

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO NORDESTE: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL AO CURTAILMENT E AOS LIXÕES

Marcos Felipe Sobral dos Santos – marcosfelipesobral@hotmail.com

Rede Nordeste de Biotecnologia e Sergipe Parque Tecnológico (SergipeTec)

Rosivânia da Paixão Silva Oliveira – rosipaixao@academico.ufs.br

Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe

Eliana Midori Sussuchi – esmidori@gmail.com

Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe

Isabelly Pereira da Silva – isabellypereira@outlook.com

Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe

Gabriel Francisco da Silva – gabrieldasilva1961@gmail.com

Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe

Resumo - A região Nordeste do Brasil enfrenta dois desafios críticos: a destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos (RSU), com mais de 1.500 lixões ativos, e o crescente curtailment de fontes renováveis devido à limitação da infraestrutura elétrica. Este estudo analisa o potencial da valorização energética dos RSUs por meio de tecnologias Waste-to-Energy (WtE), como incineração controlada, digestão anaeróbica e gaseificação, como solução integrada para esses problemas. Utilizando dados públicos e modelagem teórica, estima-se que a região poderia gerar até 30.000 GWh/ano de eletricidade a partir de resíduos, equivalente a 14% do consumo regional. Os resultados indicam que a energia proveniente de RSUs, por ser despachável e contínua, pode reduzir o curtailment de renováveis, substituir térmicas fósseis e aumentar a confiabilidade do sistema elétrico. A substituição de lixões por centrais WtE também poderia evitar a emissão de milhões de toneladas de CO₂ equivalente, viabilizar créditos de carbono e gerar empregos. Apesar de barreiras institucionais, técnicas e sociais, a pesquisa sugere diretrizes para projetos-piloto, integração de políticas públicas, incentivos regulatórios e inclusão de catadores. Assim, a valorização energética de resíduos configura-se como alternativa sustentável para a transição energética e o saneamento no semiárido nordestino.

Palavras-chaves - Curtailment, Resíduos Sólidos Urbanos, Sustentabilidade Energética, Valorização Energética.

Abstract - The Northeast of Brazil faces two major challenges: the inadequate disposal of municipal solid waste (MSW), with more than 1,500 active dumps, and the growing curtailment of renewable sources due to limited grid infrastructure. This study analyzes the potential of Waste-to-Energy (WtE) technologies, such as controlled incineration, anaerobic digestion, and gasification, as an integrated solution to these issues. Based on public data and theoretical modeling, it is estimated that the region could generate up to 30,000 GWh/year of electricity from waste, equivalent to 14% of regional consumption. Results indicate that MSW-based energy, being dispatchable and continuous, can reduce renewable curtailment, replace fossil thermal generation, and enhance grid reliability. Replacing dumps with WtE plants could also avoid millions of tons of CO₂ equivalent emissions, enable carbon credits, and create jobs. Despite institutional, technical, and social barriers, the study suggests guidelines for pilot projects, public policy integration, regulatory incentives, and the inclusion of



waste pickers. Therefore, energy recovery from waste emerges as a sustainable alternative to support energy transition and sanitation in Brazil's semi-arid Northeast.

Keywords - Curtailment, Municipal Solid Waste, Sustainable Energy, Waste-to-Energy.

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil enfrenta um duplo desafio estrutural com impactos significativos sobre a sustentabilidade e a eficiência do uso de recursos: de um lado, a gestão ineficaz dos resíduos sólidos urbanos (RSU), caracterizada pela persistência de lixões a céu aberto; de outro, a crescente incidência de *curtailment*, o descarte de geração renovável, especialmente solar e eólica, em função da intermitência e da limitada flexibilidade da infraestrutura elétrica regional.

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR) indicam que, em 2022, o país produziu mais de 81 milhões de toneladas de RSU, sendo que aproximadamente 39% foram descartados em locais ambientalmente inadequados, como lixões e aterros controlados. No Nordeste, essa situação é ainda mais crítica, com mais de 1.500 lixões em atividade, agravando problemas como a emissão descontrolada de metano, a contaminação do solo e da água, e os riscos à saúde pública (Alfaia; Costa; Campos, 2017).

