

# TRANSFORMAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

TRANSFORMATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE INTO THERMAL AND  
ELECTRICAL ENERGY

Engenharias • 26/03/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/774495519](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/774495519)

Melquizedec Arcos Rodrigues<sup>1</sup>

Kamal Abdel Radi Ismail<sup>2</sup>

Inácia Oliveira de Azevedo<sup>3</sup>

Fátima Aparecida de Moraes Lino<sup>4</sup>

## RESUMO

O crescimento acelerado da urbanização nas últimas décadas tem intensificado a geração de resíduos sólidos urbanos - RSU, impondo desafios significativos à gestão ambiental e à sustentabilidade das cidades. Nesse cenário, a transformação dos RSU em energia térmica e elétrica surge como alternativa promissora para mitigar os impactos negativos do descarte desses resíduos, ao mesmo tempo em que contribui para a diversificação da matriz energética. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica qualitativa e narrativa sobre as principais tecnologias disponíveis para a conversão energética dos RSU no contexto brasileiro. Foram analisadas três rotas predominantes: a incineração com recuperação térmica, o aproveitamento energético do biogás e as tecnologias termoquímicas, como pirólise e gaseificação. A metodologia se baseou em pesquisas em bases de dados nacionais e internacionais, optando por estudos que discutem desde a gravimetria e parâmetros termoquímicos até o biogás de aterro e tecnologias térmicas. Também foram incluídos estudos voltados ao planejamento e às barreiras institucionais. Os resultados evidenciam que cada abordagem possui vantagens específicas quanto à eficiência energética, viabilidade técnica e impacto ambiental. Embora existam desafios relacionados a custos, regulação e aceitação pública, há um potencial significativo para a implantação dessas soluções em larga escala no Brasil. Uma possível integração de tecnologias, políticas públicas eficientes, capacitação técnica e participação social são fatores essenciais para o sucesso da valorização energética dos resíduos urbanos. Conclui-se que as estratégias de recuperação de energia devem ser desenvolvidas em total harmonia com a hierarquia da gestão de resíduos. Antes da conversão energética, é imprescindível priorizar a prevenção, a reutilização e a reciclagem. Essas iniciativas necessitam de apoio em

modelos metodológicos integrados que consigam articular medições de campo, testes laboratoriais, modelagens técnico-econômicas e análise institucional. Representa um progresso no desenvolvimento de cidades sustentáveis, em consonância com os fundamentos da economia circular e da transição energética.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos urbanos; energia térmica; valorização energética; tecnologias limpas.

## **ABSTRACT**

The rapid growth of urbanization in recent decades has led to an increase in the generation of municipal solid waste (MSW), posing significant challenges to environmental management and the sustainability of cities. In this context, the conversion of MSW into thermal and electrical energy emerges as a promising alternative for mitigating the negative impacts of waste disposal, while also contributing to the diversification of the energy mix. This article presents a qualitative and narrative literature review of the main technologies available for the energy conversion of MSW in the Brazilian context. Three predominant routes were analyzed: incineration with thermal recovery, energy utilization of biogas, and thermochemical technologies, such as pyrolysis and gasification. The methodology was based on searches in national and international databases, selecting studies that discuss topics ranging from gravimetry and thermochemical parameters to landfill biogas and thermal technologies. Studies focused on planning and institutional barriers were also included. The results show that each approach has specific advantages in terms of energy efficiency, technical feasibility, and environmental impact. Although there are challenges related to costs, regulation, and public acceptance, there is significant potential for the large-scale implementation of these solutions in Brazil. The integration of technologies, effective public policies,

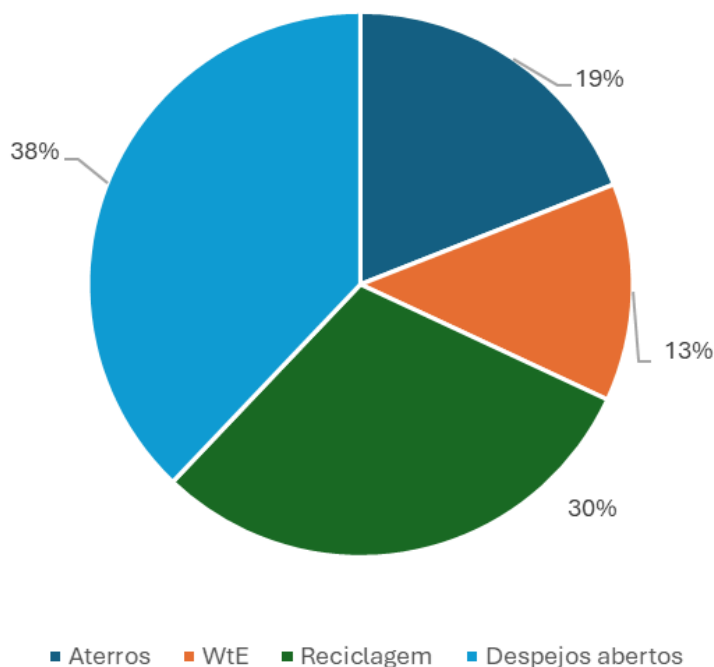
technical training, and public participation are essential factors for the successful energy recovery from municipal solid waste. It follows that energy recovery strategies must be developed in full accordance with the waste management hierarchy. Prior to energy conversion, it is essential to prioritize prevention, reuse, and recycling. These initiatives require support from integrated methodological models capable of coordinating field measurements, laboratory tests, technical-economic modeling, and institutional analysis. This represents progress in the development of sustainable cities, in line with the principles of the circular economy and the energy transition.

