

Tecnologias *waste-to-energy*: uma avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Niterói

Waste-to-energy technologies: an assessment of the energy potential of urban solid waste from Niterói

Carolina Alonso Pereira¹, Alícia Carneiro Vasconcellos Lopes², Luciane Pimentel Costa Monteiro³, Larissa Monteiro⁴

RESUMO: Considerando o baixo reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), majoritariamente dispostos inadequadamente em lixões e aterros, alternativas sustentáveis estão sendo estudadas e implementadas para lidar com isso, como a tecnologia *waste-to-energy* (WTE), que se baseia no aproveitamento energético dos RSU. Assim, este artigo visa destacar a oportunidade de aproveitamento energético da fração não aproveitada de RSU em processos termoquímicos a partir da WTE, como a incineração. Especialmente, pretende-se demonstrar o potencial energético do RSU coletado do município de Niterói, através das análises gravimétricas elementar e imediata. Desta forma, a partir do Modelo de *Dulong* modificado, foi possível determinar o poder calorífico do RSU de Niterói e os cálculos realizados indicaram que ele se encontra compatível aos dados da literatura ao se manterem ao longo dos anos estudados (2019-2039) entre 6,0 e 12,0 MJ/kg. O potencial energético do RSU de Niterói para a projeção de 2039 foi 654.145,46 kWh/dia, com geração de energia de $6,45 \times 10^7$ kWh/ano, indicando possibilidades sustentáveis de aproveitamento dos RSU ao longo dos anos para geração de energia a partir da aplicação de tecnologias WTE de incineração.

Palavras-chave: Energia; Incineração; Sustentabilidade; Tecnologias limpas; Sustentabilidade.

ABSTRACT: Considering the low reuse of urban solid waste (MSW), mostly disposed of inadequately in landfills and dumps, sustainable alternatives are being studied and implemented to deal with this, such as waste-to-energy (WTE) technology, which is based on the energy recovery of MSW. Thus, this article aims to highlight the opportunity for energy recovery of the unused fraction of MSW in thermochemical processes from WTE, such as incineration. In particular, it is intended to demonstrate the energy potential of MSW collected from the municipality of Niterói, through elementary and immediate gravimetric analyses. Thus, from the modified *Dulong* Model, it was possible to determine the calorific value of MSW from Niterói and the calculations performed indicated that it is compatible with the literature data, remaining between 6.0 and 12.0 MJ/kg throughout the years studied (2019-2039). The energy potential of Niterói's MSW for the 2039 projection was 654,145.46 kWh/day, with energy generation of 6.45×10^7 kWh/year, indicating sustainable possibilities of using MSW over the years to generate energy from the application of WTE incineration technologies.

Keywords: Energy; Incineration; Sustainability; Clean technologies; Sustainability.

Autor correspondente: Luciane Pimentel Costa Monteiro

E-mail: lucianemonteiro@id.uff.br

Recebido em: 11/08/2024

Aceito em: 13/11/2024

¹ Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói (RJ), Brasil.

² Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ), Brasil.

³ Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Docente Titular do Departamento de Engenharia Química e Petróleo da UFF, Niterói (RJ), Brasil.

⁴ Mestra em Agronegócios pela Universidade de Brasília (UNB), Brasília (DF), Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A geração anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) poderá atingir cerca de 3,4 bilhões de toneladas em 2050, representando um aumento de 70% nos descartes quando comparado a 2016 (Kaza *et al.*, 2018). Apenas no Brasil, com uma geração *per capita* de 1,04 kg por dia, foram produzidos cerca de 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2022, sendo apenas 4% reaproveitados ou reciclados, e o restante majoritariamente encaminhado para aterros sanitários, e áreas inapropriadas, como aterros controlados e lixões, segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA (2024a).

Ainda, em 2022, 61% dos RSU foram dispostos adequadamente, enquanto 39% foram dispostos de forma inadequada, sendo encaminhados para aterros controlados e lixões, os quais deveriam ter sido extintos até agosto de 2024, segundo a Lei nº 14.026/2020, identificada como a Política Marco Legal do Saneamento (Brasil, 2020). Entretanto, ainda há 3000 lixões ativos no Brasil (ABREMA, 2024b) e está sendo discutido na Câmara dos Deputados um projeto de lei, de nº 1.323/2024, que prorroga em cinco anos o prazo para determinados municípios encerrarem os lixões e adotarem destinação adequada dos resíduos sólidos (Brasil, 2024).

Em relação à taxa de cobertura de coleta do RSU, segundo dados da ABREMA (2024a), a taxa nacional é de 93,04% em relação às taxas regionais. Observou-se, ainda, uma discrepância entre as taxas de cobertura de coleta do RSU pelas regiões do país, onde a Sudeste conta com 98,6%, a maior, e o Nordeste conta com 82,7%, a menor.

