ReGeo ISSN: 2177-3246

TRATAMENTO TÉRMICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA: UMA REVISÃO INTEGRATIVA SOBRE O POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DESTINADOS A ATERROS SANITÁRIOS NO BRASIL

THERMAL TREATMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH ENERGY RECOVERY: AN INTEGRATIVE REVIEW ON THE ENERGY POTENTIAL OF WASTE DESTINED FOR SANITARY LANDFILLS IN BRAZIL

TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON RECUPERACIÓN DE ENERGÍA: UNA REVISIÓN INTEGRADORA SOBRE EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESIDUOS DESTINADOS A VERTEDEROS SANITARIOS EN BRASIL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n7-132

Data de submissão: 08/06/2026 **Data de publicação:** 23/07/2026

Melquizedec Arcos Rodrigues
Doutor em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
E-mail: marrodrigues@uea.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-9222-8675
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/2325389016838433

Kamal Abdel Radi Ismail
Doutor em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
E-mail: kamal@fem.unicamp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7671-1384
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/2741276950055207

Fátima Aparecida de Morais Lino
Pós-Doutora em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
E-mail: kamal@fem.unicamp.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7619-1873
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/5444502955195473

Inácia Oliveira de Azevedo
Especialista em Psicopedagogia
Instituição: Universidade Federal do Amazonas (UFAM)
E-mail: I_azevedo10@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-7578-7407
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/1959448264262712

RESUMO

A destinação da maior parte dos resíduos sólidos urbanos brasileiros a aterros sanitários representa, além de um passivo ambiental, o desperdício de um potencial energético expressivo. Este artigo, elaborado como revisão integrativa da literatura, tem por objetivo verificar a quantidade de energia que pode ser recuperada dos resíduos sólidos urbanos atualmente depositados em aterros, com ênfase nas rotas de tratamento térmico. Foram analisados estudos brasileiros que caracterizam a composição

gravimétrica e o poder calorífico dos resíduos, que estimam o potencial de geração elétrica por incineração, gaseificação e coprocessamento, e que comparam essas rotas ao aproveitamento do biogás de aterro. Os resultados reunidos indicam que o poder calorífico inferior dos resíduos brasileiros situa-se, em média, entre 5,5 e 6,5 MJ por quilograma na coleta indiferenciada, podendo ultrapassar 12 MJ por quilograma quando removida a fração orgânica úmida. As estimativas de recuperação por via térmica apontam da ordem de 0,6 MWh por tonelada por incineração e potência instalável de dezenas a mais de duas centenas de megawatts, com capacidade de suprir entre 4% e 5% da demanda elétrica nacional. O aproveitamento do biogás de aterro, embora de menor densidade energética por tonelada, mostra-se vantajoso em regiões de baixa densidade populacional. Conclui-se que os resíduos hoje aterrados encerram um potencial energético subaproveitado e que a escolha da rota térmica ou biológica deve considerar a escala, a composição dos resíduos e a viabilidade econômica.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Recuperação de Energia. Aterros Sanitários.

ABSTRACT
The destination of most Brazilian municipal solid waste to sanitary landfills represents, in addition to an environmental liability, the waste of significant energy potential. This article, prepared as an integrative literature review, aims to verify the amount of energy that can be recovered from municipal solid waste currently deposited in landfills, with emphasis on thermal treatment routes. Brazilian studies were analyzed that characterize the gravimetric composition and calorific value of waste, estimate the potential for electricity generation through incineration, gasification and co-processing, and compare these routes to landfill biogas utilization. The results gathered indicate that the lower calorific value of Brazilian waste is on average between 5.5 and 6.5 MJ per kilogram in undifferentiated collection, and can exceed 12 MJ per kilogram when the wet organic fraction is removed. Estimates of recovery via thermal route point to around 0.6 MWh per ton through incineration and installable capacity of tens to more than two hundred megawatts, with the ability to supply between 4% and 5% of national electricity demand. The use of landfill biogas, although with lower energy density per ton, proves advantageous in regions of low population density. It is concluded that waste currently landfilled holds underutilized energy potential and that the choice of thermal or biological route should consider scale, waste composition and economic viability.

Keywords: Municipal Solid Waste. Energy Recovery. Sanitary Landfills.

RESUMEN
El destino de la mayor parte de los residuos sólidos urbanos brasileños a vertederos sanitarios representa, además de un pasivo ambiental, el desperdicio de un potencial energético significativo. Este artículo, elaborado como una revisión integradora de la literatura, tiene como objetivo verificar la cantidad de energía que puede recuperarse de los residuos sólidos urbanos actualmente depositados en vertederos, con énfasis en rutas de tratamiento térmico. Se analizaron estudios brasileños que caracterizan la composición gravimétrica y el poder calorífico de los residuos, que estiman el potencial de generación de electricidad mediante incineración, gasificación y coprocesamiento, y que comparan estas rutas con el aprovechamiento del biogás de vertedero. Los resultados reunidos indican que el poder calorífico inferior de los residuos brasileños se sitúa, en promedio, entre 5,5 y 6,5 MJ por kilogramo en la recolección indiferenciada, pudiendo superar los 12 MJ por kilogramo cuando se elimina la fracción orgánica húmeda. Las estimaciones de recuperación por vía térmica apuntan alrededor de 0,6 MWh por tonelada mediante incineración y capacidad instalable de decenas a más de doscientos megavatios, con capacidad de suministrar entre 4% y 5% de la demanda eléctrica nacional. El aprovechamiento del biogás de vertedero, aunque con menor densidad energética por tonelada, resulta ventajoso en regiones de baja densidad de población. Se concluye que los residuos actualmente

depositados en vertederos encierran un potencial energético subutilizado y que la elección de la ruta térmica o biológica debe considerar la escala, la composición de los residuos y la viabilidad económica.

