



ANÁLISE DO POTENCIAL REGIONAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

ANALYSIS OF THE REGIONAL POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION THROUGH THE ENERGY RECOVERY METHOD OF MUNICIPAL SOLID WASTE

ANÁLISIS DEL POTENCIAL REGIONAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Vinícius de Jesus Almeida Lima ^{1*}, Luís Oscar Silva Martins ², & Camila Ferreira Escobar ³

¹²³ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências e Tecnologias em Energia e Sustentabilidade
^{1*} viniciuslima@aluno.ufrb.edu.br ² luisoscar@ufrb.edu.br ³ camila.escobar@ufrb.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 17.10.2024

Aprovado: 19.12.2024

Disponibilizado: 31.01.2025

PALAVRAS-CHAVE: Geração de energia; Resíduos sólidos urbanos (RSU); Incineração.

KEYWORDS: Energy generation; Municipal Solid Waste (MSW); Incineration.

PALABRAS CLAVE: Generación de energía; Residuos sólidos urbanos (RSU); Incineración.

*Autor Correspondente: Lima, V. J. A.

RESUMO

O crescimento populacional mundial tem gerado um aumento expressivo na demanda por energia elétrica e na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Uma alternativa sustentável adotada globalmente, mas ainda pouco explorada no Brasil, é a recuperação energética via tecnologia Waste-to-Energy (WTE). O WTE converte RSU em energia térmica ou elétrica por meio de processos térmicos, como incineração, reduzindo o volume de resíduos e mitigando impactos ambientais. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial regional de geração de energia a partir da incineração de RSU. Foram analisadas a composição gravimétrica e o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos para estimar a capacidade de geração de energia elétrica nas diferentes regiões brasileiras. Os resultados revelam que as regiões Sudeste e Nordeste se destacam pelo maior potencial, enquanto o aproveitamento nacional de RSU pode atender até 3,1% da demanda elétrica atual do Brasil, demonstrando a relevância dessa solução para diversificar a matriz energética e reduzir os impactos ambientais associados aos resíduos.

ABSTRACT

Global population growth has generated a significant increase in the demand for electricity and in the production of Municipal Solid Waste (MSW). A sustainable alternative adopted globally, but still little explored in Brazil, is energy

recovery via Waste-to-Energy (WTE) technology. WTE converts MSW into thermal or electrical energy through thermal processes, such as incineration, reducing the volume of waste and mitigating environmental impacts. In view of this, this study aimed to evaluate the regional potential for energy generation from MSW incineration. The gravimetric composition and Lower Calorific Value (LCV) of the waste were analyzed to estimate the electricity generation capacity in the different Brazilian regions. The results reveal that the Southeast and Northeast regions stand out for their greatest potential, while the national use of MSW can meet up to 3.1% of Brazil's current electricity demand, demonstrating the relevance of this solution to diversify the energy matrix and reduce the environmental impacts associated with waste.

RESUMEN

El crecimiento de la población mundial ha generado un aumento significativo en la demanda de electricidad y en la producción de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Una alternativa sostenible adoptada globalmente, pero aún poco explorada en Brasil, es la recuperación de energía mediante la tecnología Waste-to-Energy (WTE). La WTE convierte los RSU en energía térmica o eléctrica a través de procesos térmicos, como la incineración, reduciendo el volumen de residuos y mitigando los impactos ambientales. Por lo tanto, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el potencial regional de generación de energía a partir de la incineración de RSU. Se analizaron la composición gravimétrica y el Poder Calorífico Inferior (PCI) de los residuos para estimar la capacidad de generación de electricidad en diferentes regiones brasileñas. Los resultados revelan que las regiones Sudeste y Nordeste se destacan por su mayor potencial, mientras que el uso nacional de RSU puede atender hasta el 3,1% de la demanda eléctrica actual de Brasil, demostrando la relevancia de esta solución para diversificar la matriz energética y reducir los impactos ambientales. asociado con los residuos.