A disposição final de resíduos de uma forma ambientalmente adequada em aterros, e não adequada em lixões, é responsável pela emissão de gases como amônia, hidrogênio, gás sulfídrico, nitrogênio e hidrogênio, além dos principais gases de efeito estufa (GEE), metano e dióxido de carbono (Mar *et al.*, 2022). A permanência em lixões e a queima irregular do RSU gera cerca de 6 milhões de toneladas de GEE ao ano, o equivalente ao funcionamento de 3 milhões de carros movidos à gasolina anualmente (Flamini, 2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, no Brasil em 2010, possui a finalidade de realizar o gerenciamento e a gestão do resíduo sólido, definindo-se como destinação final ambientalmente adequada a “[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes [...]” (Brasil, 2010, p. 3).

Neste contexto, a PNRS, prioriza o aproveitamento energético frente à disposição de resíduos em aterros por meio de uma hierarquia de gestão consolidada mundialmente (Brasil, 2010). Portanto, Estados e municípios possuem o compromisso de desenvolverem planos elaborados seguindo os princípios estabelecidos na referida política. Dentre eles, sob o Decreto nº 13.669/2020 destaca-se o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, que traz medidas e propostas para o desenvolvimento da gestão integrada de resíduos sólidos no município.

Diante da necessidade da gestão e gerenciamento dos RSU e da redução das emissões dos GEE, a fim de minimizar os efeitos adversos sobre o clima, uma das alternativas empregadas atualmente é a aplicação de tecnologias *waste-to-energy* (WTE), convertendo o resíduo em energia a partir de processos termoquímicos ou bioquímicos (Alsabbagh, 2009).

As usinas WTE são plantas industriais com a finalidade de gerar energia elétrica a partir da queima do RSU ou seus gases, com grande atuação no mercado, existindo mais de 2700 unidades mundialmente, com capacidade de tratamento de 460 milhões de toneladas por ano (Havel, 2023). O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014) indica, ainda, que estas unidades são capazes de gerar oito vezes menos emissões de GEE quando comparadas à outras formas de destinação.

Assim, passando a ver os resíduos como um recurso potencial e não mais como um problema de descarte, as tecnologias WTE se alinham ao conceito de economia circular (EC), garantindo uma abordagem mais sustentável, proveitosa e eficiente para a gestão de resíduos (Traven, 2023). A EC associa o desenvolvimento econômico ao uso e recuperação mais eficiente dos recursos naturais, objetivando eliminar desperdícios, otimizar o uso de recursos e mitigar impactos ambientais, tais como poluição (Leitão *et al.*, 2024).

Na PNRS, várias diretrizes no âmbito do tratamento de RSU estão em consonância com os princípios da EC (Teixeira; Teixeira, 2022). Como, por exemplo, a PNRS, apresenta a recuperação da fração seca dos recicláveis, o que estimula as práticas de reciclagem e, conseqüentemente, o processo de coleta seletiva, o que pode garantir que somente rejeitos sejam descartados (ABRELPE, 2022).

Os diversos papéis que as tecnologias da WTE podem exercer na EC existem pois, apesar dos esforços para reciclagem intensa, ainda há um volume residual sem valor material ou comercial com algum poder calorífico e que pode ser usado para recuperar energia e substituir combustíveis fósseis, conforme defende o *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ, 2017).

De acordo com Kumar e Samadder (2017), um dos parâmetros mais importantes para medir o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos é o poder calorífico, usualmente obtido a partir da composição gravimétrica e da determinação do teor de umidade dos resíduos do local (Kami, 2019). Dentre as tecnologias WTE, pode-se citar as conversões termoquímicas, onde estão incluídas a incineração e a pirólise (Albuquerque *et al.*, 2024).

No que diz respeito a pirólise, esta pode ser classificada como lenta (convencional), rápida ou *flash* (ultrarrápida), sendo realizada em reatores de leito fixo, leito fluidizado e fornos rotativos. A pirólise lenta, caracterizada por baixas taxas de aquecimento e temperatura, e grande tempo de residência, leva à formação dos produtos sólidos. Já o uso de tempos mínimos de residência, combinados com elevadas temperaturas e taxas de aquecimento, favorecem a formação dos gases, na chamada pirólise *flash*, enquanto condições moderadas formam os óleos de pirólise (Lisbona *et al.*, 2023; Alao *et al.*, 2022).

Já em relação à incineração, este é o método de conversão térmico mais antigo e corresponde à queima dos RSU (Albuquerque *et al.*, 2024). Além disso, é a rota termoquímica mais difundida e empregada em todo o mundo e, até 2018, existiam 497 plantas WTE de incineração apenas na Europa, tratando cerca de 96 milhões de toneladas de resíduos, de acordo com a *Confederation of European Waste-To-Energy Plant* (CEWEP, 2018).

Na incineração, a queima dos resíduos pode ser realizada diretamente nas câmaras de combustão, sem a necessidade de pré-tratamento, o que caracteriza a chamada queima em massa, do inglês *mass burn* (MB). Por outro lado, o RSU pode ser pré-processado, havendo a separação de suas frações não combustíveis (sólidos orgânicos), formando o combustível de resíduo (CDR), o que garantiria um maior rendimento na combustão

devido à elevação do poder calorífico inferior (PCI) e a necessidade de utilizar menos ar em excesso (Traven, 2023).