Palabras clave: Residuos Sólidos Urbanos. Recuperación de Energía. Vertederos Sanitarios.

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos constitui um dos maiores desafios da política ambiental brasileira. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305 de 2010, estabeleceu uma hierarquia de prioridades — não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada — e admitiu, entre as formas de tratamento, a recuperação energética dos resíduos, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental. Passada mais de uma década de sua promulgação, contudo, a recuperação energética permanece marginal no país, e a disposição em aterros segue como destino predominante daquilo que é coletado.

Os números dimensionam o problema. O Brasil gerou cerca de 77 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos em um único ano recente, o equivalente a aproximadamente 1,04 quilograma por habitante ao dia; desse total, cerca de 61,8% receberam disposição final adequada, ao passo que mais de 33 milhões de toneladas tiveram destinação inadequada. Ainda que a disposição em aterros sanitários represente avanço em relação aos lixões, ela encerra, do ponto de vista energético, um paradoxo: enterra-se, junto aos resíduos, uma quantidade considerável de energia que poderia ser recuperada.

Essa energia não é desprezível. Os resíduos sólidos urbanos são, em grande parte, constituídos por materiais combustíveis e por matéria orgânica biodegradável, de modo que carregam um conteúdo energético que pode ser convertido em eletricidade e calor por diferentes rotas tecnológicas. Entre elas destacam-se as rotas térmicas — incineração, gaseificação, pirólise e coprocessamento —, que promovem a conversão direta do resíduo em energia, e as rotas biológicas, como a captura do biogás gerado pela decomposição anaeróbia nos próprios aterros. A questão central, para o planejamento, não é apenas se há energia a recuperar, mas quanta energia efetivamente se pode obter a partir dos resíduos hoje aterrados.

O problema que orienta este trabalho decorre precisamente dessa lacuna entre o potencial e o aproveitamento. Embora exista literatura crescente sobre o tema, os resultados apresentam-se dispersos, com métodos e recortes territoriais variados, o que dificulta uma visão de conjunto sobre a ordem de grandeza da energia recuperável. Reunir e confrontar esses achados é condição para subsidiar decisões de política pública e para avaliar o custo de oportunidade da manutenção do aterro como destino final predominante.

A pertinência do tema amplia-se no contexto da transição energética e dos compromissos climáticos assumidos pelo país. À medida que se busca diversificar a matriz elétrica e reduzir as emissões associadas à disposição de resíduos, a valoração energética desponta como estratégia que articula dois objetivos habitualmente tratados em separado: a gestão adequada dos resíduos e a geração

de energia. Compreender a magnitude desse potencial é, portanto, requisito para avaliar em que medida os resíduos podem contribuir simultaneamente para a agenda ambiental e para a agenda energética.

O objetivo geral deste artigo é verificar, a partir da literatura, a quantidade de energia que pode ser recuperada dos resíduos sólidos urbanos destinados a aterros sanitários no Brasil, com ênfase nas rotas de tratamento térmico. Como objetivos específicos, busca-se caracterizar a composição e o poder calorífico dos resíduos brasileiros; descrever as rotas térmicas de recuperação energética; sintetizar as estimativas quantitativas de energia recuperável; e comparar a via térmica ao aproveitamento do biogás de aterro. A relevância do estudo está em oferecer uma síntese quantitativa que contribua para o debate sobre a valoração energética dos resíduos, tema de crescente importância diante dos compromissos ambientais e da diversificação da matriz elétrica nacional.

2 METODOLOGIA

Adotou-se o método da revisão integrativa da literatura, que permite reunir, analisar e sintetizar de forma sistematizada os resultados de estudos sobre determinado tema, contribuindo para a construção do conhecimento e para a fundamentação de decisões. A opção por essa modalidade justifica-se pela natureza do objeto, que reúne dados quantitativos heterogêneos — de composição, poder calorífico e potencial de geração — produzidos por estudos com desenhos e escalas distintas, cuja integração exige um procedimento capaz de articular evidências de fontes diversas.

A busca foi conduzida nas bases SciELO, ScienceDirect e Google Acadêmico, complementada pela consulta a documentos oficiais e à legislação pertinente. Empregaram-se, isoladamente e em combinação, os descritores e termos livres: *"resíduos sólidos urbanos"*, *"recuperação energética"*, *"tratamento térmico"*, *"incineração"*, *"poder calorífico"*, *"biogás de aterro"* e *"waste to energy"*, nos idiomas português e inglês.

Adotaram-se como critérios de inclusão: estudos que caracterizassem a composição gravimétrica ou o poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos brasileiros; que estimassem o potencial de recuperação energética por rotas térmicas ou biológicas; e documentos oficiais que fornecessem dados de geração e destinação. Priorizaram-se publicações recentes, admitindo-se referências de valor metodológico ou normativo consolidado. Foram excluídos materiais sem revisão editorial e trabalhos cuja procedência não pôde ser verificada. Os dados quantitativos reproduzidos neste artigo foram extraídos diretamente das fontes primárias, sem estimativas ou extrapolações próprias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA LITERATURA

3.1 GERAÇÃO E DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL

A dimensão do fluxo de resíduos é o ponto de partida para qualquer avaliação do potencial energético. Com geração da ordem de 77 milhões de toneladas anuais e disposição final adequada de cerca de 61,8% do coletado, o país concentra em aterros sanitários um volume expressivo de material com conteúdo energético aproveitável, ao mesmo tempo em que ainda destina mais de 33 milhões de toneladas a locais inadequados. A predominância do aterro como destino, embora represente melhoria sanitária frente aos lixões, significa, em termos energéticos, a imobilização de um recurso que a hierarquia legal admite valorar.