**Keywords:** municipal solid waste; thermal energy; energy recovery; clean technologies.

## 1. INTRODUÇÃO

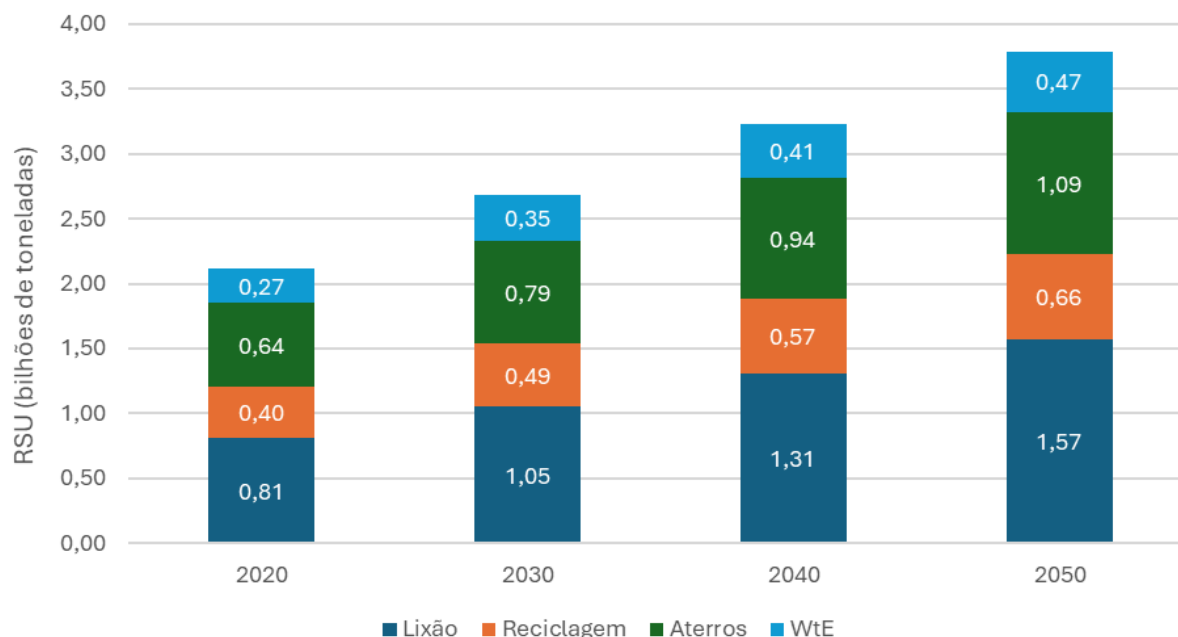
A crescente geração de resíduos sólidos urbanos é uma das principais consequências do aumento populacional, da intensificação do consumo e da urbanização acelerada nas últimas décadas. O acúmulo desses resíduos apresenta desafios significativos à gestão pública, especialmente nos grandes centros urbanos, onde a disposição inadequada contribui para a degradação ambiental, contaminação do solo e da água, além de gerar impactos sociais e econômicos. Ao mesmo tempo, a natureza orgânica e combustível de grande parte dos resíduos gerados nas cidades abre possibilidades importantes para sua valorização energética. Nesse sentido, a transformação dos RSU em energia térmica e elétrica surge como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente estratégica para minimizar os impactos ambientais e suprir demandas energéticas, contribuindo para a sustentabilidade urbana (CAMPOS et al., 2020).

A Figura 1 ilustra o contexto mundial de destinação dos resíduos sólidos urbanos. Conforme demonstrado, o descarte em aterros totaliza em 68%, enquanto 32% referem-se aos processos de compostagem, reciclagem e Waste to Energy (WtE).



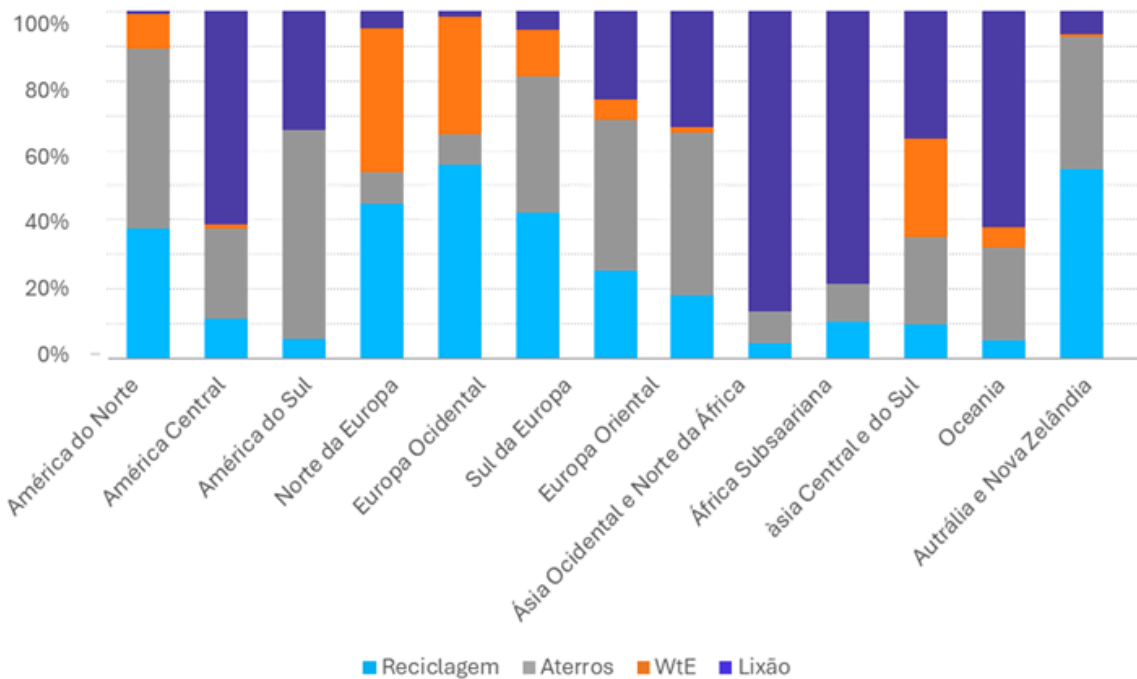
**Figura 1.** Cenário de descartes de RSU no mundo. Fonte: UNEP, 2024.

