

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS:
UMA REVISÃO COMPARATIVA ENTRE FERMENTAÇÃO DE BIOMASSA
LIGNOCELULÓSICA E PIRÓLISE DE PLÁSTICOS****WASTE VALORIZATION FOR ALTERNATIVE FUEL PRODUCTION: A COMPARATIVE
REVIEW BETWEEN LIGNOCELLULOSIC BIOMASS FERMENTATION AND PLASTIC
PYROLYSIS** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.052-006>**Fernando Ramos Santos**Graduando em Química Bacharelado
Universidade Federal de Sergipe (UFS)
E-mail: ramos.santosff@gmail.com**Glauber Silva Godoi**Doutor
Universidade Federal de Sergipe (UFS)
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3520365449469857>**Resumo**

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de processos capazes de converter rejeitos em combustíveis e produtos de valor agregado. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica comparativa entre a fermentação de biomassa lignocelulósica e a pirólise de resíduos plásticos, com o objetivo de identificar diferenças, complementaridades e critérios técnicos que orientem decisões de investimento e políticas públicas de gestão de resíduos no Brasil. O levantamento foi realizado nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, priorizando publicações com dados quantitativos comparáveis entre as rotas. Na rota bioquímica, celulose e hemicelulose são hidrolisadas a açúcares fermentáveis; entretanto, a presença de lignina impõe barreiras estruturais que demandam pré-tratamentos específicos e estratégias para redução de compostos inibidores. Na rota termoquímica, a cisão das cadeias poliméricas resulta predominantemente em hidrocarbonetos na faixa C5–C20, sendo que o emprego de catalisadores zeolíticos pode favorecer a seletividade para frações líquidas. A análise comparativa evidencia diferenças fundamentais entre as rotas quanto aos princípios de conversão, gargalos tecnológicos e métricas de desempenho. No contexto brasileiro, os resultados indicam potencial de complementaridade estratégica entre as rotas, com a fermentação voltada à valorização de resíduos agroindustriais e a pirólise como alternativa para a reciclagem química de plásticos urbanos. Conclui-se que avanços em pré-tratamentos eficientes, no desenvolvimento de microrganismos robustos e em sistemas catalíticos seletivos serão determinantes para ampliar a aplicação industrial dessas tecnologias.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Pirólise de plásticos; Valorização de resíduos.

Abstract

The growing demand for sustainable energy solutions has driven the development of processes capable of converting waste into fuels and value-added products. This paper presents a comparative bibliographic review between lignocellulosic biomass fermentation and plastic pyrolysis, aiming to identify differences, complementarities, and technical criteria to guide investment decisions and public waste management policies in Brazil. The literature search was conducted in Web of Science, Scopus, and ScienceDirect, prioritizing publications with quantitative data comparable between the routes. In the biochemical route, cellulose and hemicellulose are hydrolyzed to fermentable sugars; however, the presence of lignin imposes structural barriers requiring specific pretreatments and inhibitor mitigation strategies. In the thermochemical route, polymeric chain scission predominantly yields C5–C20 hydrocarbons, with zeolitic catalysts favoring selectivity toward liquid fractions. Comparative analysis reveals fundamental differences in conversion principles, technological bottlenecks, and performance metrics. In the Brazilian context, results indicate strategic complementarity between the routes, with fermentation targeting agroindustrial biomass waste valorization and pyrolysis as an alternative for chemical recycling of urban plastics. Advances in efficient pretreatments, robust microorganism development, and selective catalytic systems will be crucial for expanding the industrial application of these technologies.

Keywords: Lignocellulosic biomass; Plastics pyrolysis; Waste valorization.

1 INTRODUÇÃO

A busca por alternativas energéticas sustentáveis tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada pela crescente demanda global por energia e pela urgência de reduzir os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis (Mujtaba *et al.*, 2023). Entre as principais rotas de valorização de resíduos, destacam-se os processos bioquímicos aplicados à biomassa lignocelulósica e as rotas termoquímicas aplicadas a resíduos plásticos. Essas tecnologias emergem como estratégia promissora, ao conciliar a mitigação de danos ambientais decorrentes do descarte inadequado com a geração de combustíveis e produtos de valor energético a partir de fontes renováveis (Mujtaba *et al.*, 2023). No Brasil, essa questão ganha dimensão adicional se considerarmos a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a adoção de sistemas de logística reversa como estratégias centrais para minimizar esses impactos (Brasil, 2010), conferindo respaldo regulatório à valorização energética de resíduos.