A própria Política Nacional de Resíduos Sólidos oferece o respaldo normativo para essa valoração, ao incluir a recuperação energética entre as formas de tratamento admitidas, condicionada à comprovação de viabilidade técnica e ambiental e ao controle de emissões. Existe, portanto, um descompasso entre o arcabouço legal, que autoriza e hierarquiza o aproveitamento energético acima da simples disposição, e a prática, que mantém o aterro como destino terminal da fração majoritária dos resíduos coletados.

A distribuição regional da destinação adequada acentua esse quadro e tem implicações diretas para a recuperação energética. As regiões Sul e Sudeste concentram os melhores indicadores de disposição ambientalmente adequada, ao passo que as demais apresentam desempenho inferior. Como as rotas de valoração energética exigem, além de volume, a existência de aterros e de infraestrutura minimamente estruturada, a assimetria regional na destinação tende a reproduzir-se na distribuição do aproveitamento energético, concentrando-o nas regiões mais estruturadas e desafiando as políticas a não aprofundar desigualdades territoriais já existentes.

3.2 COMPOSIÇÃO E PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS

A quantidade de energia recuperável depende, antes de tudo, das características do resíduo. A composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos brasileiros distingue-se pela elevada participação da fração orgânica úmida — restos de alimentos e material putrescível —, que convive com frações combustíveis de maior conteúdo energético, como papéis, papelões, plásticos e têxteis. Essa combinação é decisiva: a matéria orgânica, por seu alto teor de umidade, reduz o poder calorífico do conjunto, enquanto as frações secas o elevam.

Estudos de caracterização confirmam esse padrão e sua influência sobre o conteúdo energético. Em resíduos domiciliares do município de Ponta Grossa, no Paraná, verificou-se poder calorífico superior da ordem de 19.807 quilojoules por quilograma, valor elevado na comparação internacional

e indicativo do potencial contido no material. Tais medidas, contudo, variam conforme a composição local e o teor de umidade, o que recomenda cautela na generalização de um valor único para todo o território.

A dependência do poder calorífico em relação à separação prévia dos resíduos foi quantificada de modo eloquente. Estimou-se, para a coleta indiferenciada, poder calorífico inferior médio de 6,50 MJ por quilograma; após a separação dos recicláveis secos, o valor caiu para 5,54 MJ por quilograma; e, quando removida a fração orgânica úmida, elevou-se para 12,95 MJ por quilograma. O contraste evidencia que a umidade da fração orgânica é o principal fator limitante do desempenho térmico e que o pré-tratamento — sobretudo a segregação da matéria orgânica — praticamente dobra o conteúdo energético disponível para a combustão.

Tabela 1. Poder calorífico de resíduos sólidos urbanos brasileiros segundo estudos de caracterização

Condição do resíduo / estudo	**Poder calorífico**	**Fonte**
Resíduos domiciliares (Ponta Grossa, PR) — poder calorífico superior	≈ 19.807 kJ/kg	Gomes et al. (2017)
Coleta indiferenciada — poder calorífico inferior	6,50 ± 1,29 MJ/kg	Silva et al. (2019)
Após separação dos recicláveis secos	5,54 ± 1,30 MJ/kg	Silva et al. (2019)
Após remoção da fração orgânica úmida	12,95 ± 2,11 MJ/kg	Silva et al. (2019)

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Gomes *et al.* (2017) e Silva *et al.* (2019).

Convém situar esses valores em perspectiva. O poder calorífico inferior dos resíduos brasileiros, na faixa de 5,5 a 6,5 MJ por quilograma na coleta indiferenciada, é modesto quando comparado ao de combustíveis convencionais, mas deixa de sê-lo quando se considera o volume envolvido: multiplicado por dezenas de milhões de toneladas anuais, esse conteúdo unitário aparentemente baixo converte-se em um estoque energético de grande monta. É essa aritmética — conteúdo unitário modesto, porém aplicado a um fluxo massivo — que sustenta a relevância do tema e que justifica o esforço de quantificação empreendido nas seções seguintes.

A variabilidade dos valores encontrados na literatura também merece registro. As diferenças entre estudos decorrem não apenas da composição real dos resíduos de cada localidade, mas também dos métodos de estimativa empregados — desde a medição direta em bomba calorimétrica até modelos empíricos baseados nas análises imediata, elementar e gravimétrica. Essa diversidade metodológica recomenda que os valores sejam lidos como faixas representativas, e não como constantes, e reforça a importância de caracterizações locais antes do dimensionamento de qualquer planta de recuperação energética.

3.3 ROTAS DE TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico compreende um conjunto de rotas que promovem a conversão do resíduo em energia por meio de reações a alta temperatura. A incineração com recuperação de energia, tecnologia de combustão em massa amplamente difundida em países de alta renda, é a rota mais consolidada: o resíduo é queimado e o calor gerado produz vapor que aciona turbinas geradoras de eletricidade. A gaseificação e a pirólise, por sua vez, promovem a conversão termoquímica em condições controladas de oxigênio, gerando gases combustíveis e outros produtos, mas exigem maior padronização e pré-tratamento do resíduo. Cada rota apresenta requisitos e eficiências distintos, e a escolha entre elas depende da composição do resíduo, da escala e das condições locais.