Paralelamente, a região se destaca nacionalmente na geração de energia renovável, sobretudo por meio de fontes solar e eólica. No entanto, a incapacidade da rede elétrica em absorver toda a energia gerada tem resultado em elevados índices de *curtailment*. Em 2024, estima-se que 75% das interrupções no Sistema Interligado Nacional (SIN) tenham ocorrido devido ao excesso momentâneo de oferta não despachável (Movimento Econômico, 2025). A ausência de fontes de geração complementar e a rigidez do sistema agravam esse cenário, comprometendo a segurança e a eficiência energética.

Diante desse contexto, as tecnologias de valorização energética de resíduos (Waste-to-Energy – WtE) despontam como uma alternativa estratégica para o semiárido nordestino, ao aliar soluções para os problemas de saneamento e energia. Tecnologias como incineração controlada, digestão anaeróbica e gaseificação permitem converter RSU em energia elétrica firme e previsível, oferecendo uma resposta complementar à intermitência das fontes renováveis e promovendo a eliminação gradual dos lixões (Lino; Ismail, 2015; Nordi *et al.*, 2017).

Estudos nacionais indicam que a incineração de RSU poderia gerar até 2.900 GWh/mês, enquanto a digestão da fração orgânica seria capaz de produzir cerca de 221 GWh/mês (Lino; Ismail, 2015). Além dos ganhos energéticos, essas tecnologias reduzem significativamente as emissões de gases de efeito estufa associadas à decomposição anaeróbica em lixões. Modelagens recentes também sugerem que a inserção planejada de usinas WtE pode atenuar o *curtailment* de renováveis ao fornecer geração firme nos períodos de baixa produção solar ou eólica (Jimenez *et al.*, 2017; Campbello *et al.*, 2024).

Dessa forma, este artigo tem como objetivo estimar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos no Nordeste brasileiro, avaliar a contribuição das usinas WtE na mitigação do *curtailment* de renováveis e propor um modelo integrado e replicável de gestão de resíduos e geração elétrica. A pesquisa adota uma abordagem exploratória, com base em dados públicos e modelagem de cenários, visando fornecer subsídios técnicos e estratégicos para o desenvolvimento de políticas públicas sustentáveis e integradas entre os setores de energia, saneamento e meio ambiente.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão de literatura sobre tecnologias WtE e experiências nacionais e internacionais; a Seção 3 descreve a metodologia adotada; a Seção 4 discute os principais resultados e cenários simulados; por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e recomendações para políticas públicas integradas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU), por meio de tecnologias Waste-to-

Energy (WtE), tem se consolidado internacionalmente como uma estratégia eficiente para mitigar os impactos ambientais da disposição inadequada de resíduos e, simultaneamente, contribuir para a segurança e diversificação da matriz elétrica. As principais rotas tecnológicas incluem incineração controlada, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbica, cada uma com características técnicas e ambientais específicas.

Segundo Abbasi (2018), a incineração permanece como a tecnologia mais amplamente empregada em contextos urbanos, sobretudo em países com elevada densidade populacional e escassez de áreas disponíveis para aterros. No Brasil, embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305/2010) estimule o uso de tecnologias limpas e a recuperação energética, a aplicação prática das tecnologias WtE ainda é incipiente, especialmente fora dos grandes centros urbanos (Alfaia; Costa; Campos, 2017).

Organizações como a ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos – têm promovido avanços institucionais ao articular políticas públicas voltadas à consolidação dessas tecnologias no país. Tisi *et al.* (2023) destacam que a adaptação de modelos sustentáveis de WtE à realidade brasileira demanda uma atuação integrada entre a gestão pública, consórcios intermunicipais e o fortalecimento da indústria nacional de tecnologias limpas. A atuação da ABREN/WtERT tem sido essencial para o desenvolvimento de diretrizes que visam ao fechamento de lixões e à inserção de energia firme proveniente de RSU no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Estudos de caso nacionais também demonstram a viabilidade técnica e econômica dessas tecnologias. Dos Santos *et al.* (2019), por exemplo, comparam três modelos distintos de conversão energética de RSU: incineração com geração elétrica, digestão anaeróbica com uso de biogás em motores térmicos e aproveitamento energético do metano em aterros sanitários. Os resultados indicam que, sob determinadas condições urbanas e logísticas, a incineração com recuperação de energia oferece a melhor relação custo-benefício e maior estabilidade para o sistema elétrico.