Nesse cenário, as rotas de valorização de resíduos analisadas neste trabalho incluem a fermentação da biomassa lignocelulósica (rota bioquímica) e a conversão de resíduos plásticos por rotas termoquímicas, com destaque para a pirólise térmica e catalítica. A rota bioquímica fundamenta-se na hidrólise enzimática de carboidratos estruturais e na fermentação subsequente dos açúcares liberados (Fan *et al.*, 2025; Wojdyła *et al.*, 2025), com potencial também para a produção de Combustível Sustentável de Aviação (SAF) pela rota ATJ (Alcohol-to-Jet), conforme priorizado pelo edital FINEP/Petrobras de 2026 (FINEP; Petrobras, 2026). A rota termoquímica, por sua vez, baseia-se na decomposição térmica controlada de polímeros sintéticos, incluindo resíduos altamente contaminados ou compostos por misturas poliméricas não processados pela reciclagem mecânica convencional, resultando em frações líquidas ricas em hidrocarbonetos, com características semelhantes às de combustíveis convencionais, além de gases não condensáveis e resíduos sólidos carbonáceos (coque) (Anunciato *et al.*, 2021; Camilo *et al.*, 2023; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). Distintas em seus fundamentos, as duas rotas se destinam a diferentes tipos de resíduos e se posicionam como alternativas complementares no contexto da transição energética sustentável (Mujtaba *et al.*, 2023).

Apesar do crescente interesse nessas tecnologias, ainda são escassos, na literatura, estudos que as comparem de forma integrada, considerando simultaneamente os mecanismos de conversão, o rendimento energético, os principais gargalos tecnológicos e os impactos ambientais (Mujtaba *et al.*, 2023; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). Essa lacuna dificulta a definição de critérios técnicos e estratégicos que orientem a adoção e o desenvolvimento dessas rotas em contextos industriais reais. Artigos comparativos dessa natureza têm demonstrado que a identificação de diferenças e complementaridades entre rotas permite orientar decisões de investimento, priorizar linhas de pesquisa e subsidiar políticas públicas de gestão de resíduos com base em evidências técnicas e ambientais (Mujtaba *et al.*, 2023; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo comparar, com base na literatura científica recente, a fermentação da biomassa lignocelulósica e a pirólise de resíduos plásticos quanto aos seus mecanismos de conversão, rendimento, desafios tecnológicos, viabilidade ambiental e perspectivas de aplicação industrial, entre outros aspectos, contribuindo para uma visão crítica e integrada do potencial dessas tecnologias para a transição energética sustentável no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERMENTAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

A fermentação da biomassa lignocelulósica envolve transformações bioquímicas nas quais carboidratos complexos, como celulose e hemicelulose, são hidrolisados em açúcares simples, principalmente glicose e xilose, que são subsequentemente metabolizados por microrganismos fermentativos, resultando na produção de etanol e outros compostos de interesse energético (Fan *et al.*,

2025; Wojdyla *et al.*, 2025). A etapa de hidrólise, conduzida por via ácida diluída ou por via enzimática com o emprego de celulasas e hemicelulasas, é considerada crítica, uma vez que promove a quebra das ligações glicosídicas e a liberação de açúcares fermentáveis (Fan *et al.*, 2025). Entretanto, a presença da lignina impõe barreiras estruturais que reduzem a eficiência global do processo, exigindo o desenvolvimento de estratégias específicas de pré-tratamento e seleção de microrganismos robustos (Fan *et al.*, 2025; Wojdyla *et al.*, 2025).

Entre os principais gargalos da rota bioquímica, destacam-se a formação de compostos inibidores durante o pré-tratamento, como fenóis e derivados furânicos, aspectos que serão discutidos em mais detalhes na seção de Resultados e Discussão. Estratégias para superar esses gargalos incluem o desenvolvimento de microrganismos mais robustos e de pré-tratamentos que minimizem a geração de inibidores (Fan *et al.*, 2025; Wojdyla *et al.*, 2025; Natale *et al.*, 2024; Stein *et al.*, 2022).

A integração de pré-tratamentos eficientes com processos fermentativos otimizados é determinante para a viabilização industrial do etanol de segunda geração (E2G), cuja competição frente a combustíveis fósseis depende diretamente dos avanços obtidos por grupos de pesquisa nacionais e internacionais (Fan *et al.*, 2025; Wojdyla *et al.*, 2025; Natale *et al.*, 2024; Stein *et al.*, 2022).