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional nas últimas décadas resultou em uma população mundial de 8 bilhões de pessoas em 2022, conforme destacado no relatório Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), desencadeando duas demandas de impacto global: a geração de energia elétrica e o manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), a demanda global de eletricidade crescerá cerca de 3,3% em 2024, valor superior ao registrado no período de 2015-2019 que foi de 2,4%, enquanto a geração mundial de RSU, de acordo com a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA, 2024), a geração mundial de RSU atingiu 2,1 bilhões em 2020, e projeta-se que esse número cresça para aproximadamente 3,8 bilhões em 2050.

No Brasil, de acordo com os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a geração de energia elétrica foi de 677,1 GWh em 2022, valor 3% acima de 2021, mostrando um alto valor de consumo energético. Da mesma forma, a geração de RSU, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2023), foi de aproximadamente 77,1 milhões de toneladas em 2022, valor que ultrapassa 211 mil toneladas de resíduos geradas por dia, ou cerca de 380 kg/habitante/ano.

Outra semelhança entre a geração de energia e o manejo de RSU é que ambas contribuem significativamente para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2024), o aumento contínuo na concentração desses gases intensifica os riscos climáticos, agravando fenômenos como eventos extremos, elevação do nível do mar e acidificação dos oceanos. Segundo Clima et al. (2022), as emissões dos setores de Energia e de Resíduos em 2020 foram de 389,48 e 69,63 milhões de toneladas de CO_2eq , respectivamente, representando 23,2% e 4,2% do total que foi de 1.675,76 milhões de toneladas de CO_2eq . Diante desses cenários, tanto a geração de energia elétrica quanto a gestão adequada dos RSU têm recebido crescente atenção como estratégias essenciais para atender à demanda populacional sem comprometer a sustentabilidade ambiental, tendo como objetivo a minimização das emissões de GEE.

Nesse contexto, emerge como alternativa viável o método de reciclagem energética. A recuperação energética de resíduos sólidos transforma a energia contida nos resíduos por meio de diversas tecnologias, após a remoção da fração reciclável. Entre as principais tecnologias, destacam-se: o coprocessamento em fornos de clínquer, que queima o resíduo a 1.450°C para gerar energia e matéria-prima para cimento; a pirólise e gaseificação, que produzem gás de síntese (syngas) a partir de reações térmicas com pouco oxigênio, utilizado para gerar energia ou produzir metano e biocombustíveis; a incineração, que queima o resíduo a 850°C para gerar energia; e a digestão anaeróbia, que gera biogás a partir da decomposição de resíduos orgânicos, adequado para fração molhada e resíduos alimentares (CNI, 2019).

A tecnologia mais comum na recuperação energética é a queima de RSU através do Waste-to Energy (WTE). O WTE abrange tecnologias que tratam resíduos para recuperar energia na forma de calor, eletricidade ou combustíveis alternativos, como biogás. Isso inclui desde biodigestores domésticos que produzem gás de cozinha a partir de resíduos orgânicos, até a captação de Metano em aterros sanitários e o tratamento térmico de resíduos em plantas industriais (Giz, 2017). No Brasil, a primeira Unidade de Recuperação Energética (URE) está prevista para entrar em operação em 2025. Nessa unidade, a queima de RSU será transformada em energia térmica e, posteriormente, convertida em energia elétrica, com uma capacidade instalada de 20 MW.

