resíduos (palha, vinhaça e dejetos) também é transversal, mas esbarra na sazonalidade e na logística (GONG; LEONE; LUNELLI, 2026; MIRANDA; KULAY, 2023; MATHEUS et al., 2024). O CAPEX elevado (COSTA; CAPAZ; BONATTO, 2023; BARBOSA et al., 2022), a infraestrutura de distribuição (PESCARINI et al., 2025) e as lacunas de cobertura e governança de CBIOs, SBCE e CORSIA (GRANGEIA; SANTOS; LAZARO, 2022; HERRERA et al., 2026) completam o conjunto de barreiras.

4. Conclusão

A revisão sistemática de 28 estudos publicados entre 2022 e 2026 mostra que a ACV está consolidada nos setores brasileiros de energia e combustíveis: é empregada em 26 dos 28 trabalhos e 85,7% dos trabalhos foram publicados a partir de 2023. As rotas analisadas apresentam, em geral, desempenho ambiental favorável e, em vários casos, viabilidade econômica, como o BECCU, com VPL positivo e redução de até 80% das emissões com hidrogênio verde; o biometano de vinhaça, com intensidade de carbono 80% inferior à do gás natural; e os híbridos a biocombustível, com emissões inferiores às dos veículos elétricos a bateria no ciclo *Well-to-Wheel*.

Esses ganhos, porém, dependem de quatro fatores recorrentes: o controle do uso da terra, do qual depende o sinal do balanço climático dos biocombustíveis avançados; o custo e a origem do hidrogênio e da eletricidade renováveis, que ligam as rotas de biocombustíveis à matriz elétrica; as barreiras de infraestrutura, logística e financiamento; e a solidez do arcabouço regulatório. Isso indica que o planejamento energético, agrícola e regulatório deve ser integrado, e não conduzido setor a setor.

Como lacunas, destacam-se a escassez de avaliações sociais, o uso restrito de ACV dinâmicas, a predominância de estudos de caso pontuais e a falta de harmonização das fronteiras e das unidades funcionais. Por se restringirem à base Scopus e aos critérios de elegibilidade, os resultados têm caráter qualitativo. Sugere-se, em trabalhos futuros, ampliar as bases e os idiomas da busca e desenvolver modelos integrados que articulem a matriz elétrica, os biocombustíveis e o uso da terra, com métricas padronizadas.

Referências

ALBUQUERQUE, Vanessa Cardoso de et al. Integrated Spatiotemporal Life Cycle Assessment Framework for Hydroelectric Power Generation in Brazil. **Energies**, v. 18, n. 21, p. 5606, 2025.

BARBOSA, Rafaela Ramos et al. Economic and greenhouse gas assessments for two hot water industrial systems: solar vs. natural gas. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, p. 100365, 2022.

CALIMAN, Rafaella et al. Toward Sustainable Rail Transport: Well-to-Wheel Analysis of Locomotive Emissions Using Alternative Fuels. **Transportation Research Record**, p. 03611981251398752, 2026.

CAVALCANTI, Eduardo JC et al. Integrated Exergy, Exergoeconomic, and Exergoenvironmental Evaluations of Ethanol Production Using a Sugarcane Bagasse Cogeneration System. **International Journal of Energy Research**, v. 2026, n. 1, p. 4193901, 2026.

COSTA, Marina Weyl; OLIVEIRA, Amir AM. Social life cycle assessment of feedstocks for biodiesel production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, p. 112166, 2022.

COSTA, Vinicius BF; CAPAZ, Rafael S.; BONATTO, Benedito D. Small steps towards energy poverty mitigation: Life cycle assessment and economic feasibility analysis of a photovoltaic and battery system in a Brazilian indigenous community. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 180, p. 113266, 2023.

DE CARVALHO, Enio Nascimento; JÚNIOR, Antônio César Pinho Brasil; DE MENDONÇA BRASIL, Augusto César. Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol. **Energy Reports**, v. 10, p. 2582-2596, 2023.

DE OLIVEIRA BORDONAL, Ricardo et al. Carbon savings from sugarcane straw-derived bioenergy: Insights from a life cycle perspective including soil carbon changes. **Science of the Total Environment**, v. 947, p. 174670, 2024.

DEUBER, Raquel de Souza et al. Production of sustainable aviation fuels from lignocellulosic residues in Brazil through hydrothermal liquefaction: Techno-economic and environmental assessments. **Energies**, v. 16, n. 6, p. 2723, 2023.

FIORINI, Ana Carolina Oliveira et al. Sustainable aviation fuels must control induced land use change: an integrated assessment modelling exercise for Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 1, p. 014036, 2023.

FONSECA, Luiz Felipe Souza et al. Greenhouse Gas Payback of a Solar Photovoltaic System in Northeast Brazil: Effects of the Application of a Solar Coating. **Energy Engineering**, v. 122, n. 8, 2025.