2.2 CONVERSÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS POR ROTAS TERMOQUÍMICAS

A conversão de resíduos plásticos em combustíveis fundamenta-se em processos de degradação química, com destaque para a pirólise térmica e catalítica, que promovem a quebra das cadeias poliméricas em compostos de menor massa molar (Anunciato *et al.*, 2021). O processo ocorre predominantemente por cisão homolítica das ligações, resultando na formação de hidrocarbonetos líquidos, com características semelhantes às de combustíveis convencionais, além de gases não condensáveis e resíduos sólidos carbonáceos (coque) (Camilo *et al.*, 2023).

A incorporação de catalisadores, como zeólitas, a exemplo da ZSM-5, contribui para o aumento da seletividade para frações líquidas, tornando a otimização de suas propriedades essencial para maximizar o rendimento do processo (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). O perfil de produtos varia conforme o tipo de polímero processado e as condições operacionais, sendo que os principais gargalos, como a formação de coque e a heterogeneidade dos resíduos, serão discutidos na seção de Resultados e Discussão (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025).

Estudos de viabilidade econômica indicam que a pirólise pode ser competitiva quando adequadamente dimensionada, e análises de ciclo de vida apontam vantagens ambientais frente à incineração e ao aterro sanitário, aspectos que serão detalhados nos Resultados e Discussão (Anunciato *et al.*, 2021; Laghezza *et al.*, 2025; Mota *et al.*, 2024).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente trabalho adota a revisão bibliográfica comparativa como abordagem metodológica, sustentada pelo exame crítico de publicações científicas indexadas. A pesquisa bibliográfica, caracteriza-se pelo levantamento, seleção e análise de material já elaborado, constituído principalmente de artigos científicos e livros, com o objetivo de reunir o estado da arte sobre o tema investigado e fornecer base teórica consistente para a análise proposta. A escolha dessa modalidade de pesquisa justifica-se pela natureza comparativa do trabalho, que demanda a integração de dados e perspectivas provenientes de múltiplos estudos especializados, permitindo uma síntese crítica das diferenças e complementaridades entre as rotas de valorização de resíduos analisadas.

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico foi realizado exclusivamente a partir de artigos científicos publicados em periódicos indexados nas bases Web of Science, Scopus e ScienceDirect, com ênfase em publicações dos últimos cinco anos (2020–2025). As buscas foram conduzidas em inglês e português, utilizando combinações dos descritores: lignocellulosic biomass fermentation, second generation ethanol, plastic pyrolysis, thermochemical conversion, waste valorization, catalytic pyrolysis e biofuels. Foram priorizados artigos de revisão e estudos experimentais que apresentassem dados quantitativos originais, dando preferência a publicações com informações passíveis de comparação técnica e econômica entre as rotas estudadas. A seleção final dos trabalhos incorporados à análise baseou-se na relevância temática direta para a comparação proposta, na qualidade metodológica dos estudos, considerando a presença de dados quantitativos e a clareza na apresentação dos resultados, e na complementaridade entre as publicações para cobrir os critérios comparativos adotados nesta revisão.

3.2 CRITÉRIOS DE COMPARAÇÃO E PROCEDIMENTO ANALÍTICO

Os dados extraídos das publicações selecionadas foram organizados de forma a permitir a confrontação direta entre as duas rotas quanto a: (i) mecanismos e eficiência de conversão; (ii) perfil e qualidade dos produtos gerados; (iii) principais barreiras tecnológicas e gargalos de escalonamento; (iv) viabilidade econômica e ambiental, com base em dados de análise técnico-econômica (TEA) e avaliação do ciclo de vida (LCA) reportados nas publicações; e (v) perspectivas de aplicação industrial no contexto brasileiro. A análise foi conduzida de forma crítica e integrativa, buscando identificar tanto as diferenças fundamentais quanto as possíveis sinergias e oportunidades de complementaridade entre as rotas estudadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONTRIBUIÇÃO DE CADA ROTA PARA A QUÍMICA VERDE E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

A Tabela 1 sintetiza os principais critérios comparativos entre as duas rotas analisadas. A análise evidencia que a fermentação da biomassa lignocelulósica e a pirólise de resíduos plásticos apresentam contribuições relevantes para a química verde e para a transição energética no Brasil, ainda que fundamentadas em princípios químicos distintos. A rota bioquímica destaca-se pelo aproveitamento de recursos renováveis e pela valorização de resíduos agroindustriais, alinhando-se aos princípios da química verde no que se refere ao uso de matérias-primas renováveis e à redução do passivo ambiental associado à produção de combustíveis, uma vez que a biomassa utilizada como matéria-prima absorve CO₂ atmosférico durante a fotossíntese, compensando parcialmente o carbono liberado na queima dos biocombustíveis produzidos (Mujtaba *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2025; Wojdyla *et al.*, 2025).