Desse modo, o objetivo principal deste trabalho é estimar o potencial regional de produção de energia elétrica a partir de RSU. Para isso, são definidos objetivos específicos: compreender o cenário atual dos RSU em âmbito nacional e regional, analisar o processo de geração de energia por meio da reciclagem energética, estimar a quantidade de RSU por tipo através da gravimetria e calcular o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na pesquisa bibliográfica e quantitativa, estruturada em cinco etapas. Na primeira etapa, foi realizada uma análise do cenário atual e das principais tecnologias de recuperação energética RSU, como o coprocessamento em fornos de clínquer, pirólise e gaseificação, incineração e digestão anaeróbia, que convertem resíduos em energia ou biocombustíveis (CNI, 2019). Na segunda etapa, foi realizada uma pesquisa para obter os principais dados sobre a geração de RSU por região e a composição gravimétrica desses resíduos. As principais fontes de dados foram a ABRELPE (2020), que forneceu a composição gravimétrica dos RSU, e o SNIS (2023), que apresentou a quantidade de RSU coletado no país e nas regiões. Na terceira etapa, foram analisados os dados referentes à geração e à composição gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), permitindo estimar a quantidade de RSU por tipo de material em âmbito regional. As principais equações utilizadas nessa etapa incluem: a Equação 1, desenvolvida pela Fundação Nacional de Resíduos Sólidos Municipais do Japão (1991) e adaptada por Chang et al. (2007), empregada para calcular o Poder Calorífico Inferior (PCI); a Equação 2, que realiza uma multiplicação simples para determinar a quantidade de RSU para cada tipo de material; e as Equações 3 e 4, juntamente com os parâmetros apresentados na Tabela 1, utilizadas para estimar o potencial de conversão energética e a potência elétrica, conforme descrito no estudo de Silva et al. (2014).

$$PCI = [(88.2 \cdot P_{PL}) + (40.5 \cdot (P_{FO} + P_{PA}))] \cdot \left(\frac{100 - W}{W}\right) - 6 \cdot W \quad (1)$$

Onde, P_{pl} é o percentual de plásticos na composição dos RSU, P_{fo} é o percentual de matéria orgânica, P_{pa} é o percentual de papel e W é o teor de umidade dos RSU em base úmida. Para converter o PCI de kcal/kg para MJ/kg, usa-se o fator de conversão $1 \text{ kcal} = 0.004184 \text{ MJ}$. Os valores do teor de umidade mencionados na literatura variam amplamente devido ao número de variáveis que influenciam esse parâmetro (Alcântara, 2007). Segundo Bidone e Povinelli (1999), a faixa de umidade dos resíduos brasileiros varia de 40% a 60%. Diante disso, utilizou-se neste trabalho a faixa intermediária de 50%. A Equação 2, utilizada para estimar a quantidade de RSU por material, é apresentada da seguinte forma:

$$RSU_{material}(t) = RSU_{total}(t) \cdot Gravimetria_{material}(\%) \quad (2)$$

Onde, RSU_{total} representa a quantidade total de RSU coletado e a $Gravimetria_{material}$ diz respeito ao percentual gravimétrico de cada material. A Equação 3, define o potencial de conversão energética dos RSU (E_R):

$$E_R = f_c \cdot PCI \quad (3)$$

Onde, f_c é um fator que representa as perdas de energia nas cinzas e por radiação e o PCI é o poder calorífico inferior dos RSU, medido em MJ/kg. A potência elétrica (P_{inc}) pode ser calculada pela Equação 4:

$$P_{inc} = \eta_t \cdot \eta_g \cdot f_u \cdot E_R \cdot M_i(t) \quad (4)$$

Onde, η_t é a eficiência da máquina térmica, η_g é a eficiência do gerador elétrico, f_u é fator de utilização do gerador e $M_i(t)$ é a taxa de incineração de RSU em kg/s. Os valores dos parâmetros utilizados estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para a geração de energia

Parâmetros	Valores
η_t	0,33
η_g	0,98
f_u	0,90
f_c	0,97

Fonte: Silva et al. (2014).