O CDR é uma alternativa de combustível produzido a partir do resíduo sólido urbano, possuindo elevado poder calorífico, refletindo em alta produção térmica por tonelada de matéria-prima, e sendo composto usualmente por papelão, papel, vidro, borracha, madeira, metais, matéria orgânica, entre outros componentes (Nam-Chol *et al.*, 2018). Dessa forma, torna-se possível reaproveitar o que não é orgânico, nem reciclável (Guedes *et al.*, 2020; Reza *et al.*, 2013).

Diante de suas vantagens ambientais, a aplicação do CDR vem ganhando espaço e avançando, principalmente nos Estados Unidos (EUA), na China, no Japão, na Índia e em países da Europa, como Portugal, Reino Unido, Áustria, Alemanha, Espanha, França, Escócia, Suécia entre outros, segundo a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN, 2022) e Ouda *et al.* (2016). Especialmente na Europa, a produção de CDR no período de 2000 a 2005 aumentou 78,5%, passando de 1,4 para 12,4 milhões de toneladas por ano; já em 2016, as plantas nos EUA produziam em torno de 150-200 toneladas por dia (Ouda *et al.*, 2016). Historicamente no Brasil, a primeira grande planta de utilização do CDR foi construída no município de Magé, no estado do Rio de Janeiro, após algumas tentativas sem sucesso de implementação em São Paulo, devido às dificuldades relacionadas à regulamentação e ao licenciamento ambiental (ABREN, 2022).

Sendo assim, até o presente momento, a incineração tem sido utilizada como o meio mais atrativo para a recuperação energética de RSU, principalmente devido à eficácia para redução do volume, tornando-o inerte em pouco tempo (Albuquerque *et al.*, 2024; Dadário *et al.*, 2021). Ademais, também são observadas vantagens em relação ao custo-benefício de mercado ao se utilizar da incineração (Dadário *et al.*, 2021).

Assim, os objetivos do presente artigo consistem em apresentar o atual cenário brasileiro da gestão de resíduos sólidos urbanos, destacando a oportunidade de aproveitamento energético da fração não aproveitada em outros processos a partir de tecnologias WTE, bem como analisar as alternativas de utilização dos resíduos que atualmente são destinados aos aterros, apresentando seus processos para garantir bons resultados na geração de energia. Especialmente, pretende-se demonstrar o potencial energético do RSU de Niterói, utilizando a caracterização gravimétrica apresentada no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de acordo com a PNRS.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. GESTÃO DE RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE NITERÓI

No presente documento, a gestão e o gerenciamento dos RSU do município de Niterói serão colocados em foco. Um dos grandes avanços do município em relação a gestão e gerenciamento dos RSU foi a aprovação do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município (PMGIRS), exigindo a implementação de coletas e estimulando a reciclagem (Niterói, 2012).

Especialmente, destaca-se o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) do município, elaborado pela Prefeitura de Niterói em parceria com a empresa Ampla Assessoria e Planejamento Ltda, aqui neste artigo referenciada apenas como “Ampla”. Fazem parte do PMSB os documentos identificados como Produto 4B (Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020a), que traz o Diagnóstico Técnico e Operacional do Sistema de Manejo de Resíduos Sólidos, e como Produto 8 (Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020b), que compreende o planejamento estratégico, com diretrizes, estratégias e metas do PMSB.

O PMSB estabelece que o manejo dos RSU domiciliares deve seguir as seguintes etapas: o acondicionamento, a coleta domiciliar e seletiva, o transporte, a destinação e disposição final (Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020a). A composição gravimétrica dos resíduos domiciliares do município pode ser observada na Tabela 1, disponibilizada pela Companhia de Limpeza de Niterói (CLIN, 2012).

Tabela 1. Estudo gravimétrico do resíduo domiciliar de Niterói

Fração gravimétrica	Composição gravimétrica
Material orgânico	48,84%
Papel/papelão	18,91%
Plástico	21,23%
Metais	4,06%
Vidro	1,87%
Outros	5,09%

Fonte: Adaptado de Clin (2012).

Em relação à coleta, os resíduos de coleta convencional seguem para a Unidade de Transbordo do Morro do Céu em caminhões compactadores, onde caminhões de capacidade maior são preenchidos e fazem o transporte até o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) Alcântara, no município vizinho de São Gonçalo (Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020b).

Ademais, destaca-se o processo de coleta seletiva, ou diferenciada, que é realizada de três formas, a saber, porta-a-porta, itinerante e pontos de entrega voluntária (PEV), e os resíduos são enviados para a Cooperativa de Catadores do Morro do Céu para o enfardamento e posterior comercialização (CLIN, 2012). Já os rejeitos são também encaminhados para o CTR Alcântara (CLIN, 2012).

Além da elaboração do PMSB de Niterói, o levantamento de dados realizado pela Ampla permitiu a avaliação de tendências e a construção de projeções, resultando, inclusive, em oportunidades para promover uma gestão mais integrada dos RSU do município.