A rota termoquímica insere-se no contexto da economia circular ao permitir a recuperação do carbono presente em polímeros sintéticos na forma de combustíveis e produtos químicos de valor energético (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). Essa abordagem contribui para a mitigação dos impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de resíduos plásticos e para a redução da dependência de combustíveis fósseis (Mujtaba *et al.*, 2023).

No cenário brasileiro, caracterizado pela elevada geração simultânea de resíduos agrícolas e de resíduos plásticos urbanos, as duas rotas podem atuar de forma complementar. A fermentação da biomassa lignocelulósica apresenta maior afinidade com regiões de forte produção agroindustrial, enquanto a pirólise de resíduos plásticos mostra-se particularmente relevante em contextos urbanos (Mujtaba *et al.*, 2023; Brasil, 2010). A integração dessas rotas amplia o aproveitamento de diferentes fluxos de resíduos, reduz a dependência de combustíveis fósseis e fortalece estratégias alinhadas à química verde e à transição energética sustentável (Mujtaba *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2025; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025).

Tabela 1 – Comparação entre as rotas de valorização de resíduos estudadas.

Critério	Rota Bioquímica	Rota Termoquímica
Matéria-prima principal	Biomassa lignocelulósica (celulose e hemicelulose de bagaço, palha e resíduos agroindustriais) (Fan et al., 2025; Wojdyła et al., 2025; Faria et al., 2024)	Resíduos plásticos pós-consumo (PE, PP, PET e misturas poliméricas) (Paavani et al., 2025; Laghezza et al., 2025; Silva et al., 2023)
Mecanismo de conversão	Hidrólise ácida ou enzimática de carboidratos seguida de fermentação microbiana (Fan et al., 2025; Wojdyła et al., 2025)	Cisão homolítica térmica ou termocatalítica das cadeias poliméricas (Paavani et al., 2025; Laghezza et al., 2025)
Produtos-alvo / Frações geradas	Etanol de segunda geração (E2G); rendimento de 162–256 kg/t (bagaço de cana) a 330 L/t em unidades híbridas; eficiência de conversão de açúcares de até 92,82% (Natale et al., 2024; Stein et al., 2022; Faria et al., 2024)	Óleo pirolítico (C5–C20): 60–85% em massa (PE/PP); PCI 40–44 MJ/kg; PLO de PP industrial: 90,65% (térmica) e 78,18% (catalítica) (Camilo et al., 2023; Paavani et al., 2025; Laghezza et al., 2025)
Principais barreiras e gargalos	Recalcitrância da lignina; compostos inibidores (fenóis, furfural, HMF); variabilidade da biomassa (Fan et al., 2025; Wojdyła et al., 2025; Natale et al., 2024)	Heterogeneidade dos resíduos; formação de coque; escalabilidade; escassez de estudos LCA (Paavani et al., 2025; Laghezza et al., 2025; Mota et al., 2024)
Estratégias de otimização	Pré-tratamentos eficientes; leveduras tolerantes (Pichia spp., ALE); SSF (Fan et al., 2025; Wojdyła et al., 2025; Natale et al., 2024; Stein et al., 2022)	Zeólitas HZSM-5 e MCM-41; catalisadores bifuncionais; otimização de reatores (Paavani et al., 2025; Laghezza et al., 2025)

Fonte: elaborada pelos autores. Siglas: E2G = etanol de segunda geração; PCI = poder calorífico inferior; PLO = produto líquido orgânico; PE = polietileno; PP = polipropileno; PET = politereftalato de etileno; HMF = hidroximetilfurfural; ALE = evolução laboratorial adaptativa; SSF = sacarificação e fermentação simultâneas; TEA = análise tecno-econômica; LCA = avaliação do ciclo de vida.