Estudos mostram que a percentagem global de eliminação não controlada de RSU (descargas e queima a céu aberto) aumente ligeiramente, de 38% em 2020 para 41% em 2050. No entanto, quando o crescimento previsto dos RSU é levado em consideração, este aumento proporcional significará um aumento de quase duas vezes dos RSU não controlados, de 806 milhões de toneladas em 2020 para 1,6 mil milhões de toneladas em 2050, como se mostra na Figura 2 (UNEP, 2024).



**Figura 2.** Destinos globais projetados para os resíduos sólidos urbanos em 2030, 2040 e 2050, em comparação com 2020. Fonte: UNEP, 2024.

A gestão controlada dos RSU apresenta variações significativas entre diferentes regiões. Os níveis mais baixos de gestão de RSU encontram-se na África Subsaariana e na Ásia Central e do Sul, ao passo que, na América do Norte e na Europa Ocidental, quase todos esses resíduos são geridos em destinos controlados. Dentre as demais diferenças observadas, destaca-se o fato de que a América do Norte depende predominantemente da eliminação em aterros sanitários, enquanto, na Europa Ocidental, as taxas de reciclagem são mais elevadas e a valorização energética dos resíduos constitui o método dominante de eliminação dos RSU, sendo ilustrado na Figura 3 (UNEP, 2024).



**Figura 3.** Destinação dos RSU em algumas regiões do mundo. Fonte: UNEP, 2024.

As tecnologias de recuperação energética, como a incineração com aproveitamento de calor, a gaseificação, a pirólise e a produção de biogás, têm sido amplamente discutidas como ferramentas para o tratamento de resíduos urbanos, especialmente em países desenvolvidos. No Brasil, embora ainda incipiente, observa-se um avanço no interesse por soluções tecnológicas voltadas à valorização energética de resíduos, impulsionado por políticas de incentivo à matriz energética limpa e pela necessidade de aprimorar os sistemas de gestão de resíduos. A implementação de sistemas Waste-to-Energy (WTE) tem demonstrado potencial para reduzir o volume de resíduos enviados a aterros e para gerar eletricidade de forma eficiente, aproveitando o poder calorífico dos resíduos urbanos (OLIVEIRA et al., 2020; GOMES et al., 2019; PINTO et al., 2020).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A valorização energética dos RSU insere-se no contexto das cidades inteligentes e sustentáveis, sendo considerada uma solução

integrada que permite a articulação entre saneamento, geração de energia e economia circular. A integração desses processos exige, no entanto, estudos detalhados sobre viabilidade técnica, econômica e ambiental, além de políticas públicas eficazes. A abordagem da energia a partir de resíduos não visa apenas a geração elétrica ou térmica, mas também a redução dos impactos da disposição final e a promoção de modelos de desenvolvimento sustentáveis. A literatura aponta que, quando bem implementadas, essas soluções são capazes de complementar a matriz energética e reduzir a pressão sobre aterros sanitários, principalmente em regiões metropolitanas com alta densidade populacional (FERREIRA et al., 2019; ARAÚJO et al., 2020; COSTA et al., 2021).

Apesar do potencial das tecnologias WTE e da reconhecida importância da valorização energética de resíduos, o Brasil ainda enfrenta diversas limitações estruturais e normativas que dificultam a implementação em larga escala dessas soluções. A baixa eficiência na coleta seletiva, a ausência de triagem prévia e a concentração de investimentos em aterros sanitários convencionais perpetuam um modelo linear de gestão de resíduos, no qual o aproveitamento energético ainda é pouco explorado. Nesse contexto, surge a seguinte pergunta-problema: quais são as principais tecnologias e perspectivas para a transformação dos resíduos sólidos urbanos em energia térmica e elétrica no Brasil, considerando os desafios técnicos, econômicos e ambientais atuais?

Este estudo tem como objetivo geral analisar criticamente as tecnologias de transformação dos resíduos sólidos urbanos em energia térmica e elétrica, à luz da literatura científica recente e das experiências nacionais e internacionais. Como objetivos específicos, busca-se: (1) identificar as principais tecnologias térmicas e

biológicas aplicadas à valorização energética dos RSU; (2) descrever os benefícios e limitações dessas tecnologias no contexto brasileiro; e (3) discutir o papel da valorização energética na construção de sistemas urbanos sustentáveis e integrados à matriz energética nacional.

A relevância deste estudo justifica-se pela urgência de alternativas mais sustentáveis à gestão de resíduos sólidos nas cidades brasileiras. O alto custo ambiental e social da disposição inadequada, aliado à escassez de áreas para novos aterros e ao crescimento contínuo da geração de resíduos, exige soluções que associem eficiência, sustentabilidade e inovação. A conversão de RSU em energia apresenta-se como um vetor importante para transformar um passivo ambiental em um ativo energético, contribuindo para o fortalecimento de políticas públicas ambientais e para a diversificação da matriz energética do país (ALMEIDA et al., 2020; MORAIS et al., 2019).

Além disso, o incentivo à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de valorização energética de resíduos pode impulsionar o setor de energias renováveis, gerar empregos e fomentar novos modelos de negócios baseados na bioeconomia e na economia circular. A experiência internacional evidencia que a adoção de soluções WTE está atrelada ao planejamento urbano, à articulação intersetorial e à conscientização da sociedade sobre o papel dos resíduos como fonte de energia. Assim, este artigo busca oferecer uma visão abrangente e crítica sobre o tema, contribuindo para o debate técnico-científico e para a formulação de políticas mais eficazes (ANDRADE et al., 2019; MENDONÇA et al., 2020; SANTOS et al., 2019).