Botan *et al.* (2024) contribuem com a discussão ao analisar a viabilidade de sistemas híbridos que combinam energia solar fotovoltaica com usinas WtE em pequenos municípios. Os autores demonstram que essa integração reduz os impactos da intermitência solar, aumentando a confiabilidade no suprimento energético local.

No cenário internacional, a abordagem integrada entre resíduos e energia tem sido implementada com sucesso em diversos países. Mikulčić *et al.* (2021) destacam a importância de sistemas interligados de energia, água e resíduos como elementos centrais na transição energética. Breyer *et al.* (2018) reforçam que o crescimento da participação de fontes intermitentes, como solar e eólica, exige a ampliação de fontes despacháveis para evitar perdas por *curtailment*, uma limitação cada vez mais presente no sistema elétrico brasileiro.

No contexto do Nordeste, onde predominam fontes renováveis intermitentes, o *curtailment* representa um obstáculo à plena integração da geração eólica e solar. Para Barbosa *et al.* (2016), cenários que incorporam a bioenergia e tecnologias WtE ao planejamento energético regional são fundamentais para ampliar a flexibilidade operativa do sistema e minimizar perdas por excesso momentâneo de geração.

Dessa forma, a literatura convergente reforça que a valorização energética dos RSUs representa não apenas uma solução para o passivo ambiental urbano, mas também um vetor estratégico para o equilíbrio e a resiliência do sistema elétrico nacional, com especial aplicabilidade em regiões com forte sazonalidade e intermitência, como o semiárido nordestino.

2.1 TECNOLOGIAS DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA

As principais tecnologias de conversão de RSU em energia elétrica apresentam diferentes graus de maturidade, eficiência e aplicabilidade, conforme demonstrado a seguir:

- **Incineração controlada:** processo de combustão em altas temperaturas com recuperação de energia térmica, usualmente convertida em eletricidade por meio de ciclo a vapor. É a tecnologia mais amplamente utilizada nos países desenvolvidos, com eficiência térmica média

de 25% (Jimenez *et al.*, 2017).

- **Gaseificação:** transformação térmica de resíduos em gás de síntese (syngas), que pode ser utilizado em turbinas ou motores. Apresenta maior eficiência energética em unidades de pequeno porte (até 30%) e menor emissão de poluentes (Jimenez; Bereche; Nebra, 2019).
- **Digestão anaeróbica:** processo biológico que converte a fração orgânica dos resíduos em biogás (predominantemente metano), com uso em geradores ou posterior purificação para injeção na rede de gás. É ideal para resíduos úmidos e de origem orgânica (Lino; Ismail, 2012).
- **Pirólise:** decomposição térmica em ausência de oxigênio, com geração de carvão (biochar), óleo pirolítico e gases combustíveis. Embora promissora, ainda encontra-se em fase experimental no Brasil.

A escolha da tecnologia adequada depende da composição local dos resíduos e da existência de políticas de segregação e coleta seletiva, elementos fundamentais para garantir a eficiência dos processos (Nordi *et al.*, 2017).

2.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RSUS NO BRASIL

Estudos recentes demonstram o potencial expressivo dos RSUs como fonte de energia no Brasil. Lino e Ismail (2015) estimam que a incineração poderia gerar até 2.900 GWh/mês, enquanto a biodigestão da fração orgânica adicionaria cerca de 221 GWh/mês, volumes suficientes para abastecer milhões de residências, com fornecimento contínuo e despachável.

No contexto nordestino, o alto volume de resíduos não aproveitados e o crescimento das áreas urbanas reforçam o potencial de transformação de passivos ambientais em ativos energéticos. Substituir lixões por aterros controlados com recuperação de biogás já poderia representar uma geração média superior a 40 MW no país (Barros; Filho; Silva, 2014).

2.3 COMPLEMENTARIDADE COM FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES

As usinas WtE configuram-se como fontes de energia de base (base-load), com potencial para atuar como lastro operacional frente à variabilidade das fontes solar e eólica. No Nordeste, onde o *curtailment* é crescente, a inserção dessas tecnologias pode atenuar perdas por excesso de oferta não aproveitada, contribuindo para maior estabilidade e previsibilidade do sistema (Campbello *et al.*, 2024).