4.2 DESAFIOS, LACUNAS E PRINCIPAIS BARREIRAS TECNOLÓGICAS

Os principais desafios associados à fermentação da biomassa lignocelulósica estão concentrados na etapa de pré-tratamento, que visa à desconstrução da estrutura lignocelulósica para tornar os polissacarídeos acessíveis às enzimas hidrolíticas. Métodos físicos, como a explosão a vapor, métodos químicos, como a hidrólise ácida diluída ou a deslignificação alcalina, e métodos biológicos, como o pré-tratamento por fungos ligninolíticos, apresentam diferentes relações entre custo, eficiência e geração de inibidores (Fan *et al.*, 2025). A formação de compostos inibidores, como furfural, hidroximetilfurfural (HMF) e ácidos orgânicos de cadeia curta, é um dos principais obstáculos à eficiência fermentativa, uma vez que esses compostos suprimem o metabolismo de leveduras e bactérias fermentativas (Wojdyła *et al.*, 2025; Natale *et al.*, 2024).

No caso da pirólise de resíduos plásticos, as principais barreiras tecnológicas estão relacionadas ao controle rigoroso das condições de processo, especialmente temperatura, pressão e tempo de residência, que determinam diretamente o perfil de produtos obtidos. A heterogeneidade dos resíduos plásticos pós-consumo, frequentemente contaminados e misturados, representa um desafio adicional, pois dificulta a padronização do processo e reduz a qualidade do óleo pirolítico (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). A formação de coque, produto sólido carbonáceo gerado durante a pirólise, constitui outro gargalo relevante, pois reduz o rendimento de líquidos e pode comprometer a operação de reatores em escala industrial (Camilo *et al.*, 2023).

Quanto aos catalisadores, as zeólitas HZSM-5 são amplamente utilizadas por conferirem seletividade de forma para hidrocarbonetos na faixa da gasolina, favorecendo a obtenção de frações de

maior valor comercial. No entanto, a desativação catalítica por deposição de coque e o custo de regeneração ou substituição dos catalisadores constituem barreiras para a aplicação em escala industrial (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025).

Na rota bioquímica, avanços recentes no desenvolvimento de leveduras tolerantes a inibidores têm contribuído para ampliar o potencial industrial do E2G. Enquanto leveduras convencionais como *Saccharomyces cerevisiae* operam tipicamente a 30 °C, linhagens termotolerantes como *Ogataea polymorpha* permitem a fermentação entre 42 °C e 45 °C, reduzindo riscos de contaminação e custos de resfriamento em escala industrial (Wojdyla *et al.*, 2025). Leveduras do gênero *Pichia*, como *P. kudriavzevii*, demonstram tolerância a até 2,0 g/L de HMF e 1,0 g/L de furfural, mantendo atividade fermentativa por meio da conversão desses compostos em derivados menos tóxicos via vias dependentes de NADH (Natale *et al.*, 2024). A etapa de destoxificação do hidrolisado é apontada como um dos procedimentos mais onerosos do processo, impulsionando a pesquisa por microrganismos mais robustos (Natale *et al.*, 2024). Estratégias de evolução laboratorial adaptativa (ALE) têm permitido o desenvolvimento de linhagens de *S. cerevisiae* com melhorias significativas na produtividade fermentativa em hidrolisados lignocelulósicos (Wojdyla *et al.*, 2025).

Em ambas as rotas, observa-se uma lacuna quanto a estudos comparativos integrados que avaliem simultaneamente desempenho energético, impactos ambientais e viabilidade econômica em escala industrial (Mujtaba *et al.*, 2023; Fan *et al.*, 2025; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). A ausência de abordagens integradas dificulta a comparação objetiva entre as alternativas e o estabelecimento de critérios para a tomada de decisão em políticas públicas e investimentos industriais.

4.3 DADOS QUANTITATIVOS COMPARATIVOS E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A análise quantitativa reforça as diferenças de maturidade e de perfil de produto entre as duas rotas. Na rota termoquímica, estudos reportam rendimentos de óleo pirolítico entre 60% e 85% em massa para polietileno (PE) e polipropileno (PP), com poder calorífico inferior (PCI) de 40 a 44 MJ/kg, comparável ao diesel convencional (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025). O estudo de Toledo *et al.* (2024) reportou rendimento de produto líquido orgânico (PLO) de 90,65% para a pirólise térmica de PP industrial e de 78,18% para a pirólise catalítica, evidenciando o impacto do catalisador sobre o perfil de produtos. Estudos de viscosidade cinemática indicam valores entre 1,5 e 3,5 cSt para o óleo pirolítico de PE/PP, dentro da faixa de combustíveis destilados comerciais (Laghezza *et al.*, 2025).