O coprocessamento em fornos de cimento constitui uma rota térmica adicional, na qual o resíduo — usualmente preparado na forma de combustível derivado de resíduos — substitui parte dos combustíveis fósseis na produção de clínquer, aproveitando a alta temperatura do processo industrial já existente. Essa via apresenta a vantagem de dispensar a construção de plantas dedicadas, valendo-se de infraestrutura instalada, mas impõe exigências de qualidade e homogeneidade ao combustível derivado, o que remete novamente à importância do pré-tratamento e da segregação discutidos anteriormente.

A pirólise, terceira rota termoquímica, promove a decomposição do resíduo em ausência de oxigênio, gerando frações líquida, sólida e gasosa que podem ser aproveitadas como combustíveis ou insumos. Assim como a gaseificação, exige resíduo relativamente homogêneo e de baixa umidade, o que a torna mais sensível às características do material do que a incineração convencional. Em resíduos brasileiros de composição heterogênea e elevada fração orgânica úmida, essas rotas de conversão controlada tendem a demandar pré-tratamento mais intenso, o que se reflete em custos e em menor rendimento líquido quando comparadas à combustão direta.

Do ponto de vista do balanço energético, a incineração com recuperação de energia opera segundo um princípio simples: o calor liberado na combustão gera vapor que aciona um ciclo termodinâmico de geração elétrica, e a eficiência global depende do poder calorífico do resíduo, da eficiência da caldeira e do rendimento do ciclo. Justamente por isso, a fração de energia efetivamente convertida em eletricidade é sensível às premissas adotadas, e estudos costumam trabalhar com cenários de eficiência elétrica que variam tipicamente entre valores da ordem de 18% a 30%, faixa que explica boa parte da dispersão observada nas estimativas de geração.

Comum a todas as rotas térmicas é a sensibilidade ao teor de umidade do resíduo. Como a fração orgânica úmida reduz o poder calorífico e consome energia em sua própria evaporação, o desempenho das tecnologias de combustão melhora significativamente quando essa fração é segregada

ou quando o resíduo passa por secagem. Essa dependência ajuda a explicar por que, em resíduos brasileiros de elevada participação orgânica, o rendimento das rotas térmicas tende a ser inferior ao observado em países cujos resíduos são mais secos, e por que o pré-tratamento assume papel estratégico na viabilização dessas tecnologias.

3.4 QUANTIDADE DE ENERGIA RECUPERÁVEL POR VIA TÉRMICA

Antes de apresentar as estimativas, cabe uma observação sobre as unidades e a lógica dos cálculos. O potencial de recuperação costuma ser expresso de duas formas complementares: como energia por unidade de massa de resíduo — em megawatt-hora por tonelada —, que traduz a densidade energética da rota, e como potência instalável ou geração agregada — em megawatts ou gigawatt-hora por ano —, que resulta da aplicação daquela densidade ao fluxo total de resíduos de um território. A primeira forma permite comparar tecnologias; a segunda, dimensionar o impacto sobre a oferta de energia. A leitura conjunta das duas é o que confere significado às cifras apresentadas a seguir.

As estimativas de recuperação energética por incineração convergem para uma ordem de grandeza expressiva. Análise de sistemas térmicos indicou geração da ordem de 0,62 MWh por tonelada de resíduo por incineração na região Sudeste, contra cerca de 0,24 MWh por tonelada por gaseificação, e projetou que a implantação dessas rotas poderia acrescentar até 4,86% à matriz energética brasileira. A superioridade da incineração frente à gaseificação, nesse estudo, decorre em boa medida da menor exigência de pré-processamento e da maior eficiência de conversão em resíduos de composição heterogênea como os brasileiros.

Modelagens do potencial de geração reforçam a magnitude. Estimou-se, para a coleta indiferenciada, potência elétrica média da ordem de 214 MW por incineração, valor cerca de cinco vezes superior ao obtido por biodigestão anaeróbia da fração orgânica, da ordem de 37 a 41 MW. A diferença expressa a maior densidade energética da rota térmica quando se considera a totalidade do resíduo, e não apenas sua fração orgânica, ainda que o resultado seja sensível às premissas de composição e eficiência adotadas.

Estudo do potencial economicamente viável quantificou, para aglomerações de até três milhões de habitantes, potência da ordem de 58,9 MW e geração total de 11.681,64 GWh por incineração, o que corresponderia a cerca de 4,3% da demanda nacional, com a energia produzida capaz de suprir, em média, aproximadamente 15% da população geradora dos resíduos. O mesmo estudo, entretanto, apontou que a viabilidade econômica é fortemente dependente da escala: para populações menores, o valor presente líquido e a taxa interna de retorno mostraram-se negativos, e o custo nivelado da energia resultou superior ao de outras fontes.

Levantamentos regionais abrangentes, que consideraram conjuntamente as rotas termoquímicas e as biológicas, confirmam que o potencial elétrico dos resíduos é significativo e que sua distribuição depende do arranjo territorial e populacional. A convergência entre estudos de diferentes autores e regiões em torno de uma contribuição possível da ordem de 4% a 5% da demanda elétrica nacional confere robustez à estimativa e sinaliza que se trata de um recurso energético de escala relevante, hoje amplamente desperdiçado.