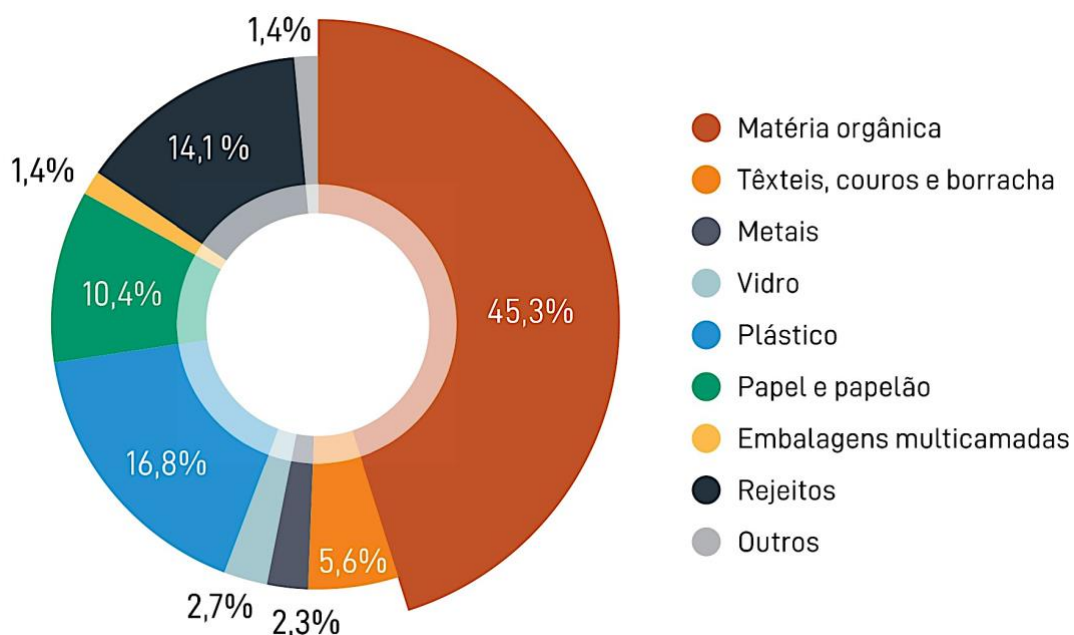
Na quarta etapa, foi estudado o potencial de uso de RSU para a geração de energia, a partir dos resultados das equações mencionadas e os parâmetros fornecidos, para avaliar a viabilidade de aproveitamento energético dos resíduos por região. Na quinta e última etapa, foi feita uma comparação entre a geração de energia elétrica por região a partir dos dados da EPE (2023) e a demanda que seria suprida utilizando o RSU como fonte de energia. Essa comparação permitiu avaliar o potencial de cada região para atender sua demanda energética a partir dos RSU.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Composição Gravimétrica e Poder Calorífico dos RSU

Para a composição gravimétrica dos RSU foi usada como base o estudo desenvolvido pela Abrelpe (2020), onde foi elaborada a gravimetria do RSU nacional. Segundo a Abrelpe (2020), os valores encontrados foram determinados a partir de uma análise detalhada da geração total de RSU nos municípios, segmentada por faixa de renda. Para calcular os valores percentuais da composição, o estudo utilizou de média ponderada, levando em consideração as gravimetrias específicas de cada faixa de renda, além da população e da geração *per capita*. A partir da coleta e análise dos dados disponíveis, foi realizada uma comparação estatística entre as diferentes fontes, seguida de uma harmonização dos resultados, o que possibilitou a elaboração da composição gravimétrica final (Figura 1).

Figura 1. Gravimetria dos RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE (2020).

De acordo com a Abordagem Metodológica (2020) disponibilizada pela Abrelpe para determinar os valores da composição gravimétrica (Figura 1), a metodologia para chegar a gravimetria dos RSU foi dividida em três etapas principais:

- A **coleta** envolveu uma revisão detalhada de estudos realizados em escala municipal e intermunicipal, os estudos incluem artigos científicos, teses e relatórios técnicos e documentos governamentais, englobando dados acadêmicos, científicos e de serviços de limpeza urbana.
- A **triagem** definiu critérios mínimos para a seleção dos estudos, considerando a data de publicação (2010-2020), a amostragem de diferentes setores com variadas condições socioeconômicas, a descrição do processo de análise das amostras ou a referência a metodologias consolidadas (como NBR 10.007/04, IPT e CETESB), a divisão gravimétrica mínima (incluindo orgânicos, metais, vidro, plásticos, papel/papelão e rejeitos) e a definição de materiais como rejeitos. Foram analisados estudos de 186 municípios, representando aproximadamente 25% da população nacional (50.673.714 habitantes).
- O **tratamento de dados** envolveu a correção de dados para eliminar resíduos erroneamente incluídos na fração de rejeitos, recalculando a gravimetria com base nos novos totais. A gravimetria resultante foi então condensada e comparada em nível nacional, destacando a presença significativa de matéria orgânica, têxteis, couros, borrachas, metais, vidro, plásticos, papel/papelão e rejeitos. A estimativa da gravimetria nacional foi calculada com base na geração *per capita* de resíduos sólidos por faixa de renda, utilizando uma média ponderada da geração de resíduos e a composição gravimétrica para diferentes regiões e faixas de renda.

A composição gravimétrica do RSU foi então estimada a partir da média ponderada da geração de resíduos por faixa de renda dos municípios, com base na renda *per capita* de 2010, conforme o Censo Demográfico e o Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (PNUD; IPEA; FPJ, 2013). Os municípios foram classificados em quatro faixas de renda: baixa (até R\$ 255), média baixa (R\$ 255 a R\$ 510), média alta (R\$ 510 a R\$ 765) e alta (acima de R\$ 765), sendo a renda de 2010 adotada como parâmetro devido à previsão de queda do PIB para 2020. A distribuição dos municípios por faixa de renda mostra que a maioria se encontra nas faixas de renda alta (62%) e média alta (43%), com uma geração de resíduos *per capita* distinta para cada faixa. A partir desses dados, estimou-se a geração total de resíduos por faixa de renda, levando em conta as diferenças socioeconômicas no padrão de consumo e descarte (Abrelpe, 2020).

Para estimar o PCI dos RSU, são utilizados métodos matemáticos baseados na composição do lixo ou métodos experimentais que empregam bombas calorimétricas (Leme et al., 2020). Neste estudo, o valor do PCI será calculado utilizando a Equação 1, desenvolvida pela Fundação Nacional de Resíduos Sólidos Municipais do Japão (1991) e aplicada por Chang et al. (2007), com base nos dados de gravimetria dos RSU, conforme ilustrado na Figura 1, e aplicando a Equação 1, obteve-se um valor de PCI igual a 18,83 MJ/kg.

Geração de RSU Nacional e Regional

As quantidades de RSU coletado nas diferentes regiões do país foram estimadas pela Diagnóstico Temático do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos desenvolvido pelo Sistema nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023) e estão apresentadas na Tabela 2. O SNIS utilizou exclusivamente as declarações de massa total coletada de RSU fornecidas pelos 5.060 municípios que compuseram a amostra de 2022, representando 90,8% dos municípios brasileiros e 96,8% da população total. Com base nisso, foram contabilizadas 63,8 milhões de toneladas de RSU coletadas no Brasil em 2022, o que equivale a 174,9 mil toneladas por dia.

Tabela 2. RSU produzido por região

Região	Quantidade (t)	Parcela (%)
Sudeste	28.610.000	44,8
Nordeste	17.410.000	27,3
Sul	7.790.000	12,2
Norte	5.170.000	9,3
Centro-oeste	4.820.000	8,8
Brasil	63.800.000	100,0

Fonte: SNIS (2023).

Conforme previsto, a região Sudeste, por ser a mais populosa do Brasil, lidera a quantidade de RSU coletados, contribuindo com 28.610.000 toneladas, o que equivale a 44,8% do total nacional. Em seguida, a região Nordeste, a segunda mais populosa, é responsável por 17.410.000 toneladas de RSU, correspondendo a 27,3% do total. A região Sul gera 7.790.000 toneladas, representando 12,2%. Já as regiões Norte e Centro-Oeste, embora menos populosas, apresentam contribuições de 4.820.000 toneladas (9,3%) e 5.170.000 toneladas (8,8%), respectivamente. Esses números confirmam a correlação entre a densidade populacional das regiões e a quantidade de RSU coletada.