Na rota bioquímica, o rendimento do E2G a partir de bagaço de cana-de-açúcar varia entre 162 e 256 kg por tonelada de biomassa seca, com eficiência de conversão de açúcares de até 92,82% em unidades que integram sacarificação e fermentação simultâneas (SSF) com leveduras adaptadas (Natale *et al.*, 2024; Stein *et al.*, 2022). Projetos de escala piloto reportam produções de até 330 L de etanol por tonelada de

bagaço em configurações híbridas que combinam pré-tratamento hidrotérmico e fermentação com cepas de alto desempenho (Faria *et al.*, 2024).

Do ponto de vista ambiental, análises de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) aplicadas à pirólise indicam redução de emissões de CO₂ equivalente em relação à incineração e ao aterro sanitário, embora os resultados variem significativamente conforme a fonte de energia utilizada no processo e o destino dos subprodutos (Laghezza *et al.*, 2025; Mota *et al.*, 2024). Para o E2G, estudos de LCA apontam balanço energético positivo e redução de emissões de gases de efeito estufa em comparação ao etanol de primeira geração, especialmente quando há cogeração de energia a partir da lignina residual (Faria *et al.*, 2024).

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA E ESCALABILIDADE INDUSTRIAL

A viabilidade econômica é um dos fatores determinantes para a transição das rotas de valorização de resíduos da escala laboratorial para a aplicação industrial. Para a pirólise, estudos de viabilidade indicam que o retorno sobre o investimento (ROI) situa-se entre 21,7% em reatores de leito fluidizado e 29,5% em reatores de circulação, com plantas de capacidade de 40.000 ton/ano podendo atingir valor presente líquido (VPL) positivo já no primeiro ano de operação (Laghezza *et al.*, 2025). O período de retorno (*payback*) médio para plantas de escala intermediária varia entre 7,31 e 9,58 anos, e unidades de pequena escala, como as de 100 kg/h, são frequentemente apontadas como economicamente inviáveis devido aos elevados custos fixos e de capital (Mota *et al.*, 2024). Os custos operacionais (OPEX) são dominados por mão de obra especializada, manutenção e utilidades (Mota *et al.*, 2024).

Na fermentação 2G, a etapa de destoxificação do hidrolisado representa um dos principais componentes de custo operacional, reforçando a necessidade de desenvolvimento de microrganismos mais robustos e de pré-tratamentos que minimizem a formação de inibidores para viabilizar a redução do OPEX (Natale *et al.*, 2024; Mota *et al.*, 2024). Em conjunto, os dados evidenciam que ambas as rotas exigem escala mínima adequada e otimização integrada de processo para atingir competitividade econômica frente às alternativas convencionais (Laghezza *et al.*, 2025; Mota *et al.*, 2024).

4.5 OPORTUNIDADES DE PESQUISA FUTURA, GRUPOS DE DESTAQUE E POLÍTICAS PÚBLICAS

Os resultados indicam oportunidades promissoras para pesquisas futuras voltadas à otimização de pré-tratamentos menos severos e energeticamente mais eficientes para a biomassa lignocelulósica, bem como ao desenvolvimento de enzimas e microrganismos mais tolerantes a compostos inibidores (Fan *et al.*, 2025; Wojdyła *et al.*, 2025; Natale *et al.*, 2024). No âmbito da conversão de resíduos plásticos, destacam-se oportunidades relacionadas à melhoria da seletividade catalítica, à otimização de reatores e à integração de ferramentas de controle e automação (Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025).

A Tabela 2 apresenta os principais grupos de pesquisa nacionais e internacionais dedicados a essas temáticas.

Tabela 2 – Grupos de pesquisa de destaque no Brasil e no exterior e programas nacionais relacionados às temáticas do artigo.

Instituição / Grupo	País	Linhas de destaque	Referência
Western University – ICFAR (Franco Berruti)	Canadá	Pirólise de resíduos plásticos, TEA e LCA de conversão termoquímica	Laghezza et al. (2025)
Politecnico di Torino (Silvia Fiore)	Itália	LCA e viabilidade ambiental da pirólise de plásticos	Laghezza et al. (2025)
Univ. Rzeszów / ICB-NAS (Ruchala, Vasylyshyn)	Polônia / Ucrânia	Genética de leveduras não convencionais, tolerância a inibidores, ALE	Wojdyla et al. (2025)
BITS Pilani / Univ. of Maryland (Paavani, Abrar)	Índia / EUA	Design de reatores, otimização operacional e machine learning em pirólise	Paavani et al. (2025)
LNBR / CNPEM (Campinas, SP)	Brasil	Enzimas celulolíticas, pré-tratamento hidrotérmico, LCA de biorrefinarias, escala piloto	FINEP; Petrobras (2026)
UFRJ (Rio de Janeiro, RJ)	Brasil	Fermentação de resíduos agrícolas brasileiros para E2G	Faria et al. (2024)

Fonte: elaborada pelos autores.