### **3. METODOLOGIA**

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa e abordagem narrativa, cuja finalidade é reunir, examinar e interpretar criticamente a produção científica recente acerca da transformação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em energia térmica e elétrica. Segundo Gil (2015), esse tipo de revisão permite compreender um fenômeno a partir da sistematização do conhecimento já produzido, contribuindo para o aprofundamento teórico do tema e para a identificação de lacunas e perspectivas de investigação. A abordagem narrativa utilizada neste trabalho não se limita à simples listagem de estudos, mas propõe uma análise reflexiva e interpretativa do material revisado, articulando conceitos, tecnologias e modelos aplicados no campo da valorização energética dos resíduos. Tal metodologia é especialmente adequada quando o objetivo é construir uma visão abrangente e integradora sobre determinado campo de conhecimento, como é o caso do presente estudo.

O processo de levantamento bibliográfico foi realizado entre dezembro de 2025 e janeiro de 2026, utilizando como principais bases de dados acadêmicas as plataformas SciELO, Science Direct, Springer Link, Wiley Online Library, Taylor & Francis, MDPI e outras revistas científicas indexadas que reúnem publicações da área de engenharia ambiental, energia, sustentabilidade e gestão de resíduos. Os critérios de inclusão envolveram artigos publicados entre os anos de 2016 a 2025, redigidos em português, revisados por pares e com acesso público. Foram utilizados descritores como: "resíduos sólidos urbanos", "valorização energética", "gaseificação", "pirólise", "incineração", "energia térmica", "energia elétrica" e "Waste-to-Energy". Após a triagem inicial, foram selecionadas 16 publicações que apresentaram aderência ao objetivo da pesquisa, abordando

tecnologias e análises críticas sobre a viabilidade da conversão energética dos RSU no contexto brasileiro e global.

A seleção e análise dos documentos seguiram uma estratégia qualitativa de leitura exploratória, seguida de uma leitura seletiva e interpretativa, na qual se buscou compreender os principais enfoques, métodos empregados, resultados alcançados e limitações destacadas pelos autores. A categorização temática dos conteúdos permitiu agrupar os estudos conforme o tipo de tecnologia analisada (incineração, gaseificação, produção de biogás), os contextos geográficos (Brasil e outros países), os impactos socioambientais discutidos e as perspectivas para a integração dessas tecnologias nas políticas públicas urbanas. Tal abordagem narrativa possibilitou uma interpretação crítica dos achados, com foco não apenas na descrição técnica das soluções energéticas, mas também em sua viabilidade prática, desafios regulatórios e contribuições para a sustentabilidade urbana. Conforme Gil (2015), esse tipo de revisão promove uma síntese abrangente e fundamentada que colabora significativamente com a formulação de novas hipóteses, construção de modelos conceituais e subsídios para decisões públicas e privadas.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

O crescimento exponencial da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem levado pesquisadores, gestores públicos e a sociedade civil a buscarem soluções sustentáveis para mitigar os impactos ambientais associados à disposição inadequada desses materiais. Dentre as alternativas emergentes, a conversão dos RSU em energia térmica e elétrica destaca-se como uma estratégia promissora, não apenas por permitir o reaproveitamento energético de materiais

descartados, mas também por contribuir para a redução do volume destinado aos aterros sanitários.

Este capítulo aborda, de forma aprofundada, os principais caminhos tecnológicos da valorização energética dos resíduos urbanos, dividindo-se em três eixos temáticos: incineração e recuperação térmica (3.1), aproveitamento do biogás para cogeração (3.2), e tecnologias termoquímicas avançadas, como pirólise e gaseificação (3.3), com base em estudos empíricos e revisões da literatura brasileira recente.

#### **4.1. Incineração e Recuperação Térmica**

A incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma das tecnologias mais consolidadas em escala mundial quando se trata de recuperação energética. No Brasil, entretanto, sua aplicação ainda é tímida, muito embora o potencial seja expressivo. Almeida et al. (2020) discutem que, diante da crescente demanda por soluções sustentáveis para o manejo dos RSU, a valorização energética por meio da incineração representa uma ferramenta estratégica, especialmente em regiões metropolitanas onde a geração per capita de resíduos é elevada e os espaços para aterros sanitários são escassos. Além disso, os autores destacam que a incineração pode reduzir em até 90% o volume dos resíduos, promovendo a geração de energia elétrica e térmica com eficiência considerável.

A viabilidade da incineração no Brasil, segundo estudos de Sousa et al. (2019), depende de uma série de fatores técnicos, econômicos e sociais. Um dos principais entraves está na composição heterogênea dos resíduos urbanos, que exige uma triagem prévia eficiente para maximizar o rendimento energético e minimizar as emissões

atmosféricas nocivas. Além disso, os autores apontam para a necessidade de adequação das plantas de incineração aos padrões ambientais exigidos por normas internacionais, como a diretiva europeia 2000/76/EC, que impõe limites rigorosos à emissão de dioxinas e furanos. Isso implica investimentos elevados em tecnologias de controle de poluentes e na capacitação dos operadores dos sistemas.

De acordo com Moraes et al. (2019), a eficiência da incineração está diretamente relacionada ao poder calorífico dos resíduos. Os autores realizaram uma avaliação de tecnologias térmicas disponíveis para o contexto brasileiro e concluíram que, com a segregação adequada, os RSU apresentam potencial para geração de cerca de 500 a 700 kWh por tonelada incinerada, a depender do teor de umidade e da fração de matéria orgânica. Essa estimativa é especialmente relevante para municípios de médio e grande porte, que podem beneficiar-se da integração de unidades WTE (waste-to-energy) aos seus sistemas de gestão de resíduos.

Além da geração de energia, a incineração contribui para a redução dos impactos ambientais relacionados aos resíduos. Segundo Sousa et al. (2019), o tratamento térmico reduz o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas, comuns em aterros mal gerenciados. A produção de cinzas residuais, embora seja uma questão ambiental que exige atenção, pode ser parcialmente aproveitada na construção civil, desde que submetida a processos de inertização. Assim, a incineração não apenas se configura como solução energética, mas também como estratégia de mitigação de passivos ambientais.