Como oportunidade de melhorias foram destacados: i) maior eficiência da coleta domiciliar, nos últimos 4 anos o índice de desvio dos materiais recicláveis aos aterros se manteve estagnado; ii) implementação do tratamento e reaproveitamento dos resíduos de construção civil até então ausente; iii) regularização do descarte diante da irregularidade em alguns pontos; iv) criação de uma agência reguladora do sistema de limpeza urbana e do manejo do resíduo (Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020a).

O principal ponto destacado pela Ampla em seus relatórios é a separação de resíduos secos e úmidos na fonte geradora, ou seja, domicílios e estabelecimentos

(Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020a). Com os documentos acima mencionados, foi possível calcular a energia gerada a partir dos resíduos, utilizando como base o cálculo do Poder Calorífico Seco realizado a partir do modelo de *Dulong* modificado, apresentado por *Chang et al.* (2007) e *Komilis et al.* (2012) como um método rápido e econômico de se obter resultados muito próximos aos experimentais.

2.2. CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR

Como forma de garantir o total aproveitamento dos resíduos, foi avaliada por *Poli et al.* (2013) e *Jimenez* (2016) a possibilidade de utilização dos rejeitos dispostos no aterro sanitário tais como resíduos orgânicos, papel e papelão, plásticos, panos e madeira, em tecnologias WTE, realizando uma análise crítica do potencial calorífico e do potencial energético da mistura.

Para a determinação do poder calorífico do resíduo, foi realizada primeiramente a análise elementar e imediata da fração gravimétrica, de forma a estimar o poder calorífico superior a partir da entalpia de vaporização da água e o teor de umidade do resíduo (*Poli et al.*, 2013; *Jimenez*, 2016).

A análise elementar consistiu na determinação da fração (% massa) dos componentes que compõem o resíduo, enquanto o cálculo da análise imediata determina as frações de material volátil (MV), o carbono fixo (CF), o teor de umidade (W) e as cinzas (Cz) (*Poli et al.*, 2013; *Jimenez*, 2016). A Tabela 2 traz dados obtidos a partir de estudos que consideraram misturas de tipos de resíduos de cada fração (*Nakamura*, 2008).

Tabela 2. Análise elementar e imediata das frações gravimétricas

Fração gravimétrica	Análise elementar (%)					Análise imediata (%)			
	C	H	O	N	S	Cz/Inertes	W	MV	CF
Fração orgânica	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0	70,0	21,4	3,6
Vidro	0,5	0,1	0,4	0,1	0	98,9	0-2	0	0
Metal	4,5	0,6	4,3	0,1	0	90,5	2,0	0	0
Papel	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0	10,2	75,6	8,4
Plástico	60,0	7,2	22,8	0	0	10	0,2	95,8	2,0
Tecidos	48	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2	10,0	66,0	17,5
Borracha	69,7	8,7	0	2,0	1,6	20	1,2	83,9	4,9
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5	20,0	68,1	11,3
Outros	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68	3,2	68,1	0

Nota: C: carbono; H: hidrogênio; O: oxigênio; N: nitrogênio; S: enxofre; Cz: cinzas; W: teor de umidade; MV: material volátil (MV); CF: carbono fixo.

Fonte: Adaptado de *Nakamura* (2008).

Ao realizar as análises elementar e imediata foi possível calcular o $PCI_{úmido}$ utilizando a Equação 1, apresentada por *Poli et al.* (2013).

$$PCI_{úmido} = PCS_{seco} - W.HLV \quad (1)$$

em que $PCI_{\text{úmido}}$ compreende o poder calorífico úmido (kcal/kg); W o teor de umidade (%); HLV a entalpia de vaporização da água a 25 °C (kcal/kg); PCS_{seco} o poder calorífico superior seco (kcal/kg).

Ademais, Poli *et al.* (2013) apresentaram que, para amostras com alto teor de umidade, utiliza-se a Equação 2, onde o PCS_{seco} é o Poder Calorífico Superior.

$$PCI_{\text{úmido}} = (1 - W) \cdot PCS_{\text{seco}} - W \cdot HLV \quad (2)$$

Nos casos em que os combustíveis contêm hidrogênio, adota-se a Equação 3 abaixo, apontada por Chang *et al.* (2007) e Komilis *et al.* (2012), onde H é o teor de hidrogênio em base seca.

$$PCI_{\text{úmido}} = (1 - W) \cdot PCS_{\text{seco}} - [(1 - W) \cdot 9 \cdot H + W] \cdot HLV \quad (3)$$

O cálculo do PCS_{seco} (Equação 4), por sua vez, pode ser realizado a partir do modelo de Dulong modificado, conforme defendido por Chang *et al.* (2007) e Komilis *et al.* (2012).

$$PCS_{\text{seco}} = 7831 \cdot C_{\text{orgânico}} + 35932 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2212 \cdot S - 3545 \cdot C_{\text{inorgânico}} + 1187 \cdot O + 578 \cdot N \quad (4)$$

em que $C_{\text{orgânico}}$ corresponde ao teor de carbono orgânico em base seca (g/kg); $C_{\text{inorgânico}}$ o teor de carbono inorgânico em base seca (g/kg); N o teor de nitrogênio em base seca (g/kg); S o teor de enxofre em base seca (g/kg); e O o teor de oxigênio em base seca (g/kg).