GAUTO, Marcelo Antunes et al. Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. **Energy for Sustainable Development**, v. 76, p. 101261, 2023.

GONG, Rosana; LEONE, Isabel Campanile; LUNELLI, Betânia Hoss. Techno-economic and life cycle assessment of biomethane production from sugarcane vinasse: A pathway to circular bioeconomy in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 209, p. 109002, 2026.

GRANGEIA, Carolina; SANTOS, Luan; LAZARO, Lira Luz Benites. The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management: X**, v. 13, p. 100156, 2022.

HANANTO, A. L.; TIRTA, A.; HERAWAN, S. G.; IDRIS, M.; SOUDAGAR, M. E. M.; PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **bmj**, v. 372, 2021.

HERRERA, Ana María Naranjo et al. Brazilian bioenergy generation from cattle and pig manure: An economic life cycle assessment. **Renewable Energy**, p. 125345, 2026.

HLUSKO, Cleiton; HLUSKO, Kelwin; ZENI, Giulihano Luis Feltz; PUGLIERI, Fabio Neves; DE FRANCISCO, Antonio Carlos. Integrando estratégias ambientais, sociais e de

governança em empresas baseadas na bioeconomia circular: barreiras, oportunidades e principais impulsionadores. **Anais [...]**. Ponta Grossa: XIV ConBrepro, 2024.

HOLLAS, Camila Ester et al. Livestock waste management for energy recovery in Brazil: a life cycle assessment approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 3, p. 4705-4720, 2024.

HONÓRIO, D. H. et al. Uncovering environmental and economic hotspots of nuclear research reactors: A life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 571, p. 148805, 2026.

KANG, Donggeun; KIM, Jiyong. Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass via circular salt recycling: Techno-economic and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 573, p. 149001, 2026.

LAMAS, Giulia Cruz et al. Energy–environmental nexus in green hydrogen-assisted conversion of second-crop canola to sustainable aviation fuel: toward low-carbon bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 211, p. 109149, 2026.

MATHEUS, Thiago Teixeira et al. The effect of transportation choices for mitigating climate-related impacts: The case of solid biofuels exported to Europe produced by Latin American countries. **Sustainable Production and Consumption**, v. 45, p. 551-566, 2024.

MIRANDA, Denis Silva; KULAY, Luiz. A prospective study on the environmental feasibility of supplying electricity to the Brazilian Amazon through biogas power generation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, p. 102962, 2023.

PAMPONET, Marlon Caires et al. Energy balance and carbon footprint of very large-scale photovoltaic power plant. **International Journal of Energy Research**, v. 46, n. 5, p. 6901-6918, 2022.

PESCARINI, Henrique Baeninger et al. Strategic productive arrangements to leverage greenhouse gas emissions mitigation in the production of sustainable aviation fuels in Brazil. **Sustainable Production and Consumption**, v. 57, p. 262-276, 2025.

PETERS, Pedro et al. A holistic analysis of environmental impacts and improvement pathways for the Brazilian electric sector based on long-term planning and life cycle assessment. **Applied Energy**, v. 377, p. 124505, 2025.

PRIMO, Rilton Gonçalo Bonfim et al. Environmental impacts of sugarcane wax biorefining via Swenson process: a life cycle perspective with regional analysis of energy advantages. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, p. 1-12, 2026.

RESTREPO-VALENCIA, Sara; CAPAZ, Rafael Silva; ORTIZ, Pablo Silva. Waste biogenic carbon to alternative methanol production: A comprehensive analysis for ethanol distilleries. **Journal of Cleaner Production**, v. 495, p. 145019, 2025.

SANCHES, Guilherme Martineli et al. Towards greater sustainability of sugarcane production by precision agriculture to meet ethanol demands in south-central Brazil based on a life cycle assessment. **Biosystems Engineering**, v. 229, p. 57-68, 2023.

SOARES, Laene Oliveira; SODRE, Jose Ricardo; BOLOY, Ronney Arismel Mancebo. Lifecycle assessment and environmental impacts of hybrid electric vehicles fuelled by bioethanol and biogas. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 216, p. 115652, 2025.

VAZ, Igor Catão Martins; SCOLARO, Taylana Piccinini; GHISI, Enedir. Understanding the environmental impact of residential electricity consumption in Brazil: integrating top-down and bottom-up approaches with Life Cycle Assessment. **Science of The Total Environment**, v. 986, p. 179774, 2025.

ZENI, Giulihano Luis Feltz; PUGLIERI, Fábio Neves. Métodos para seleção de indicadores para avaliar o desempenho sustentável: uma revisão com o Methodi Ordinatio. **Anais [...]**. Ponta Grossa: XIV ConBrepro, 2024.