A questão econômica é outro aspecto determinante. Almeida et al. (2020) afirmam que os investimentos iniciais em usinas de incineração são elevados, o que torna o modelo financeiramente viável apenas quando há incentivos governamentais, políticas públicas consistentes e, principalmente, uma tarifa de energia que remunere adequadamente a produção. Países como Japão, Alemanha e Suécia conseguiram incorporar com sucesso essa tecnologia aos seus sistemas urbanos, mas isso se deu por meio de décadas de políticas consistentes de educação ambiental, logística reversa e subsídios.

Ainda assim, a incineração enfrenta resistência social em diversos municípios brasileiros. O estigma associado à queima de resíduos, frequentemente relacionado à poluição e à degradação ambiental, gera oposição por parte de comunidades e movimentos ambientalistas. Morais et al. (2019) apontam que essa resistência pode ser superada com transparência, campanhas educativas e demonstração técnica da eficiência dos sistemas modernos de incineração, os quais possuem baixos níveis de emissão quando bem operados e monitorados.

Outro fator crítico identificado por Campos et al. (2020) refere-se à análise gravimétrica dos resíduos urbanos, que revela uma elevada proporção de matéria orgânica e resíduos úmidos, o que reduz significativamente o poder calorífico necessário para a incineração eficiente. Dessa forma, a implementação da incineração deve estar condicionada a políticas eficazes de coleta seletiva e redução da fração úmida dos resíduos, o que inclui a promoção da compostagem para resíduos orgânicos e a separação de recicláveis na fonte.

Apesar das dificuldades, estudos como o de Gomes et al. (2019) demonstram que a incineração pode alcançar boas taxas de eficiência energética quando associada a tecnologias de recuperação térmica. Os autores destacam que os sistemas de cogeração (produção simultânea de calor e eletricidade) aumentam a eficiência global das plantas WTE, permitindo um melhor aproveitamento do potencial energético dos RSU. Essa abordagem é considerada ideal para regiões que apresentam demanda por aquecimento urbano ou uso industrial de vapor.

A integração de unidades de incineração com outras formas de valorização energética e reciclabilidade é também considerada um caminho promissor. De acordo com Pinto et al. (2020), a incineração não deve ser vista como solução única, mas como parte de um sistema integrado de gestão de resíduos, que envolva também reciclagem, compostagem e recuperação de materiais. Essa visão sistêmica fortalece a aceitação social da tecnologia e favorece sua inserção em modelos de economia circular.

Em síntese, a incineração dos RSU no Brasil enfrenta desafios técnicos, econômicos e sociais, mas apresenta um potencial significativo para a geração de energia e a redução dos impactos ambientais associados à disposição final inadequada. O sucesso da implementação dessa tecnologia depende de uma articulação entre políticas públicas, incentivos econômicos, educação ambiental e adaptação tecnológica ao perfil dos resíduos urbanos brasileiros. A literatura nacional recente tem enfatizado a necessidade de ampliar o debate técnico-científico sobre o tema e investir em estudos de viabilidade e pilotos regionais, a fim de consolidar essa estratégia no contexto brasileiro de gestão sustentável dos resíduos.

## 4.2. Aproveitamento do Biogás de Resíduos Urbanos

A produção de biogás a partir da decomposição anaeróbica de resíduos sólidos urbanos (RSU) representa uma alternativa sustentável para a geração de energia térmica e elétrica. Esse processo ocorre principalmente em aterros sanitários e unidades de biodigestão, onde a matéria orgânica presente nos resíduos é convertida em uma mistura rica em metano, com elevado poder calorífico. Andrade et al. (2019) destacam que o aproveitamento do biogás tem crescido como uma solução técnica e ambiental para a valorização de resíduos, especialmente em cidades com alto índice de geração de RSU e limitada capacidade de expansão de aterros sanitários. O estudo ressalta ainda que o biogás pode ser utilizado de forma descentralizada, contribuindo para a autonomia energética de estabelecimentos urbanos, agrícolas ou industriais.

Costa et al. (2021) apontam que, apesar do grande potencial de produção de biogás no Brasil, sua exploração ainda é incipiente. Um dos principais entraves identificados é a deficiência na infraestrutura de coleta e separação de resíduos orgânicos, somada à ausência de políticas públicas específicas voltadas à valorização energética dos resíduos. Em diversas cidades brasileiras, a disposição dos RSU ainda ocorre de forma inadequada, o que compromete a viabilidade técnica e econômica de sistemas de biodigestão. O artigo defende a criação de marcos regulatórios mais robustos e de incentivos fiscais como instrumentos para estimular a implementação de plantas de aproveitamento do biogás.

A cogeração de energia elétrica e térmica a partir do biogás representa uma importante vantagem competitiva, principalmente em setores com alta demanda energética. De acordo com andrade

et al. (2019), o calor gerado no processo de combustão do biogás pode ser reutilizado em processos industriais, promovendo maior eficiência energética. Experiências práticas em aterros sanitários brasileiros mostram que o biogás tem capacidade para abastecer unidades industriais, sistemas de aquecimento ou ainda ser convertido em energia elétrica injetada na rede pública. Essa versatilidade do biogás reforça sua aplicabilidade em diferentes escalas de produção.

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento do biogás tem papel estratégico na mitigação das mudanças climáticas. O metano, principal componente energético do biogás, possui um potencial de aquecimento global mais de 25 vezes superior ao dióxido de carbono. Araújo et al. (2020) destacam que a captura e a utilização desse gás evitam sua liberação direta na atmosfera, contribuindo de forma significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Além disso, o biogás se insere no contexto de economia circular, permitindo que resíduos orgânicos retornem ao ciclo produtivo em forma de energia.