De acordo com Poli *et al.* (2013), devido à pequena influência do $C_{\text{inorgânico}}$, da ordem de 32 kcal em relação a um total de 3.500, considera-se a parcela $3545 \cdot C_{\text{inorgânico}}$ igual a 32 kcal/kg. Assim, adequando a Equação 4 e substituindo na Equação 3, obtém-se o cálculo do $PCI_{\text{úmido}}$ a partir da Equação 5.

$$PCI_{\text{úmido}} = (1 - W) \cdot \left[7831 \cdot C_{\text{orgânico}} + 35932 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 212 \cdot S - 32 + 1187 \cdot O + 578 \cdot N \right] - [(1 - W) \cdot 9H + W] \cdot 583,2 \quad (5)$$

A partir do cálculo do poder calorífico, é possível estimar, através da Equação 6 abaixo, o potencial energético do resíduo, realizando as conversões necessárias (Divino; Piaia, 2020).

$$\text{Potencial Energético (kWh)} = PCI_{\text{úmido}} \cdot 4,184 \cdot \frac{m}{3,6} \quad (6)$$

em que m é a quantidade do resíduo sólido urbano (t).

Sendo assim, utilizando a metodologia acima descrita, foi possível aplicá-la para o caso do município de Niterói, cujo objetivo foi avaliar a possibilidade de se utilizar tecnologias alternativas para aproveitamento energético dos RSU.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR INDIVIDUAL

Alguns Estados brasileiros como São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo já utilizam a tecnologia WTE de incineração para produção de energia a partir dos RSU presentes em aterros sanitários com excelentes resultados (Leme, 2010).

No caso do município de Niterói, para obtenção do poder calorífico da mistura de resíduos, foi realizado o cálculo do $PCI_{\text{úmido}}$ individual correspondente à cada fração. De acordo com a análise gravimétrica fornecida pelo PMRS de Niterói, os RSU possuem os seguintes componentes: matéria orgânica, papel/papelão, plástico, metal, vidro e outros, que englobam materiais têxteis, borrachas, madeira, resíduos sanitários (Niterói, 2012).

Utilizando os valores correspondentes de análise elementar e imediata apresentados na Tabela 2 e a Equação 5, foram obtidos os resultados do $PCI_{\text{úmido}}$ (kcal/kg), conforme apresentado na Figura 1.

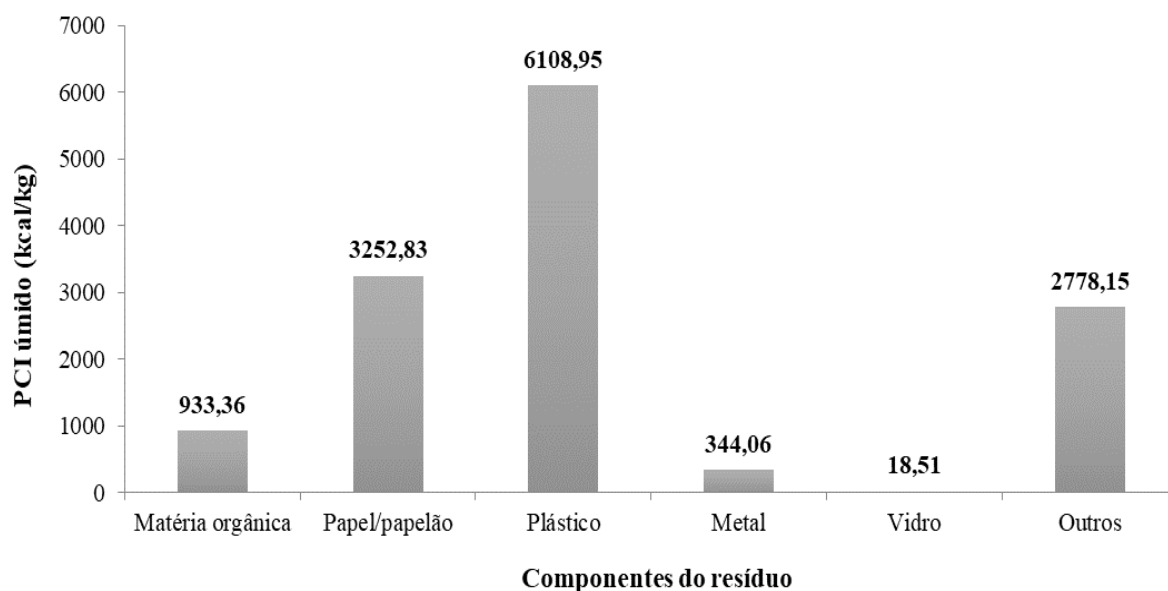


Figura 1. Valores de $PCI_{\text{úmido}}$ correspondente à cada fração do resíduo sólido urbano de Niterói-RJ

Os componentes de maior PCI são os plásticos e os papéis, o que é explicado pelo menor teor de umidade e maior quantidade de carbono em sua composição elementar. A influência da umidade se torna ainda mais evidente ao se comparar os valores com o PCI da matéria orgânica, mais rica em água. Os $PCI_{\text{úmido}}$ para os resíduos de tecidos, borracha e madeira estão computados em outros. Com a determinação dos PCI individuais, foi obtido o PCI da mistura, considerando a participação de cada material na composição gravimétrica do resíduo.