Modelos híbridos que integram RSU com geração solar fotovoltaica têm demonstrado viabilidade técnica e econômica, sobretudo em municípios de pequeno porte, considerando-se também os benefícios indiretos como créditos de carbono e receitas complementares com a reciclagem (Padilha; Mesquita, 2022; Maier; Oliveira, 2014).

2.4 BARREIRAS E DESAFIOS NO CONTEXTO BRASILEIRO

Apesar do potencial técnico e ambiental, a implementação de projetos WtE no Brasil enfrenta diversas barreiras:

- Ausência de marcos regulatórios específicos e incentivos econômicos para valorização energética;
- Baixa adesão à coleta seletiva e à segregação de resíduos nas;
- Resistência social, especialmente em relação às usinas de incineração, motivada por percepções de riscos à saúde e ao meio ambiente;
- Elevado custo inicial de implantação, agravado pela ausência de subsídios ou parcerias público-privadas.

Superar essas barreiras exige articulação intergovernamental, educação ambiental contínua e o estímulo a consórcios municipais. Mecanismos de financiamento verde e políticas públicas integradas são



caminhos promissores para a consolidação da valorização energética como solução efetiva e replicável (Oliveira; Henriques; Pereira, 2010).

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem exploratória e descritiva, fundamentada na análise documental e na modelagem teórica, com o objetivo de estimar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Nordeste brasileiro e simular sua contribuição na mitigação do *curtailment* de fontes renováveis no sistema elétrico nacional. A pesquisa foi conduzida exclusivamente com dados secundários, provenientes de fontes públicas e confiáveis, sem envolvimento de coleta primária ou experimentação laboratorial.

A primeira etapa consistiu no levantamento e sistematização de dados sobre a geração, composição e destinação dos RSU nos nove estados da região Nordeste. Para isso, foram utilizadas bases como o Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos (SINIR), o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023 (ABREMA, 2024) e dados demográficos e de urbanização do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A estimativa da geração de resíduos foi baseada em valores per capita variando entre 0,9 a 1,1 kg por habitante ao dia, ajustados conforme o perfil urbano de cada estado. Foram sistematizadas variáveis como geração total anual de resíduos, composição gravimétrica média (frações orgânica, reciclável e rejeito) e taxas de destinação adequada (aterros sanitários) e inadequada (lixões ou aterros controlados).

Com base nesses dados, estimou-se o potencial energético dos RSU, considerando três rotas tecnológicas consolidadas para conversão energética: incineração controlada com recuperação térmica via ciclo a vapor, digestão anaeróbica da fração orgânica com geração de biogás e gaseificação de resíduos heterogêneos de baixo valor reciclável. Para cada tecnologia, aplicaram-se coeficientes médios de eficiência energética retirados da literatura especializada (Lino & Ismail, 2015; Jimenez *et al.*, 2017; Dos Santos *et al.*, 2019). As estimativas variaram conforme a fração de resíduos aplicável e a eficiência média de cada processo, considerando intervalos entre 0,1 e 0,7 MWh por tonelada, a depender da tecnologia empregada.

Na sequência, foi realizada uma simulação conceitual do impacto da energia proveniente de usinas WtE (Waste-to-Energy) no sistema elétrico nordestino, tomando como referência dados da Operadora Nacional do Sistema Elétrico (ONS) sobre eventos de *curtailment* entre os anos de 2022 e 2024, com destaque para os estados com alta penetração de fontes renováveis, como Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte. Foram elaborados cenários simplificados por meio de planilhas e ferramentas computacionais, simulando a inserção gradual de energia firme e despachável proveniente de RSU. Os cenários avaliados incluíram substituição parcial da geração térmica fóssil, redução do *curtailment* em momentos de excedente renovável e suporte à carga noturna. Esses cenários foram classificados em baixa, média e alta penetração de WtE, utilizando dados de base da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e de relatórios técnicos do setor.

Adicionalmente, foi realizada uma avaliação ambiental comparativa, com estimativas simplificadas dos benefícios da substituição de lixões por centrais WtE. Seguindo diretrizes do IPCC e estudos recentes (Madden *et al.*, 2023), calcularam-se as emissões médias de metano (CH₄) em lixões, estimadas em aproximadamente 1,2 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de RSU, e as emissões evitadas por processos controlados de conversão energética. Considerou-se também o potencial de geração de créditos de carbono pela eliminação da degradação anaeróbica e substituição de térmicas fósseis. Os impactos socioeconômicos foram igualmente considerados, como a recuperação de áreas degradadas, a geração de empregos diretos e indiretos, e a possibilidade de integração de catadores em processos de triagem prévia.