É preciso, contudo, interpretar esses percentuais com precisão. Uma contribuição de 4% a 5% da demanda elétrica nacional não é trivial: corresponde à produção de usinas de grande porte e representa parcela relevante da margem de diversificação de uma matriz que busca reduzir sua dependência de uma única fonte. Ao mesmo tempo, esse patamar deixa claro que a energia dos resíduos não é solução isolada para o suprimento elétrico do país, mas componente complementar de um portfólio, cujo valor se soma ao dos cobenefícios ambientais e sanitários associados ao tratamento adequado dos resíduos.

A tradução do potencial em potência instalável também depende de fatores de disponibilidade e de continuidade do fluxo de resíduos. Diferentemente de fontes intermitentes, o resíduo é gerado de modo contínuo e previsível, o que confere às plantas de recuperação energética uma característica de geração de base, capaz de operar com elevado fator de capacidade. Essa previsibilidade é um atributo valioso do ponto de vista do planejamento do sistema elétrico e constitui um argumento adicional, muitas vezes subestimado, a favor da valoração energética dos resíduos.

Tabela 2. Estimativas de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas

Rota / indicador	**Valor estimado**	**Fonte**
Incineração (Sudeste)	≈ 0,62 MWh/t	Alves et al. (2025)
Gaseificação (Sudeste)	≈ 0,24 MWh/t	Alves et al. (2025)
Incineração — potência média (coleta indiferenciada)	≈ 214 MW	Silva et al. (2019)
Biodigestão anaeróbia da fração orgânica — potência média	37–41 MW	Silva et al. (2019)
Incineração até 3 milhões de habitantes	58,9 MW; 11.681,64 GWh (≈ 4,3% da demanda)	Silva et al. (2020)
Biogás de aterro — capacidade instalada no país (2004–2015)	86,3 MW (9 usinas)	Nascimento et al. (2019)

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Silva *et al.* (2019), Silva *et al.* (2020), Nascimento *et al.* (2019) e Alves *et al.* (2025).

3.5 A ALTERNATIVA DOS ATERROS: O BIOGÁS COMO ROTA DE RECUPERAÇÃO

A pergunta que dá título e foco a este trabalho — quanta energia se pode recuperar dos resíduos hoje aterrados — comporta uma resposta que não se esgota nas rotas térmicas. O próprio aterro, ao longo da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, gera biogás rico em metano, cuja captura e queima em motores ou turbinas permite a geração de eletricidade. Essa rota tem a vantagem de aproveitar uma infraestrutura já existente e de mitigar emissões de metano que, de outro modo, escapariam para a atmosfera.

O aproveitamento do biogás de aterro no Brasil, contudo, permanece incipiente. Levantamento do estado da arte identificou que, entre 2004 e 2015, foram instaladas apenas nove termelétricas movidas a biogás de aterro no país, somando 86,3 MW de capacidade, além de duas plantas produtoras de biometano, e que o Brasil aproveita somente de 7% a 20% do biogás efetivamente gerado nos aterros para fins energéticos. O dado é revelador: mesmo a rota que dispensa novas plantas e se vale do próprio aterro é explorada em fração diminuta de seu potencial, o que reforça o diagnóstico de um recurso amplamente desperdiçado.

A viabilidade dessa rota, à semelhança da via térmica, é fortemente condicionada pela escala. Estudos de potencial e de viabilidade econômica do biogás de aterro em função da população demonstram que o aproveitamento se torna atrativo sobretudo em aglomerações de maior porte, onde o volume de resíduos assegura uma geração de biogás suficiente para justificar o investimento em captação e conversão. Em municípios menores, o potencial individual é reduzido, o que sugere a necessidade de soluções consorciadas e de arranjos regionais para viabilizar o aproveitamento.

A comparação entre as rotas revela uma complementaridade condicionada ao território. Análises que consideram simultaneamente as vias térmicas e biológicas indicam que, em regiões de baixa densidade populacional e menor infraestrutura, o aproveitamento do biogás tende a predominar sobre a incineração, ao passo que, em aglomerações densas e com maior volume de resíduos, a rota térmica ganha competitividade. Não se trata, portanto, de eleger uma tecnologia universalmente superior, mas de ajustar a escolha às condições de escala, composição e densidade de cada contexto.

Essa complementaridade tem uma consequência importante para a resposta à pergunta que orienta o trabalho. Ao se indagar quanta energia se pode recuperar dos resíduos aterrados, a resposta não é única, mas dependente da rota e do arranjo territorial. A rota térmica oferece maior densidade energética por tonelada e favorece os grandes centros; a rota do biogás, embora de menor rendimento unitário, aproveita a infraestrutura do próprio aterro e adequa-se melhor a contextos dispersos. O potencial total, portanto, resulta da combinação criteriosa das duas vias, calibrada segundo a realidade de cada território, e não da adoção indiscriminada de uma delas.

A trajetória histórica também ajuda a compreender o estágio atual. O reduzido número de usinas de biogás de aterro instaladas ao longo de mais de uma década, e a inexistência de plantas térmicas dedicadas em operação, revelam que a valoração energética dos resíduos no Brasil não decorreu de um movimento espontâneo do mercado, mas dependeu de iniciativas pontuais. Esse padrão contrasta com o de países que, diante da escassez de áreas para aterro e de políticas de restrição à disposição de resíduos com conteúdo energético, converteram a recuperação energética em componente estruturante de seus sistemas de gestão. A diferença não é primordialmente técnica, mas de contexto econômico, territorial e regulatório, e sugere que a difusão da tecnologia no país dependerá menos de avanços tecnológicos do que de mudanças nesses condicionantes.