3.2. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Alguns países, tais como os Estados Unidos, China, Japão e Índia, ampliaram seus estudos e aplicações na proposta de utilização do RSU para produção de energia de forma renovável, beneficiando-se simultaneamente da redução de sua quantidade restante, uma vez que levantamentos realizados mostraram a capacidade de produzir aproximadamente 192 toneladas de combustível a partir de 750 toneladas de resíduo, ou seja, uma eficiência em torno de 26% (Ouda *et al.*, 2016).

O potencial energético é obtido pelo poder calorífico da mistura e sua respectiva quantidade. Assim, considerando-se a eficiência relatada por Kami (2019) e Ouda *et al.* (2016), para calcular o PCI dos RSU da cidade de Niterói, adotou-se o valor de 27% de eficiência para conversão energética a partir do potencial energético. Para o ano de referência (2019), onde a quantidade de resíduos desviados do aterro ainda era considerada mínima, foi calculado um potencial energético de aproximadamente $1,19 \times 10^6$ kWh/dia.

As quantidades de energia que poderiam ser geradas pelos RSU ao longo de um período de 20 anos (2020-2039) são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Energia gerada por incineração

Ano	PCI (MJ/kg)	Potencial energético (kWh/dia)	Energia (kWh/dia, conversão de 27%)	Energia (kWh/ano)
2020	12,07	$1,04 \times 10^6$	280.148,58	$1,02 \times 10^8$
2021	11,71	946.644,00	255.593,88	$9,33 \times 10^7$
2022	11,30	854.815,50	230.900,18	$8,43 \times 10^7$
2023	10,83	762.248,45	205.807,08	$7,51 \times 10^7$
2024	10,27	669.057,73	180.645,59	$6,59 \times 10^7$
2025	10,27	670.766,24	181.106,89	$6,61 \times 10^7$
2026	10,27	672.163,31	181.484,09	$6,62 \times 10^7$
2027	10,57	662.109,75	178.769,63	$6,52 \times 10^7$
2028	10,57	663.204,63	179.065,25	$6,53 \times 10^7$
2029	10,57	664.147,01	179.319,69	$6,54 \times 10^7$
2030	10,57	665.361,87	179.647,71	$6,55 \times 10^7$
2031	10,90	654.614,58	176.745,94	$6,45 \times 10^7$
2032	10,90	655.080,18	176.871,65	$6,45 \times 10^7$
2033	10,90	655.384,85	176.953,91	$6,46 \times 10^7$
2034	10,90	655.517,53	176.989,73	$6,46 \times 10^7$
2035	10,90	655.937,67	177.103,17	$6,46 \times 10^7$
2036	10,90	655.734,97	177.048,44	$6,46 \times 10^7$
2037	10,90	655.361,51	176.947,61	$6,46 \times 10^7$
2038	10,90	654.828,34	176.803,65	$6,45 \times 10^7$
2039	10,90	654.135,46	176.616,57	$6,45 \times 10^7$

A partir disso, os cálculos realizados indicaram que o poder calorífico do RSU do município de Niterói se encontra compatível aos dados da literatura ao se manterem ao longo dos anos estudados (2019-2039) entre os valores de 6,0 a 12,0 MJ/kg (Kami, 2019; Ouda *et al.*, 2016).

Ademais, seguindo a projeção de crescimento da coleta seletiva em um horizonte de 20 anos, observou-se uma oscilação no seu valor de acordo com o percentual de desvio dos resíduos sólidos secos e úmidos dos aterros sanitários, apresentando um poder calorífico médio da mistura de resíduos de 10,86 MJ/kg.

O potencial energético calculado no primeiro ano do estudo é de cerca de $1,04 \times 10^6$ kWh/dia, ou seja, $3,75 \times 10^8$ kWh/ano, apresentando uma redução em relação ao ano de 2019. Isso pode ser explicado pela menor quantidade de resíduos restantes sendo direcionados para o aterro sanitário, uma vez que se prevê o aumento da aderência à coleta seletiva.

Da mesma forma, ele foi aplicado nos próximos anos e, soma-se a isso, as mudanças expressivas no PCI da mistura de resíduos entre 2020 e 2024. Após 2024, onde a frequência e as taxas de aumento dos desvios pelos tipos de coleta seletiva diminuem e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos que vão para o aterro é praticamente constante, o potencial energético assume um comportamento de produção energética estável.

A Figura 2 apresenta os resultados do potencial energético diário para a projeção dos próximos 20 anos.