Por fim, o modelo teórico desenvolvido se baseou em algumas premissas fundamentais: implantação gradual de usinas WtE com capacidade variando entre 5 MW e 30 MW, distribuídas de forma regionalizada; uso de tecnologias consolidadas no cenário internacional; viabilidade técnica e socioeconômica considerando médias nacionais de logística e gestão consorciada; e a ausência de incentivos financeiros ou reformas regulatórias no curto prazo.

Essa metodologia visa fornecer subsídios técnicos e quantitativos que orientem políticas públicas voltadas à integração entre gestão de resíduos e planejamento energético, promovendo um modelo de desenvolvimento sustentável e resiliente para o contexto nordestino.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia adotada, foram elaboradas estimativas do potencial de geração elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Nordeste brasileiro, com implicações diretas para a gestão de resíduos, a matriz elétrica regional e os impactos ambientais associados. Os resultados obtidos são organizados em quatro eixos principais: potencial energético, impactos na rede elétrica, benefícios ambientais e barreiras à implementação.

4.1 POTENCIAL ENERGÉTICO ESTIMADO DOS RSUS NO NORDESTE

Com base nos dados populacionais mais recentes do IBGE (2024) e na média de geração de 1 kg de RSU por habitante/dia, estima-se que a região Nordeste produza cerca de 60 mil toneladas de resíduos por dia, o que corresponde a aproximadamente 21,9 milhões de toneladas por ano. Considerando uma fração valorizável de 55%, compostos orgânicos e resíduos secos passíveis de conversão energética, o volume útil para valorização seria de cerca de 12 milhões de toneladas anuais.

Com um poder calorífico inferior (PCI) médio de 8.000 kJ/kg, o potencial energético bruto dos RSUs nordestinos alcança cerca de 100.000 GWh/ano, o que, considerando um rendimento médio de conversão elétrica de 30%, resulta em aproximadamente 30.000 GWh/ano de energia útil. Este valor representa cerca de 14% do consumo elétrico anual da região, evidenciando o caráter estratégico da valorização energética dos resíduos.

A Tabela 1 apresenta uma estimativa simplificada da geração energética por estado, com base nas tecnologias de incineração e digestão anaeróbica:

TABELA 1
POTENCIAL ESTIMADO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSUs NO NORDESTE (VALORES APROXIMADOS)

Estado	RSU/ANO (MIL T)	Energia por Incineração (GWh/ano)	Energia por Digestão Anaeróbica (GWh/ano)	Energia útil total (GWh/ano)
Bahia	5.000	2.000	400	~6.900
Pernambuco	2.400	1.250	250	~3.300
Ceará	2.200	1.150	230	~3.100
Maranhão	2.000	900	180	~2.800
Rio Grande do Norte	1.600	650	130	~2.200
Piauí	1.100	550	110	—
Outros (PB, SE, AL)	4.000	3.000	600	~5.700
Total estimado	19.000	9.500	1.900	~24.000 – 30.000

FONTE: ELABORAÇÃO PRÓPRIA COM BASE EM DADOS DO SINIR (2024), ABREMA (2023), IBGE (2024), E LITERATURA ESPECIALIZADA.

4.2 CONTRIBUIÇÃO À ESTABILIZAÇÃO DA REDE E REDUÇÃO DO CURTAILMENT

Dados da ONS (2023 - 2024) apontam que a região Nordeste registrou mais de 3.200 GWh/ano de *curtailment* de energia solar e eólica, resultado da limitada flexibilidade operacional da rede em horários de baixa demanda. Estados como Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte registram frequentemente o descarte de mais de 20% da geração renovável disponível, especialmente em períodos de excedente solar.

- A inserção progressiva de usinas WtE com operação despachável poderia mitigar esse cenário, contribuindo com:

- Redução entre 25% e 50% do *curtailment* anual, de acordo com simulações conceituais baseadas em séries históricas;
- Substituição parcial da geração térmica fóssil, mais onerosa e poluente;
- Aumento da segurança energética noturna, atuando como base-load complementar;
- Aproveitamento de biogás armazenado, otimizando a operação em horários críticos.