Uma perspectiva emergente de integração entre as rotas analisadas reside no co-processamento termoquímico de biomassa com resíduos plásticos. Diferentemente da rota bioquímica, as rotas termoquímicas, notadamente a co-pirólise e a co-gaseificação, operam em condições compatíveis para ambas as matérias-primas, permitindo o processamento simultâneo em um único reator (Mo *et al.*, 2023; Baloyi; Patel, 2024). O efeito sinérgico documentado nesse co-processamento decorre da riqueza em hidrogênio dos plásticos, que atuam como doadores de H na decomposição térmica da biomassa, resultando em bio-óleo de menor acidez, maior valor calorífico e menor formação de coque em comparação ao processamento individual de cada *feedstock* (Mo *et al.*, 2023; Baloyi; Patel, 2024). Embora fora do escopo comparativo central deste trabalho, essa complementaridade representa uma fronteira ativa de pesquisa com potencial direto para a economia circular e a gestão integrada de resíduos sólidos no Brasil.

A articulação entre ciência, indústria e políticas públicas emerge como elemento central para viabilizar a adoção integrada da fermentação da biomassa lignocelulósica e da pirólise de resíduos plásticos, ampliando sua contribuição para a transição energética sustentável no Brasil, em alinhamento com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Mujtaba *et al.*, 2023; Brasil, 2010; Paavani *et al.*, 2025; Laghezza *et al.*, 2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho evidenciou diferenças fundamentais entre a fermentação da biomassa lignocelulósica e a pirólise de resíduos plásticos, tanto em seus mecanismos de conversão quanto em seus perfis de produto, gargalos tecnológicos e viabilidade econômica. A rota bioquímica, baseada na hidrólise e fermentação de carboidratos estruturais, apresenta elevado potencial para a produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos agroindustriais, com eficiência de conversão de açúcares de até 92,82%, mas

ainda enfrenta desafios associados à recalcitrância da lignina e à formação de compostos inibidores. A rota termoquímica, por sua vez, mostrou-se tecnicamente competitiva para o processamento de resíduos plásticos heterogêneos, gerando óleo pirolítico com rendimento entre 60% e 85% em massa e poder calorífico comparável ao diesel convencional, com o emprego de zeólitas como ZSM-5 e MCM-41 como estratégia central para o aumento da seletividade.

A análise comparativa indicou que as duas rotas não são concorrentes, mas complementares no contexto brasileiro: a fermentação da biomassa lignocelulósica adequa-se às regiões de forte produção agroindustrial, enquanto a pirólise de plásticos mostra-se particularmente relevante em contextos urbanos com elevada geração de resíduos sólidos. A integração dessas rotas representa uma estratégia promissora para ampliar o aproveitamento de diferentes fluxos de resíduos, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e fortalecer a transição energética sustentável no Brasil, em alinhamento com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Conclui-se que avanços em pré-tratamentos energeticamente eficientes, no desenvolvimento de microrganismos robustos e tolerantes a compostos inibidores, e na otimização de sistemas catalíticos seletivos serão determinantes para viabilizar a aplicação industrial em larga escala de ambas as rotas. A articulação entre pesquisa científica, investimento industrial e políticas públicas direcionadas emerge como condição essencial para que essas tecnologias contribuam efetivamente para a economia circular e para a gestão integrada de resíduos sólidos no Brasil.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, pelo apoio incondicional ao longo de toda a graduação. Aos meus pais, pelo incentivo constante e pelos valores transmitidos. Os autores agradecem também ao Departamento de Química da Universidade Federal de Sergipe (DQI/UFS) pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

ANUNCIATO, C.; CAZARINI, E.; FERNANDEZ, L.; MORAES, R.; FRANCO, A. Analysis of the energy feasibility of chemical recycling of plastic waste by simulating the pyrolysis process using Aspen Plus®. **Journal of Engineering and Exact Sciences**, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/12578/6646>. Acesso em: 17 jul. 2026.