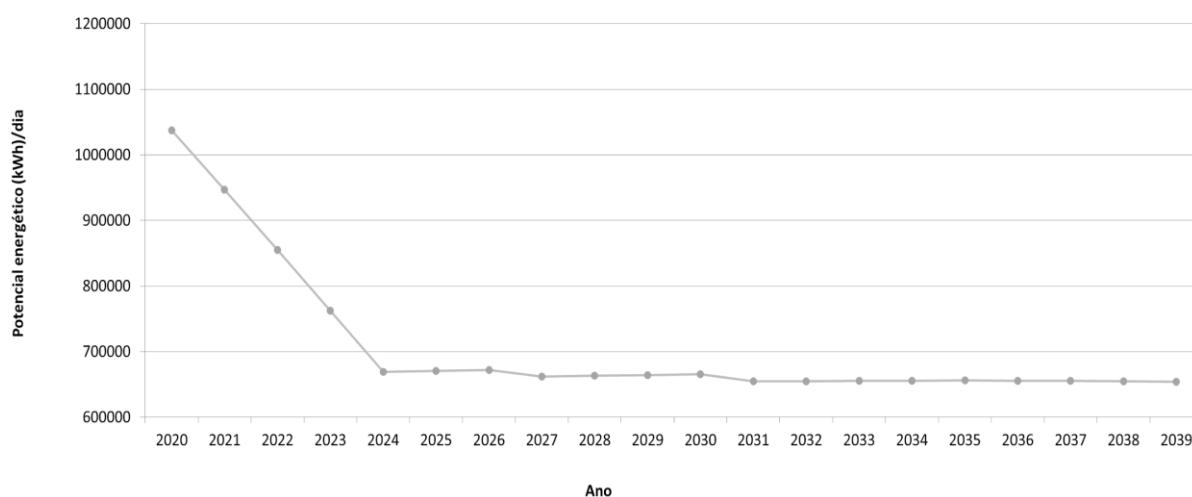


Figura 2. Potencial energético diário calculado ao longo de 20 anos

Os resíduos analisados apresentaram bons resultados em relação ao potencial calorífico inferior, sendo possível analisar o potencial energético perdido ao estabelecerem como seu destino o aterro sanitário. A energia que poderia ser gerada a partir desses resíduos irá depender da tecnologia implementada e sua eficiência. Sabe-se que antes do aproveitamento energético, as práticas de não geração, redução, reutilização e reciclagem deveriam ser priorizadas, seguindo a diretriz da PNRS e a hierarquia dos resíduos.

Levando em consideração o fluxo apresentado pela Prefeitura de Niterói e Ampla (2020a), entende-se que o uso de tecnologias WTE se mostra mais atrativo do que a disposição final de uma grande quantidade de resíduos no aterro sanitário, aumentando sua vida útil, apesar de ainda existirem materiais recicláveis na mistura.

De acordo com Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), outras características precisam ser levadas em conta quando se decide o método a ser empregado, porém, pode-se considerar que para um PCI maior que 2.000 kcal/kg, o *mass burning* é uma WTE tecnicamente viável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por soluções para a crescente demanda por energia e a geração desenfreada de resíduos em todo o mundo, associadas a problemas socioambientais, representam uma oportunidade de integração voltada à economia circular.

A implantação de um sistema integrado de resíduos, com estratégias para priorizar a recuperação de recursos, diminuir a geração de resíduos e promover a sustentabilidade energética, vai de acordo com a hierarquia de resíduos adotada mundialmente, reduzindo ainda os problemas relacionados à disposição em aterros e lixões.

Quanto a análise das metas e projetos relacionados à gestão de resíduos em Niterói, propostas em concordância com as diretrizes estabelecidas na PNRS, mostraram como uma grande parte dos RSU do município poderia ser aproveitada energeticamente. A avaliação do poder calorífico inferior da mistura a ser direcionada ao aterro sanitário em uma projeção de 20 anos resultou em valores satisfatórios, dentro dos limites apontados pela literatura, apresentando um valor médio de poder calorífico inferior de 10,86 MJ/kg.

O valor do potencial energético do RSU do município de Niterói para a projeção de 2039 foi de 654.145,46 kWh/dia e, uma geração de energia de $6,45 \times 10^7$ kWh/ano, considerando-se 27% de eficiência na incineração dos RSU. Assim, foram apresentadas possibilidades vantajosas e sustentáveis de aproveitamento do resíduo para geração de energia, a partir da aplicação de tecnologias WTE de incineração dos RSU ao longo de 20 anos, contados a partir de 2019.

O PMSB para resíduos sólidos urbanos de Niterói foi elaborado levando em consideração pré-requisitos indispensáveis para a gestão integrada que o cenário atual de geração excessiva de resíduos requer, havendo uma indicação promissora na utilização dos RSU na geração de energia.

No entanto, poderiam ser exploradas formas de tratamento cada vez mais desenvolvidas no cenário mundial, apresentando alternativas energéticas que consideram o potencial energético e o ganho ambiental, quando os resíduos são valorizados e desviados de aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

ALAO, M. A.; POPPOOLA, O. M.; AYODELE, T. R. Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100034, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>.

ALBUQUERQUE, M. S. *et al.* Waste-to-Energy: potencialidades e contextualização da sua aplicação no Brasil. **Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 4, p. 01-23, 2024. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.4-001>.