Entretanto, há desafios técnicos importantes a serem superados. Ferreira et al. (2019) explicam que o biogás bruto contém impurezas, como sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e vapor de água, que precisam ser removidas antes de seu uso. Essas impurezas comprometem o desempenho dos equipamentos, corroem materiais e aumentam o risco operacional. A instalação de sistemas de purificação, como filtros e torres de lavagem, é imprescindível para garantir a qualidade do biogás e a durabilidade dos equipamentos de conversão. Os autores ressaltam que os custos de purificação devem ser incorporados na análise de viabilidade econômica dos projetos.

A gestão eficiente do biogás exige uma abordagem integrada da cadeia de resíduos. Gomes et al. (2019) enfatizam que o sucesso da valorização do biogás depende da coleta seletiva e da correta separação dos resíduos orgânicos na fonte. Municípios que adotam programas de educação ambiental e incentivo à compostagem têm maior probabilidade de obter um biogás de qualidade e em maior volume. Sem esses pré-requisitos, os biodigestores enfrentam dificuldades operacionais e baixa eficiência energética. A integração entre os setores de saneamento, meio ambiente e energia é, portanto, indispensável.

Mendonça et al. (2020) abordam a importância da inovação tecnológica no aproveitamento do biogás. O estudo mostra que sensores e sistemas automatizados de controle têm sido implementados em projetos-piloto para otimizar a operação dos biodigestores. Esses dispositivos monitoram variáveis como temperatura, pressão e composição do gás em tempo real, permitindo ajustes imediatos que evitam perdas de rendimento. A adoção dessas tecnologias reduz o custo operacional a longo prazo e aumenta a previsibilidade da produção energética.

Outro aspecto promissor discutido na literatura é a transformação do biogás em biometano, que, após purificação, pode ser injetado na rede de gás natural. Oliveira et al. (2020) analisam o potencial dessa prática, ainda incipiente no Brasil, mas comum em países como Alemanha e Suécia. O biometano possui características semelhantes ao gás natural veicular (GNV), podendo ser utilizado no transporte público e em indústrias. Para viabilizar essa aplicação, é necessário o desenvolvimento de normas técnicas, certificação de qualidade e estrutura de distribuição adequada, além de parcerias com concessionárias de gás.

A segurança energética regional também pode ser fortalecida com a adoção do biogás. Martins et al. (2019) destacam que, em cenários de crise hídrica ou restrição na oferta de energia elétrica, o biogás surge como alternativa complementar e sustentável. Em localidades isoladas ou em zonas rurais, ele pode substituir o uso de combustíveis fósseis, reduzindo a dependência energética externa. Esse cenário reforça o papel estratégico do biogás para diversificar a matriz energética brasileira e promover o desenvolvimento regional.

Em síntese, o biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos representa uma solução energética viável, ambientalmente correta e socialmente relevante. Para que seu potencial seja plenamente explorado, é necessário o fortalecimento das políticas públicas, o investimento em infraestrutura, a disseminação de tecnologias limpas e o engajamento da população na separação e valorização dos resíduos. Os estudos revisados indicam que o Brasil dispõe de condições técnicas e científicas para liderar a expansão do biogás na América Latina, desde que haja vontade política e planejamento integrado.

### **4.3. Pirólise, Gaseificação e Tecnologias Termoquímicas**

A pirólise e a gaseificação vêm se consolidando como alternativas promissoras para a valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU), principalmente diante das limitações dos métodos tradicionais, como a incineração. Ambas pertencem ao grupo de tecnologias termoquímicas e se diferenciam pelas condições operacionais, notadamente o controle do oxigênio e da temperatura no processo de decomposição térmica dos resíduos. Ferreira et al. (2019) apontam que essas tecnologias oferecem vantagens importantes, como a geração de múltiplos subprodutos energéticos

— bio-óleo, syngas e biochar — além de menor emissão de poluentes atmosféricos em comparação à queima direta dos resíduos. Esses sistemas, quando bem projetados, apresentam maior eficiência energética e maior controle sobre os efluentes gerados.

A pirólise, por sua vez, caracteriza-se pela decomposição térmica dos resíduos em atmosfera completamente isenta de oxigênio, produzindo principalmente bio-óleo, gás e carvão vegetal (biochar). Essa tecnologia apresenta grande versatilidade quanto ao tipo de resíduo tratado, incluindo plásticos, borrachas, resíduos orgânicos secos e até mesmo materiais têxteis. Pinto et al. (2020) indicam que o bio-óleo obtido pode ser utilizado como substituto parcial de combustíveis fósseis, em motores e caldeiras, além de poder ser refinado para aplicações de maior valor agregado. Já o biochar tem sido estudado com interesse crescente na agricultura como condicionador de solo, devido à sua capacidade de reter água e nutrientes, além de promover o sequestro de carbono.

A gaseificação, por outro lado, realiza a conversão dos RSU sob suprimento controlado de oxigênio ou vapor, gerando o chamado gás de síntese (syngas), composto basicamente por monóxido de carbono, hidrogênio e metano. Este gás pode ser aproveitado diretamente na geração de energia elétrica ou térmica por meio de turbinas, motores de combustão interna ou até mesmo em células a combustível. Campos et al. (2020) apontam que, além da alta eficiência energética, a gaseificação permite melhor controle dos produtos gerados, reduzindo significativamente a formação de compostos indesejáveis como dioxinas e furanos, comuns em processos de combustão direta.

Morais et al. (2019) destacam que, embora mais complexas do ponto de vista técnico, as tecnologias termoquímicas alcançam eficiências superiores em relação aos sistemas tradicionais. Em processos de cogeração, por exemplo, a eficiência global pode ultrapassar 70%. Além disso, os reatores de pirólise e gaseificação ocupam menos espaço físico, o que favorece sua implementação em áreas urbanas densas. Contudo, os autores alertam que a operação bem-sucedida desses sistemas depende de condições específicas, como o controle preciso de temperatura, umidade e granulometria dos resíduos alimentados, exigindo, portanto, um rigoroso planejamento técnico.