3.6 COBENEFÍCIOS AMBIENTAIS DA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

A quantificação da energia recuperável, embora seja o foco deste trabalho, não esgota o valor da valoração energética, que se completa com um conjunto de cobenefícios ambientais raramente contabilizados nas análises estritamente energéticas. O primeiro deles é a mitigação de emissões de gases de efeito estufa. A matéria orgânica depositada em aterros gera metano, gás de potencial de aquecimento muito superior ao do dióxido de carbono; capturá-lo e convertê-lo em energia, ou processar o resíduo por via térmica antes de sua decomposição, evita que esse metano escape para a atmosfera.

A recuperação do biogás de aterro ilustra esse duplo ganho: além de gerar eletricidade, a queima do metano capturado reduz o impacto climático que a decomposição não controlada produziria, razão pela qual a rota é frequentemente valorizada tanto por seu retorno energético quanto por sua contribuição à mitigação. Esse cobenefício é particularmente relevante no Brasil, onde a fração orgânica dos resíduos é elevada e o metano representa parcela significativa das emissões associadas à disposição final.

Um segundo cobenefício é a redução do volume destinado ao aterro. As rotas térmicas reduzem drasticamente a massa e o volume do resíduo, prolongando a vida útil das células de disposição e postergando a necessidade de novas áreas — recurso escasso e socialmente sensível nas proximidades dos grandes centros. A esses ganhos somam-se a redução de passivos ambientais associados a chorume e a vetores, e a possibilidade de recuperação de materiais nas cinzas. Quando internalizados, esses cobenefícios alteram a equação de viabilidade, deslocando a avaliação de uma leitura estritamente centrada na receita da energia para uma análise de custo evitado e de externalidades positivas.

3.7 BARREIRAS E CONDICIONANTES DA VIABILIDADE

A despeito do potencial expressivo, a implantação da recuperação energética no Brasil esbarra em barreiras econômicas relevantes. A análise de viabilidade da incineração evidenciou custos nivelados de energia superiores aos de outras fontes e indicadores financeiros desfavoráveis para populações menores, o que limita a replicabilidade da tecnologia fora dos grandes centros. A esses fatores somam-se a matriz elétrica brasileira, historicamente dominada por fontes de baixo custo como a hidreletricidade, que reduz a competitividade relativa da energia dos resíduos, e a ausência de infraestrutura dedicada de valoração térmica em operação no país.

A composição dos resíduos brasileiros constitui barreira técnica adicional. A elevada participação da fração orgânica úmida deprime o poder calorífico e penaliza o desempenho das rotas térmicas, de modo que a segregação prévia e o pré-tratamento tornam-se condições quase indispensáveis para elevar o rendimento energético a patamares atrativos. Nesse sentido, a valoração energética não prescinde da coleta seletiva e da gestão da matéria orgânica: longe de serem alternativas concorrentes, a reciclagem, a compostagem e a recuperação energética compõem um sistema no qual o pré-tratamento condiciona o desempenho da etapa térmica.

Há, ainda, condicionantes de escala e de arranjo institucional. Tanto as rotas térmicas quanto o aproveitamento do biogás dependem de volumes mínimos de resíduo para viabilizar o investimento, o que aponta para a importância de soluções consorciadas entre municípios e de instrumentos de planejamento regional. O coprocessamento, ao aproveitar a infraestrutura industrial existente, e os consórcios intermunicipais figuram, nesse cenário, como caminhos capazes de contornar parte das limitações de escala que inviabilizam plantas dedicadas em contextos de menor porte.

O controle ambiental das rotas térmicas constitui condicionante que não pode ser negligenciado. A combustão de resíduos exige sistemas rigorosos de tratamento de gases e de monitoramento de emissões para evitar a liberação de poluentes atmosféricos, exigência que integra o próprio marco legal ao condicionar a recuperação energética ao controle ambiental. Esse requisito eleva o custo de capital das plantas, mas é indispensável à aceitabilidade social e ambiental da tecnologia, e sua observância distingue a recuperação energética moderna das práticas de queima descontrolada que, no passado, deram má reputação à incineração.

4 SÍNTESE E DISCUSSÃO

A integração dos estudos analisados permite responder ao objetivo central e, ao mesmo tempo, identificar convergências, divergências e lacunas. O quadro que emerge é o de um recurso energético

de escala relevante, tecnicamente recuperável por múltiplas rotas, porém subaproveitado por razões econômicas, técnicas e institucionais.

4.1 CONVERGÊNCIAS

A primeira convergência é quantitativa. Estudos independentes, com métodos e recortes distintos, situam a contribuição potencial da recuperação energética dos resíduos na faixa de 4% a 5% da demanda elétrica nacional, cifra que confere materialidade ao argumento de que os resíduos aterrados encerram um potencial energético significativo. A coincidência de ordens de grandeza entre trabalhos distintos reduz a probabilidade de que se trate de artefato metodológico e reforça a solidez da estimativa agregada.

A segunda convergência refere-se ao papel determinante da composição e da umidade. Praticamente todos os estudos que caracterizam o resíduo apontam a fração orgânica úmida como o principal fator limitante do poder calorífico, e demonstram que sua segregação eleva substancialmente o conteúdo energético disponível. Essa convergência tem implicação prática direta: a eficiência da recuperação térmica está atada à qualidade da gestão a montante, o que integra a valoração energética ao conjunto das demais etapas do manejo dos resíduos.

A terceira convergência é o diagnóstico do subaproveitamento. Da fração diminuta do biogás de aterro efetivamente explorada à ausência de plantas térmicas dedicadas em operação, os estudos coincidem em retratar um enorme descompasso entre o potencial teórico e o aproveitamento real. Esse descompasso, à luz do respaldo normativo conferido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos à recuperação energética, evidencia que a barreira não é primordialmente legal, mas econômica, técnica e de planejamento.