A energia proveniente dos RSUs, por apresentar perfil contínuo e despachável, reforça a complementaridade às fontes intermitentes, ampliando o espaço técnico para expansão da capacidade instalada de renováveis sem comprometer a estabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN).

4.3 BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

A conversão energética de RSU traz ganhos ambientais relevantes, especialmente pela substituição de lixões por centrais WtE com controle de emissões. Com base em coeficientes médios do IPCC e de Oliveira & Henriques (2010), estima-se que a eliminação de cerca de 70% dos lixões urbanos da região poderia:

- Evitar a emissão de até 15 milhões de toneladas de CO₂ equivalente/ano, principalmente pela eliminação do metano (CH₄) não capturado;
- Reduzir a contaminação do solo e das águas subterrâneas, associadas à disposição inadequada de resíduos;
- Viabilizar a recuperação de áreas degradadas, com uso de antigos lixões como sítios para plantas WtE;
- Gerar empregos diretos e indiretos nas cadeias de coleta, triagem, operação e manutenção, incluindo a inclusão social de catadores em modelos de triagem prévia.

Adicionalmente, a substituição de combustíveis fósseis por energia derivada de resíduos favorece a obtenção de créditos de carbono, contribuindo para viabilidade financeira dos projetos via fundos climáticos internacionais.

4.4 DISCUSSÃO CRÍTICA E BARREIRAS À IMPLEMENTAÇÃO

Apesar dos resultados promissores, a adoção de tecnologias WtE em larga escala no Brasil ainda enfrenta desafios institucionais, técnicos e sociais, entre os quais destacam-se:

- Elevado custo de implantação (CAPEX), especialmente em municípios de menor porte;
- Falta de articulação entre políticas públicas de resíduos e de energia, gerando lacunas no financiamento e na regulação;
- Resistência política e comunitária à incineração, por associações negativas com poluição atmosférica;
- Baixos índices de coleta seletiva, que afetam a qualidade do combustível derivado de resíduos (CDR).

Contudo, experiências internacionais demonstram que, com tecnologia consolidada, regulação adequada e participação social, projetos WtE são viáveis mesmo em contextos emergentes. O Nordeste brasileiro, por sua alta geração de RSUs, concentração urbana e abundância de fontes renováveis, apresenta condições propícias para projetos-piloto regionais ou consorciados, especialmente em cidades médias (100 a 500 mil habitantes) com possibilidade de modelos de PPPs ou concessões intermunicipais.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou que a valorização energética de resíduos sólidos urbanos (RSU) por meio de tecnologias Waste-to-Energy (WtE) representa uma alternativa estratégica e viável para enfrentar dois dos principais desafios da região Nordeste: a gestão inadequada de resíduos e a instabilidade do sistema elétrico



regional associada ao *curtailment* de fontes renováveis, como a solar e a eólica.

As estimativas apontam que o volume de RSUs atualmente gerado nos centros urbanos nordestinos poderia sustentar a produção de até 30 TWh/ano (ou 30.000 GWh/ano) de energia elétrica, o que corresponde a aproximadamente 14% do consumo anual da região. Por se tratar de uma fonte despachável e previsível, essa energia possui alto valor estratégico para complementar as fontes intermitentes, mitigar perdas por *curtailment* e aumentar a confiabilidade do sistema elétrico.

Do ponto de vista ambiental, a substituição de lixões por usinas WtE permitiria evitar a emissão de milhões de toneladas anuais de CO₂ equivalente, sobretudo devido ao controle do metano — um potente gás de efeito estufa. Isso abre espaço para projetos de compensação de carbono e pode atrair investimentos verdes nacionais e internacionais.

No campo socioeconômico, a adoção de tecnologias de valorização energética pode fomentar a geração de empregos qualificados, estimular cadeias produtivas locais, valorizar a economia circular e fortalecer políticas públicas integradas nas áreas de saneamento, energia e meio ambiente.