BALOYI, H.; PATEL, B. A review of the co-liquefaction of biomass feedstocks and plastic wastes for biofuel production. *Biofuels*, **Bioproducts and Biorefining**, v. 18, p. 1799-1820, 2024. doi:10.1002/bbb.2641

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, Df, seção 1, p. 3, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 17 jul. 2026.

CAMILO, T. T.; RODRIGUES, G. O.; DUVOISIN JUNIOR, S.; MACHADO, N. T.; CASTRO, D. A. R. Estudo do processo de pirólise de resíduo industrial de polipropileno (PP) em reator de leito fixo para a produção de combustível. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 1, p. 4415-4438, 2023. doi:10.34117/bjdv9n1-304

FAN, Y.; LU, Y.; AN, N.; ZHU, W.; LI, M.; GAO, M.; et al. Pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: research progress, mechanisms, and prospects. **BioResources**, v. 20, n. 2, p. 4897-4924, 2025. doi:10.15376/biores.20.2.Fan

FARIA, D. J.; CARVALHO, A. P. A.; CONTE-JUNIOR, C. A. Fermentation of biomass and residues from Brazilian agriculture for 2G bioethanol production. **ACS Omega**, v. 9, n. 38, 2024. doi:10.1021/acsomega.4c06579

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS (FINEP); Petrobras. **Seleção Pública FINEP/Petrobras – Ecossistema Tecnológico de Biorrefino**. Rio de Janeiro: Finep, 2026. Disponível em: https://www.finep.gov.br/images/chamadas-publicas/2026/25_03_2026._Biorrefino_Edital.pdf. Acesso em: 9 maio 2026.

LAGHEZZA, M.; FIORE, S.; BERRUTI, F. A review on the pyrolytic conversion of plastic waste into fuels and chemicals. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 177, p. 106479, 2025. doi:10.1016/j.jaap.2024.106479

MO, F.; ULLAH, H.; ZADA, N.; SHAHAB, A. A review on catalytic co-pyrolysis of biomass and plastics waste as a thermochemical conversion to produce valuable products. **Energies**, v. 16, n. 14, p. 5403, 2023. doi:10.3390/en16145403

MOTA, J. V. L.; MONTEIRO, A. R. D.; FRIAS, B. G. Avaliação de estudos de viabilidade econômica da pirólise de plásticos. **Engevista**, v. 22, n. 1, 2024. doi:10.22409/engevista.v22i1.65852

MUJTABA, M.; FRACETO, L.; FAZELI, M.; MUKHERJEE, S.; SAVASSA, S. M.; ARAUJO DE MEDEIROS, G.; et al. Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. **Journal of Cleaner Production**, v. 402, p. 136815, 2023. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136815

NATALE, K.; NOVAIS RIBEIRO, N.; JUSTINO ROSSINI MUTTON, M.; GRIGOLETTO, M. F. Levedura do gênero *Pichia* spp. exibe potencial para a produção de etanol 2G. **Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 1, p. e16115, 2024. doi:10.52138/citec.v16i1.396

PAAVANI, K.; AGARWAL, K.; ALAM, S. S.; DINDA, S.; ABRAR, I. Advances in plastic to fuel conversion: reactor design, operational optimization, and machine learning integration. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 9, p. 54-71, 2025. doi:10.1039/D4SE01045K

STEIN, J. E. S.; ROTILI JUNIOR, R.; CANEPELLE, E.; GUERRA, D.; MAISA DA SILVA, D.; REDIN, M. Estimativa de produção de álcool de segunda geração de plantas de cobertura de solo. **Revista Eletrônica Científica Uergs**, v. 8, n. 1, p. 63-72, 2022. doi:10.21674/2448-0479.81.63-72

TOLEDO, H. A.; SARKIS, S. R. M.; LACERDA, C. D.; DUVOISIN JUNIOR, S.; CASTRO, D. A. R. Produção de combustível através da pirólise catalítica de resíduo urbano de polipropileno (PP) em reator de leito fixo. **Brazilian Journal of Development**, v. 10, n. 7, p. 1-21, 2024. doi:10.34117/bjdv10n7-040

WOJDYŁA, D.; VASYLYSHYN, R.; NAJDECKA, A.; RUCHALA, J. Lignocellulosic biomass fermentation: a roadmap for *Candida famata* and *Ogataea polymorpha*. **FEMS Yeast Research**, v. 25, p. foaf046, 2025. doi:10.1093/femsyr/foaf046