Um dos fatores críticos para a viabilidade dessas tecnologias é a composição dos resíduos. Conforme observado por GOMES et al. (2019), materiais com alto teor de umidade ou presença de substâncias inertes afetam negativamente o rendimento energético. Por isso, o pré-tratamento dos resíduos — como a secagem, separação e trituração — torna-se essencial para assegurar um processo termoquímico eficiente. Em regiões onde a coleta seletiva ainda não é plenamente eficaz, a implantação de plantas de pirólise ou gaseificação deve ser acompanhada por políticas de educação ambiental e infraestrutura de triagem.

A análise de viabilidade econômica também desempenha papel central na expansão dessas tecnologias. Costa et al. (2021) afirmam que o alto custo de implantação dos equipamentos e a necessidade de mão de obra especializada ainda limitam a difusão dessas alternativas no Brasil. Entretanto, os autores ponderam que, ao se considerar os custos ambientais e sociais da disposição em aterros, o investimento em tecnologias limpas como a pirólise e a gaseificação se torna mais atrativo no médio e longo prazo. O avanço dependerá

da existência de incentivos governamentais, financiamentos específicos e parcerias público-privadas.

Essas tecnologias apresentam a vantagem de tratar resíduos não recicláveis ou que não se prestam à compostagem, como plásticos contaminados, papéis engordurados, resíduos de varrição e resíduos sanitários. Rodrigues et al. (2019) destacam que a valorização energética desse tipo de resíduo é estratégica, pois evita sua destinação a aterros e contribui para o aumento da taxa de recuperação dos RSU. Com a geração de energia elétrica ou térmica, esses resíduos passam de passivos ambientais a ativos energéticos, inserindo-se na lógica da economia circular.

Além do valor energético, a pirólise e a gaseificação oferecem oportunidades de comercialização de coprodutos. Oliveira et al. (2020) evidenciam que o biochar pode ser utilizado em solos degradados, contribuindo para o aumento da fertilidade e da retenção hídrica. Já o bio-óleo pode substituir parcialmente combustíveis fósseis, reduzindo a pegada de carbono de processos industriais. Essa multiplicidade de aplicações torna as tecnologias termoquímicas atrativas não apenas sob a ótica energética, mas também sob o ponto de vista ambiental e econômico.

Almeida et al. (2020) reforçam o caráter ambientalmente vantajoso das tecnologias termoquímicas, sobretudo pela redução da geração de poluentes atmosféricos e pela produção de cinzas mais inertes. A menor necessidade de áreas para disposição final e a mitigação de impactos como a emissão de metano e a lixiviação de contaminantes consolidam essas técnicas como alternativas sustentáveis. O artigo destaca ainda que o controle rigoroso das variáveis operacionais e o uso de sistemas de tratamento de

efluentes gasosos são fundamentais para garantir o desempenho ambiental desejado.

Diante do exposto, conclui-se que a pirólise e a gaseificação constituem soluções viáveis e inovadoras para o tratamento e valorização energética dos resíduos sólidos urbanos. Embora apresentem desafios relacionados à tecnologia, ao custo de implantação e à capacitação técnica, os benefícios ambientais e econômicos compensam tais obstáculos. Os estudos analisados apontam que o Brasil possui amplo potencial para a adoção dessas técnicas, desde que haja um arcabouço regulatório adequado, financiamento específico e integração entre os setores público, privado e acadêmico.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A transformação dos resíduos sólidos urbanos em energia térmica e elétrica configura-se como uma alternativa estratégica frente aos desafios ambientais, econômicos e sociais enfrentados pelas cidades contemporâneas. O crescente volume de resíduos gerados, aliado à limitação dos espaços para disposição final e à necessidade de transição para uma matriz energética mais limpa, impulsiona a busca por soluções sustentáveis que integrem a gestão de resíduos e a produção de energia. Nesse contexto, as tecnologias de valorização energética mostram-se não apenas viáveis, mas também indispensáveis para o desenvolvimento urbano sustentável.

As diferentes rotas tecnológicas analisadas, incineração com recuperação energética, aproveitamento do biogás e processos termoquímicos como pirólise e gaseificação, demonstram potencial significativo de contribuição para a redução do volume de resíduos

encaminhados a aterros, mitigação da emissão de gases de efeito estufa e geração de energia de forma descentralizada e contínua. Cada tecnologia apresenta vantagens específicas que podem ser adequadas a diferentes realidades regionais e tipos de resíduos, permitindo a criação de sistemas flexíveis e integrados de gestão. Além disso, a possibilidade de geração de subprodutos com valor comercial amplia ainda mais os benefícios econômicos e ambientais dessas soluções.

A análise realizada possibilitou identificar que a caracterização dos resíduos sólidos urbanos é um passo fundamental para qualquer estratégia de recuperação energética. Ao integrar dados sobre composição gravimétrica, características físico-químicas e parâmetros termoquímicos, é viável entender de maneira mais acurada como a relação entre frações orgânicas e combustíveis influencia o desempenho dos sistemas de conversão. Essa leitura integrada evita visões simplistas do “lixo” e o reclassifica como um fluxo material com possibilidade de uso energético, desde que seja adequadamente identificado e mensurado.

Para que o aproveitamento energético dos resíduos se consolide como prática efetiva no Brasil, é necessário superar barreiras estruturais e institucionais, como a ausência de políticas públicas consistentes, o déficit de infraestrutura tecnológica e a limitada conscientização da sociedade. A articulação entre os setores público e privado, o incentivo à pesquisa e desenvolvimento, a capacitação técnica e a educação ambiental são pilares fundamentais para a implementação bem-sucedida dessas alternativas. Nesse sentido, o avanço da valorização energética dos resíduos sólidos urbanos representa um passo importante para a promoção de cidades mais

sustentáveis, resilientes e alinhadas aos princípios da economia circular e da eficiência energética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. V. et al. **Perspectivas da valorização energética de RSU por incineração no Brasil.** *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 11, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.revistaresiduo.com.br/article/view/958>. Acesso em: 11 jan. 2026.