Com base nos dados de gravimetria do RSU, conforme ilustrado na Figura 1, e considerando a geração regional e nacional de RSU, representada na Tabela 2, foi possível realizar uma estimativa da quantidade de geração por tipo de resíduo, tanto em um contexto regional quanto nacional usando a Equação 2 (Tabela 3).

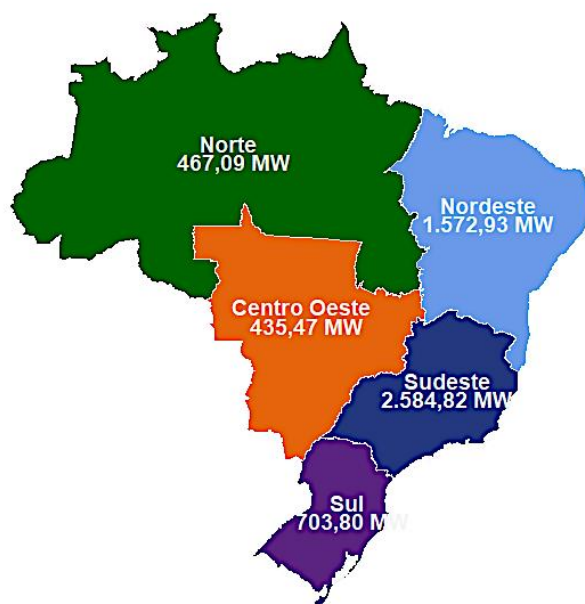
Tabela 3. Distribuição do RSU por região em toneladas

Material	Parcela (%)	Sudeste (t)	Nordeste (t)	Sul (t)	Norte (t)	Centro-Oeste (t)	Brasil (t)
Matéria orgânica	45,3	12.960.330	7.886.730	3.528.870	2.342.010	2.183.460	28.901.400
Plástico	16,8	4.806.480	2.924.880	1.308.720	868.560	809.760	10.718.400
Rejeitos	14,1	4.034.010	2.454.810	1.098.390	728.970	679.620	8.995.800
Papel e papelão	10,4	2.975.440	1.810.640	810.160	537.680	501.280	6.635.200
Têxteis, couros e borracha	5,6	1.602.160	974.960	436.240	289.520	269.920	3.572.800
Vidro	2,7	772.470	470.070	210.330	139.590	130.140	1.722.600
Metais	2,3	658.030	400.430	179.170	118.910	110.860	1.467.400
Embalagens multicamadas	1,4	400.540	243.740	109.060	72.380	67.480	893.200
Outros	1,4	400.540	243.740	109.060	72.380	67.480	893.200
Total	100	28.610.000	17.410.000	7.790.000	5.170.000	4.820.000	63.800.000

Fonte: ABRELPE (2020) e SNIS (2023). Dados organizados pelos autores.

ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA POR RSU

Para estimar a geração de energia proveniente dos RSU, utilizou-se como base a tecnologia WTE, cuja primeira usina no país tem previsão de operação para 2025, com uma capacidade instalada de 20 MW. As equações empregadas para os cálculos são as Equações 3 e 4 e foram extraídas do trabalho de Silva et al. (2014). A Equação 3 define o potencial de conversão energética dos RSU (E_R) e a Equação 4 a potência elétrica (P_{inc}). Para estimar o resultado da geração de energia a partir de RSU, foi considerada na variável $M_i(t)$ apenas a soma dos valores de matéria orgânica, plástico e papel/papelão, pois são os materiais incluídos na estimativa do valor do PCI (Figura 2).

Figura 2. Energia gerada por região através do uso do RSU como fonte de geração

Fonte: Autores.