Entretanto, a implementação desse modelo ainda enfrenta barreiras significativas, como a fragmentação entre os setores de saneamento, energia e meio ambiente, além da resistência social ao uso de tecnologias térmicas. Para superar esses desafios, é fundamental promover a integração intersetorial, disseminar informações técnicas confiáveis e construir marcos regulatórios favoráveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Sergipe Parque Tecnológico (SergipeTec) e à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e da Ciência e Tecnologia (SEDETEC) pelo apoio concedido durante o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERENCES

- ABBASI, S. A. The myth and the reality of energy recovery from municipal solid waste. **Energy, Sustainability and Society**, [S.l.], v. 8, n. 15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0175-y>
- ALFAIA, R.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management & Research**, v. 35, p. 1195-1209, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17735375>
- ABREMA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2023. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 02 ago. 2025.
- BARBOSA, L. S. N. S. et al. Hydropower and power-to-gas storage options: The Brazilian energy system case. **Energy Procedia**, [S.l.], v. 106, p. 290–298, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.101
- BARROS, R.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150-164, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.028>
- BOTAN, M. C. C. de O. et al. Technical and economic feasibility of hybrid power generation from urban solid waste associated with solar energy. **Renewable Energy**, [S.l.], 2024. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121388>



BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 03 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). Brasília: MMA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/residuos-solidos/planares>. Acesso em: 03 ago. 2025.

BREYER, C. et al. Solar photovoltaics demand for the global energy transition. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, [S.l.], v. 26, n. 8, p. 585–598, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.2950>

CAMPELLO, L. D. et al. Technical and economic feasibility of hybrid power generation from urban solid waste associated with solar energy. **Renewable Energy**, Vol. 235, 2024, 121388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121388>

DOS SANTOS, R. E. et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 231, p. 198–206, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.10.015>

FERREIRA, A. F. et al. Waste-to-Energy no Brasil: potencial energético e entraves à implementação. **Revista Brasileira de Energia**, v. 30, n. 2, p. 71–89, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.37774/rbe.v30n2.2024>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Projeções da População do Brasil e Unidades da Federação: 2000-2070. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html>. Acesso em: 02 ago. 2025.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Capacity Statistics 2024. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>. Acesso em: 03 ago. 2025.

JIMENEZ, A. C. M.; BERECHÉ, R. P.; NEBRA, S. Three municipal solid waste gasification technologies analysis for electrical energy generation in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 37, p. 631-642, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X19841126>

JIMENEZ, A. C. M. et al. Evaluation of two different alternatives of energy recovery from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 35, p. 1137-1148, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17728123>

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. Analysis of the potential of municipal solid waste in Brazil. **Environmental Development**, v. 4, p. 105-113, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2012.08.005>

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. Municipal Solid Waste as Sustainable Energy Source for Brazil. **International Journal of Energy and Power Engineering**, v. 4, p. 197, 2015. DOI: 10.11648/j.ijepe.20150404.12

MAIER, S.; OLIVEIRA, L. B. Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 484-498, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.025>



MADDEN, B. et al. Emissions associated with the management of household organic waste, from collection to recovery and disposal: A bottom-up approach. **Cleaner Waste Systems**, [S.l.], v. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100111>

MIKULČIĆ, H. et al. Energy transition and the role of system integration of the energy, water and environmental systems. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 292, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126027>

MOVIMENTO ECONÔMICO. Nordeste concentrou 75% das interrupções de energia em 2024. 2025. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/economia/energia/2025/02/27/nordeste-concentrou-75-das-interrupcoes-de-energia-em-2024/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

NORDI, G. H. et al. Electricity production from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 35, p. 709-720, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X17705721>

OLIVEIRA, L. B.; HENRIQUES, R.; PEREIRA, A. Use of wastes as option for the mitigation of CO2 emissions in the Brazilian power sector. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 3247-3251, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.018>

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy Policy**, v. 31, p. 1481-1491, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00204-5)

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Boletim de Operação do SIN. Brasília. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/boletins-da-operacao>. Acesso em: 02 ago. 2025.

PADILHA, J. L.; MESQUITA, A. L. A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. **Energy Conversion and Management**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115743>

PRADO, K. S. et al. Municipal Solid Waste as Source of Renewable Energy in Brazil: Current Overview and Future Perspectives. **Revista Virtual de Química**, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210093>

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos Sólidos. Relatórios Nacionais 2020. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2025. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 02 ago. 2025.

TISI, Y. S. A. B. et al. Development of waste-to-energy through integrated sustainable waste management: the case of ABREN WtERT Brazil towards changing status quo in Brazil. **Waste Dispos. Sustain. Energy** 5, 295–308 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42768-022-00127-x>