ANDRADE, E. T. et al. **O uso do biogás oriundo de resíduos urbanos para cogeração de energia elétrica e térmica.** *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 27, n. 6, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/V3F8qFqJzFZpsqzvP9M5tVQ>. Acesso em: 11 jan. 2026.

ARAÚJO, F. C. de et al. **Resíduos sólidos urbanos e geração de energia no contexto das cidades sustentáveis.** *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 43, 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/12345>. Acesso em: 11 jan. 2026.

CAMPOS, F. M. de et al. **Avaliação do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por meio da análise gravimétrica.** *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 2, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/WHB8pxkKq4RbHMX9txTQQsy>. Acesso em: 11 jan. 2026.

COSTA, J. H. et al. **Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios e perspectivas.** *Revista Engenharia Civil*, v. 28, n. 1, 2021. Disponível em:

<https://www.revistaengenhariacivil.com.br/article/view/776>. Acesso em: 11 jan. 2026.

FERREIRA, L. P. et al. **Conversão termoquímica de resíduos sólidos urbanos: pirólise e gaseificação como alternativas energéticas.** *Revista Matéria*, v. 24, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Pz8qRyhzYsdwGpMZNNFZ5gM>. Acesso em: 11 jan. 2026.

GOMES, J. A. M. et al. **Energia a partir de resíduos sólidos urbanos: potencial de geração elétrica no Brasil.** *Revista Brasileira de Energia*, v. 25, n. 3, 2019. Disponível em: <https://rbe.org.br/energia/article/view/924>. Acesso em: 11 jan. 2026.

MARTINS, R. A. et al. **Geração de energia elétrica a partir da biomassa dos resíduos urbanos: análise técnica.** *Revista Ambiente Construído*, v. 19, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/Zt3L7GhBrWnZMWvKQxBqYHR>. Acesso em: 11 jan. 2026.

MENDONÇA, T. A. et al. **Prospecção tecnológica e tendências para valorização energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil.** *Gestão & Regionalidade*, v. 36, n. 107, 2020. Disponível em: <https://www.revistafaculdadezumbi.br/gestao-regionalidade/article/view/107>. Acesso em: 11 jan. 2026.

MORAIS, L. A. S. et al. **Avaliação de tecnologias térmicas para recuperação de energia de resíduos sólidos urbanos.** *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 5, n. 1, 2019. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/rpd/article/view/4619>. Acesso em: 11 jan. 2026.

OLIVEIRA, A. S. de et al. **Análise da eficiência de sistemas WTE na gestão de resíduos urbanos.** *Revista Tecnológica*, v. 29, n. 1, 2020. Disponível em: <https://revistatecnologica.ifrn.edu.br/index.php/RT/article/view/1176>. Acesso em: 11 jan. 2026.

PINTO, T. R. et al. **Alternativas energéticas para RSU: análise comparativa entre incineração e gaseificação.** *Revista Tecnologia e Meio Ambiente*, v. 26, n. 2, 2020. Disponível em: <https://revistatecma.org.br/article/view/653>. Acesso em: 11 jan. 2026.

RODRIGUES, A. F. et al. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos em usinas WTE: análise de viabilidade.** *Revista E&S Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 2, 2019. Disponível em: <https://revistaengsust.com/article/view/374>. Acesso em: 11 jan. 2026.

SANTOS, R. M. et al. **Resíduos sólidos urbanos como insumo para geração de energia: estudo em municípios brasileiros.** *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 2, 2019. Disponível em: <https://revistas.unis.edu.br/index.php/ambiente/article/view/3456>. Acesso em: 11 jan. 2026.

SILVA, L. T. et al. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: revisão sobre tecnologias disponíveis.** *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/13259>. Acesso em: 11 jan. 2026.

SOUSA, R. D. de et al. **Incineração de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética: panorama global e brasileiro.** *Revista Ciências do Ambiente On-line*, v. 15, n. 2, 2019. Disponível em:

<https://www.cienciadoambiente.com.br/article/view/2243>. Acesso em: 11 jan. 2026.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME 2024. **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi. DOI: [doi.org/10.59117/20.500.11822/44939](https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939). Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/03/relatorio-onu-gestao-residuos-lixo-2024.pdf>. Acesso em 05 mai. 2025.

---

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Mecânica.  
Instituição de atuação atual: Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Endereço (institucional): Avenida Darcy Vargas, 1200, Parque Dez de Novembro, Manaus-AM. CEP: 69050-020. E-mail: [marrodrigues@uea.edu.br](mailto:marrodrigues@uea.edu.br). ORCID: 0000-0001-9222-8675. LATTES: <https://lattes.cnpq.br/2325389016838433>

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica.  
Instituição de atuação atual: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Endereço (institucional): Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-860. E-mail: [kamal@fem.unicamp.br](mailto:kamal@fem.unicamp.br). ORCID: 0000-0001-7671-1384. LATTES: <https://lattes.cnpq.br/2741276950055207>

<sup>3</sup> Especialização em Psicopedagogia.  
Instituição de atuação atual: Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Endereço (institucional): Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 1200 - Coroado I, Manaus - AM, 69067-005. E-mail: [I\\_azevedo10@hotmail.com](mailto:I_azevedo10@hotmail.com). ORCID: 0009-0004-7578-7407. LATTES: <https://lattes.cnpq.br/1959448264262712>

<sup>4</sup> Pós-Doutora em Engenharia Mecânica. Instituição de atuação atual: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Endereço (institucional): Rua Mendeleiev, 200, Cidade Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas - SP, 13083-860. E-mail: [kamal@fem.unicamp.br](mailto:kamal@fem.unicamp.br). ORCID: 0000-0002-7619-1873. LATTES: <https://lattes.cnpq.br/5444502955195473>