A região Sudeste, com 2584,82 MW, concentra a maior parte da geração, representando 44,9% da produção total, seguido pela Nordeste, com 1572,93 MW (27,3%). A Sul figura em terceiro lugar com 703,80 MW (12,2%), enquanto o Norte e o Centro-Oeste registram as menores capacidades de geração, com 467,09 MW (8,1%) e 435,47 MW (7,6%), respectivamente. Esses dados evidenciam uma concentração significativa da geração de energia a partir de RSU nas regiões mais populosas, com a Sudeste liderando, enquanto as regiões de menor população, como Centro-Oeste e Norte, têm um desempenho mais modesto.

Para efeitos de comparação, conforme mencionado anteriormente, a geração de energia elétrica nacional em 2022 foi de 677.173,0 GWh (EPE, 2023). De acordo com a soma dos valores regionais presente na Figura 2, a geração nacional de energia pelo método WTE alcançou 5.764,11 MW, convertendo para Gigawatts-hora, esse valor seria de 20.750,81 GWh, sendo capaz de atender 3,1% da demanda nacional (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação entre a geração de energia elétrica no Brasil em 2022 e a estimativa de geração a partir de RSU

Região	Geração nacional (GWh)	Geração RSU (GWh)	Parcela (%)
Sudeste	175.128,00	9.305,34	5,3
Nordeste	148.902,00	5.662,56	3,8
Sul	144.399,00	2.533,68	1,8
Norte	137.163,00	1.681,53	1,2
Centro-Oeste	71.581,00	1.567,69	2,2
Brasil	677.173,00	20.750,81	3,1

Fonte: EPE (2023). Dados organizados pelos autores.

A geração de energia elétrica a partir de RSU no Brasil revela um potencial expressivo, com destaque para as regiões Sudeste (5,3%) e Nordeste (3,8%), que concentram a maior parte da produção energética proveniente dessa fonte. O Centro-Oeste, por sua vez, apresentou um desempenho acima das expectativas, sendo a região com menor coleta de RSU, mas ocupando a terceira posição em

representatividade na geração de energia com 2,2%. Apesar de as regiões Sul e Norte registrarem percentuais mais baixos, de 1,8% e 1,2%, respectivamente, a geração nacional alcança 3,1% da demanda total de energia elétrica. Esses dados reforçam a relevância dessa alternativa para a diversificação da matriz energética e elétrica brasileira.

É importante que o desenvolvimento da tecnologia de recuperação energética dos RSU seja acompanhado por regulamentações ambientais rigorosas e medidas que assegurem a eficiência e a sustentabilidade dos processos envolvidos. Nesse contexto, normas como a Portaria Interministerial MMA/MME 274/2019, que estabelece diretrizes para a recuperação energética de RSU, e a Resolução CONAMA n. 316/2002, que regulamenta os processos de tratamento térmico de resíduos com critérios de desempenho e limites de emissão, foram identificadas como marcos relevantes. Contudo, é necessidade de avaliar se essas regulamentações atendem integralmente às demandas do setor ou se requerem complementações para estimular a expansão e o aprimoramento dessa tecnologia no Brasil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir que a utilização de RSU por meio do método de recuperação energética, utilizando a tecnologia WTE para geração de energia elétrica, apresenta um potencial significativo para contribuir com a matriz energética brasileira. As regiões Sudeste e Nordeste, responsáveis por grande parte da geração de RSU, destacam-se pelo elevado potencial de aproveitamento energético, alcançando 5,3% e 3,8%, respectivamente, do total gerado a partir dessa fonte. A região Centro-Oeste, mesmo com menor coleta de RSU, surpreende como a terceira mais relevante na geração de energia a partir dessa tecnologia. No Norte e no Sul, os percentuais de aproveitamento são menores, 1,2% e 1,8%, respectivamente, mas ainda contribuem para que a geração nacional atinja 3,1% da demanda elétrica total. A implementação dessa tecnologia não só oferece uma solução sustentável para o aumento na geração de RSU, como também reduz emissões de gases de efeito estufa e diversifica a matriz energética nacional.