Vale sublinhar que essas três convergências se reforçam mutuamente e compõem um argumento coerente. O potencial é significativo (primeira convergência), mas seu aproveitamento depende da qualidade da gestão a montante (segunda convergência) e permanece, na prática, largamente irrealizado (terceira convergência). Lidas em conjunto, as evidências sugerem que a recuperação energética dos resíduos no Brasil encontra-se em um estágio de potencial reconhecido, respaldo legal existente e implementação incipiente — configuração que desloca o eixo do debate da comprovação do potencial para a construção das condições de sua realização.

4.2 DIVERGÊNCIAS

As divergências concentram-se na hierarquia entre as rotas. Enquanto alguns estudos enfatizam a superioridade energética da incineração por tonelada, sobretudo em contextos de alta densidade

populacional, outros demonstram que, em regiões de baixa densidade, o aproveitamento do biogás e as rotas biológicas apresentam melhor relação entre custo e benefício. Essa aparente contradição dissolve-se quando se considera a variável da escala: as rotas não são universalmente melhores ou piores, e sua adequação depende do volume de resíduos, da densidade populacional e da infraestrutura disponível em cada território.

Uma segunda divergência, de natureza mais conceitual, diz respeito ao próprio lugar da recuperação energética na hierarquia de gestão. Parte da literatura a valoriza como forma de tratamento preferível à disposição simples, alinhada à hierarquia legal; outra vertente adverte que a valoração energética não deve competir com a reciclagem e a compostagem nem desestimulá-las, sob pena de subverter a ordem de prioridades. Essa tensão é real, mas dissolve-se quando se compreende que a recuperação energética deve incidir preferencialmente sobre a fração não reciclável e não compostável do resíduo, complementando — e não substituindo — as etapas superiores da hierarquia.

Há também divergência quanto às premissas de eficiência de conversão adotadas nas modelagens, o que se reflete na amplitude das estimativas de potência e de geração. Diferentes hipóteses sobre a eficiência elétrica das plantas, sobre a composição do resíduo e sobre o grau de pré-tratamento produzem resultados que, embora convergentes em ordem de grandeza, variam de forma não desprezível em valor absoluto. Essa sensibilidade recomenda que as estimativas sejam interpretadas como faixas de potencial, e não como valores exatos.

4.3 LACUNAS

A primeira lacuna é a padronização metodológica. A variedade de premissas de eficiência, de composição e de fronteiras de análise dificulta a comparação direta entre estudos e a consolidação de um valor de referência nacional. A adoção de protocolos comuns de caracterização e de estimativa contribuiria para a robustez e a comparabilidade dos resultados.

A segunda lacuna é a avaliação integrada de custos e benefícios, que contemple não apenas a geração de energia, mas também os benefícios ambientais evitados — a mitigação de emissões de metano, a redução do volume aterrado e o prolongamento da vida útil dos aterros. Análises que internalizem esses benefícios poderiam alterar a avaliação de viabilidade, hoje frequentemente desfavorável quando se considera apenas a receita da energia.

A terceira lacuna é a escassez de experiências operacionais em escala real no país, que limita a validação empírica das estimativas teóricas. A ausência de plantas térmicas dedicadas em operação priva o planejamento de dados reais de desempenho, custo e emissões, mantendo o debate em grande

medida no plano das modelagens. A implantação de projetos-piloto e o monitoramento de experiências existentes de biogás de aterro constituiriam contribuição valiosa para reduzir essa incerteza.

4.4 IMPLICAÇÕES

Há, também, uma implicação para a agenda de pesquisa e para a formação técnica. A escassez de dados operacionais nacionais e a heterogeneidade das estimativas indicam a necessidade de fortalecer a caracterização sistemática dos resíduos brasileiros e de desenvolver capacidade técnica para o projeto, a operação e o monitoramento de plantas de recuperação energética. Investir nessa base de conhecimento é condição para que futuras decisões de investimento se apoiem em dados locais robustos, e não apenas em parâmetros importados de contextos cujos resíduos e cuja matriz diferem substancialmente dos brasileiros.

As implicações desta síntese para a política pública são diretas. A recuperação energética dos resíduos deve ser compreendida não como alternativa isolada, mas como componente de um sistema integrado de gestão, articulado à coleta seletiva, à reciclagem e à gestão da matéria orgânica, que condicionam seu desempenho. A escolha da rota — térmica ou biológica — deve orientar-se pela escala, pela composição e pela densidade populacional, o que favorece soluções regionais e consorciadas capazes de reunir os volumes mínimos de viabilidade.

Do ponto de vista dos instrumentos, a experiência internacional sugere que a viabilização da recuperação energética raramente prescinde de mecanismos de apoio. Tarifas diferenciadas, cobrança pela disposição em aterro, contratos de longo prazo para a compra da energia e a valoração dos serviços ambientais associados figuram entre os instrumentos que, ao internalizar os benefícios evitados e ao reduzir a incerteza dos investimentos, alteram a equação de viabilidade. A ausência ou a fragilidade desses instrumentos no país ajuda a explicar por que um potencial tecnicamente demonstrado permanece, na prática, tão pouco explorado.

Cumpre, por fim, resguardar-se contra o entusiasmo desmedido. As barreiras econômicas identificadas são reais, e a competitividade da energia dos resíduos frente a fontes consolidadas não é automática. O que a evidência autoriza afirmar é que existe, nos resíduos hoje aterrados, um potencial energético da ordem de alguns pontos percentuais da demanda elétrica nacional, cuja realização depende menos de disponibilidade técnica do que de arranjos econômicos, institucionais e de planejamento que tornem a valoração competitiva e sustentável.