ALSABBAGH, M. Mitigation of CO₂ e Emissions from the Municipal Solid Waste Sector in the Kingdom of Bahrain. **Climate**, v. 7, n. 100, p. 1-24, 2019. <https://doi.org/10.3390/cli7080100>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS. **Combustível Derivado de Resíduos (CDR) tem enorme potencial energético no Brasil (CanalEnergia)**. Brasília: ABREN, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023**. São Paulo: ABREMA, 2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Com 3 mil lixões ativos, Brasil ainda tem dificuldades no descarte adequado do lixo**. São Paulo: ABREMA, 2024b.

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, DF: Presidência da República, 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza [...] a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos Brasília, DF: Presidência da República, [2020].

BRASIL. **Projeto de lei nº 1.323, de 17 de abril de 2024**. Prorroga o prazo estabelecido pela Lei 14.026/2020 para encerramento dos lixões em municípios com menos de 50 mil habitantes e estabelece medidas alternativas para a gestão de resíduos sólidos. Câmara dos Deputados, Brasília, DF, 17 abr. 2024.

CHANG, Y. F. *et al.* Multiple regression models for the lower heating value of municipal solid waste in Taiwan. **Journal of Environmental Management**, v. 85, n. 4, p.891–899, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.10.025>

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA DE NITERÓI. **Plano Municipal de Resíduos Sólidos de Niterói**. Niterói: CLIN, 2012.

CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS. **Waste-to-Energy: Energizing your waste**. CEWEP, 2018.

DADÁRIO, N. *et al.* Análise sintética da aplicação da técnica Waste-to-Energy (Wte) e das legislações brasileiras pertinentes. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*, 23., 2021, São Paulo. **Anais eletrônicos** [...] São Paulo: FEA/USP, 2021.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Guia para Tomadores de Decisão em Países Emergentes ou em Desenvolvimento.** Eschborn: GÍZ, 2017.

DIVINO, N. C. C.; PIAIA, E. Avaliação do potencial de rejeitos da coleta seletiva como combustível derivado de resíduo – CDR. *In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS*, 11., 2020, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...] Porto Alegre: Instituto Venturi, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FLAMINI, S. H. Quando se joga dinheiro e futuro no lixo. **Revista GUIA – Integrando Seres e Saberes**, v. 1, n. 1, p. 48-50, 2020.

GUEDES, F. L. *et al.* Potencial energético do combustível derivado de resíduo produzido em Pernambuco, Brasil. *In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 19., 2020, Recife. **Anais** [...] Recife: ABES, 2020.

HAVEL, J. **Waste to Energy 2023/2024.** 16. ed. Köln: Ecoprog, 2023.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Geneva: IPCC, 2014.

KAMI, E. C. A. **Análise termoeconômica de sistema híbrido solar térmico integrado à unidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos.** 2019. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

KAZA, S. *et al.* **What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Washington: World Bank, 2018.

KOMILIS, D. *et al.* Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. **Waste management**, v. 32, n. 3, p. 372–381, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste management**, v. 69, p. 407-422, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>

JIMENEZ, A. C. M. **Análise técnico econômica do processo de gaseificação de resíduo sólido urbano para a geração de energia elétrica**. 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2016.

LEITÃO, F. O. *et al.* Circularity as a dynamic capability: A review and future agenda for a circular transition. **Revista de Administração de Empresas**, v. 64, n. 3, p. 1-29, e2023-0084, 2024. <https://doi.org/10.1590/S0034-759020240306>

LEME, M. M. V. Avaliação das Opções Tecnológicas para geração de Energia através dos RSU. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

LISBONA, P.; PASCUAL, S.; PÉREZ, V. Waste to energy: Trends and perspectives. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 14, p. 100494, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100494>

MAR, K. A. *et al.* Beyond CO2 equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. **Environmental Science & Policy**, v. 134, p. 127-136, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>

NAKAMURA, M. **Mathematical and physical modeling of mixing and flow phenomena of municipal solid waste particles on a reverse acting grate**. 2008. 198 f. Tese (Doutorado em Engineering Science) - Columbia University, New York, 2008.

NAM-CHOL, O. *et al.* A feasibility study of energy recovery of RDF from municipal solid waste. **Energy Sources**, v. 40, n. 24, p. 2914-2922, 2018. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1514431>.

NITERÓI. **Decreto nº 11.203, de 10 de agosto de 2012**. Dispõe sobre a aprovação do plano de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Niterói. Niterói, RJ: Prefeitura de Niterói, 2012.

OUDA, O. K. M. *et al.* Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328-340, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>.

POLI, C. R. *et al.* Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. v. 8, n. 9, p. 9-31, 2013. <https://doi.org/10.17921/1890-1793.2013v8n8p9-31>.

PREFEITURA DE NITERÓI; AMPLA. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Produto 4B**. Niterói: Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020a.

PREFEITURA DE NITERÓI; AMPLA. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Produto 8**. Niterói: Prefeitura de Niterói; Ampla, 2020b.

REZA, B. *et al.* Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of MetroVancouver Waste Management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 81, p. 105-114, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.009>.

TEIXEIRA, C. H. S. B.; TEIXEIRA, R. L. P. Convergências entre economia circular e as práticas da indústria 4.0. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, p.1-19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n2-012>.

TRAVEN, L. Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 100491, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100491>