Contudo, para alcançar esses objetivos, é indispensável não apenas garantir a aplicação das regulamentações existentes, como a Portaria Interministerial MMA/MME 274/2019 e a Resolução CONAMA n. 316/2002, mas também avaliar sua eficácia diante das demandas específicas do setor. A consolidação dessa tecnologia dependerá de uma articulação entre avanços técnicos, regulamentação ambiental adequada e políticas públicas que assegurem sua eficiência e sustentabilidade.

É importante reconhecer as limitações deste estudo, especialmente por se tratar de uma análise teórica. Para uma avaliação mais precisa e aplicável, seria essencial conduzir pesquisas mais detalhadas nas regiões específicas de interesse. Além disso, a viabilidade da geração de eletricidade a partir do RSU depende fortemente da disponibilidade de aterros sanitários adequados. Embora a legislação brasileira, como a Lei 12.305, exija a existência de tais instalações, a realidade mostra que elas ainda são insuficientes frente ao volume significativo de RSU produzido no país. Esse fator limita diretamente a aplicabilidade prática desse método de geração de energia em larga escala no Brasil.

REFERÊNCIAS

- Abrelpe. (2020). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020: Abordagem metodológica*. ABRELPE. Recuperado de <https://www.abrema.org.br/panorama/>
- Abrelpe. (2020). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. ABRELPE. Recuperado de <https://www.abrema.org.br/panorama/>
- Abrema. (2023). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. ABRELPE. Recuperado de <https://www.abrema.org.br/panorama/>
- Alcântara, J. P. (2007). *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Pernambuco.
- Bidone, F. R. A., & Povinelli, J. (1999). Conceitos básicos de resíduos sólidos.
- Change, I. P. O. C. (2024). *Mudança do clima 2023: Relatório Síntese*. Um Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Recuperado de <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o->

[mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf](https://mcti.sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf)

Chang, Y., Huang, R., Wu, Y., & Weng, C. (2007). Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 85(4), 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.003>

Clima, C.-G. de C. do. (2022). *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.

CNI, C. (2019). *Recuperação energética de resíduos sólidos: Um guia para tomadores de decisão*. CNI.

EPE. (2023). *Balanço energético nacional 2023: Ano base 2022*. Empresa de Pesquisa Energética.

Fundação Nacional de Resíduos Sólidos Municipais do Japão. (1991). *Design guide for the facility of solid waste disposal*. Japan National Municipal Solid Waste Foundation.

Giz. (2017). *Opções em waste-to-energy na gestão de resíduos sólidos urbanos: Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

IEA. (2023). *Electricity market report–update 2023*. International Energy Agency. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-update-2023>

ISWA. (2024). *Global waste management outlook 2024: Beyond an age of waste, turning rubbish into a resource*. United Nations Environment Programme.

Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. (2010). *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências*. Diário Oficial da União.

Leme, M. M. V., Silva, E. A. da, & Gomes, R. A. M. (2020). *Incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil: Potencial energético e impactos ambientais*. Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica Distribuída (NEST), Universidade Federal de Itajubá.

Organização das Nações Unidas. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/pd/content/world-population-prospects-2022>

Portaria Interministerial MMA/MME N.º 274, de 27 de agosto de 2019. (2019). *Institui a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos e dá outras providências*. Diário Oficial da União.

Resolução Conama N.º 316, de 29 de outubro de 2002. (2002). *Disciplina os processos de tratamento térmico de resíduos sólidos e estabelece*

procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho. Diário Oficial da União.

Silva, E. R. da, Carvalho, R. A., & Lima, F. L. (2014). Estimativa do potencial de conversão energética de resíduos sólidos urbanos através do processo de incineração. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 18, 1-10.

Sistema Nacional De Informação Sobre Saneamento (SNIS). (2023). *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: SNIS, 2023*.