5 CONCLUSÃO

A revisão integrativa realizada permite responder ao objetivo central: os resíduos sólidos urbanos destinados a aterros sanitários no Brasil encerram um potencial energético expressivo, tecnicamente recuperável por rotas térmicas e biológicas, mas hoje amplamente subaproveitado. As evidências reunidas indicam poder calorífico inferior da ordem de 5,5 a 6,5 MJ por quilograma na coleta indiferenciada, com elevação para além de 12 MJ por quilograma quando removida a fração orgânica úmida, e estimativas de recuperação por via térmica que apontam da ordem de 0,6 MWh por tonelada por incineração e potência instalável de dezenas a mais de duas centenas de megawatts.

Retomando os objetivos específicos, verificou-se que a composição dos resíduos brasileiros, marcada pela elevada fração orgânica úmida, é o principal condicionante do desempenho energético; que as rotas térmicas — incineração, gaseificação, pirólise e coprocessamento — oferecem maior densidade energética por tonelada, ao passo que o aproveitamento do biogás de aterro se destaca em contextos de menor escala; e que o conjunto das estimativas converge para uma contribuição possível da ordem de 4% a 5% da demanda elétrica nacional. A comparação entre as rotas revelou complementaridade condicionada à escala e à densidade populacional, e não superioridade absoluta de uma tecnologia.

As implicações científicas e práticas são relevantes. Ao demonstrar a magnitude do potencial e ao mapear seus condicionantes, o estudo reforça o argumento de que a manutenção do aterro como destino terminal predominante implica um custo de oportunidade energético e ambiental que a política de resíduos deveria internalizar. A valoração energética, integrada à coleta seletiva e à gestão da matéria orgânica, apresenta-se como caminho coerente com a hierarquia legal e com a diversificação da matriz elétrica.

Cabe reafirmar, como resposta direta à pergunta que deu origem a este trabalho, a ordem de grandeza encontrada. Os resíduos hoje aterrados no país guardam um conteúdo energético que, se aproveitado, poderia representar da ordem de alguns pontos percentuais da demanda elétrica nacional, além de evitar emissões de metano e de prolongar a vida útil dos aterros. Não se trata de um recurso capaz de, isoladamente, transformar a matriz elétrica, mas de uma parcela relevante e hoje quase integralmente desperdiçada, cuja recuperação alia benefícios energéticos, ambientais e sanitários. Ignorar esse potencial equivale a manter enterrado, junto ao resíduo, um recurso que a própria legislação reconhece como aproveitável.

Reconhecem-se as limitações inerentes a uma revisão integrativa, cujo alcance depende da literatura disponível e da heterogeneidade metodológica das fontes. Precisamente por isso, delineiam-se perspectivas para pesquisas futuras: a padronização de protocolos de caracterização e de estimativa

do potencial; a avaliação integrada de custos e de benefícios ambientais evitados; e a implantação e o monitoramento de experiências em escala real, capazes de substituir modelagens teóricas por dados operacionais. Em síntese, a energia dos resíduos sólidos urbanos hoje aterrados constitui um recurso de escala nacional relevante, cuja recuperação depende, sobretudo, de decisões de planejamento e de arranjos econômicos e institucionais que a tornem viável. Transformar esse potencial em geração efetiva é, ao mesmo tempo, uma oportunidade energética, uma medida de mitigação ambiental e um passo na direção da destinação ambientalmente adequada preconizada pela legislação — objetivos que, longe de se excluírem, convergem na valoração energética dos resíduos.

REFERÊNCIAS

Alves RB, Galavote TG, Siman RR, Yamane L. Potencial de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos para sistemas térmicos no Brasil. urbe Rev Bras Gest Urbana. 2025;17:e20230415. doi:10.1590/2175-3369.017.e20230415.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABREMA; 2024.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União; 2010.

Dalmo FC, Simão NM, Lima HQ, Jimenez ACM, Nebra S, Martins G, *et al.* Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. J Clean Prod. 2019;212:461-74. doi:10.1016/j.jclepro.2018.12.016.

Fernandes GL, Santos IFS, Silva HLC, Barros RM. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. Eng Sanit Ambient. 2022;27(1):67-77. doi:10.1590/S1413-415220200210.

Gomes S, Weirich Neto PH, Silva DA, Antunes SRM, Rocha CH. Potencial energético de resíduos sólidos domiciliares do município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil. Eng Sanit Ambient. 2017;22(6):1197-207. doi:10.1590/S1413-41522017143432.

Nascimento MCB, Freire EP, Dantas FAS, Giansante MB. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Eng Sanit Ambient. 2019;24(1):143-55. doi:10.1590/S1413-41522019171125.

Silva ER, Toneli JTCL, Palacios-Bereche R. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. Eng Sanit Ambient. 2019;24(2). doi:10.1590/S1413-41522019179023.

Silva LJVB, Santos IFS, Mensah JHR, Gonçalves ATT, Barros RM. Incineration of municipal solid waste in Brazil: an analysis of the economically viable energy potential. Renew Energy. 2020;149:1386-94. doi:10.1016/j.renene.2019.10.134.

Souza MT, Silva MD, Carvalho R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. Einstein (São Paulo). 2010;8(1):102-6. doi:10.1590/S1679-45082010RW1134.

Torres VA, Lange LC. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. Eng Sanit Ambient. 2022;27(1). doi:10.1590/S1413-415220210221.