

## TECNOLOGIAS WASTE-TO ENERGY: UMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO DE NITERÓI

Carolina Alonso Pereira<sup>1</sup>, Alícia Carneiro Vasconcellos Lopes<sup>2</sup>,  
Luciane Pimentel Costa Monteiro<sup>3</sup>, Larissa Costa Monteiro<sup>4</sup>

**Resumo:** Tendo em vista o grande crescimento populacional global e baixo reaproveitamento dos resíduos sólidos, alternativas sustentáveis estão sendo estudadas e implementadas, uma vez que o restante é disposto, majoritariamente, em aterros e lixões. De forma a beneficiar-se da redução de seu volume e de seu aproveitamento energético, surgem as tecnologias *Waste-to-Energy*, em que resíduos se transformam em energia. Assim, este trabalho aborda uma metodologia alinhada à Política Nacional de Resíduos Sólidos, estudando propostas que usufruam do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos do município de Niterói, no Rio de Janeiro, com base em seu Plano Municipal de Saneamento Básico. Considerando as análises gravimétrica, elementar e imediata do resíduo oriundo da coleta, foi possível determinar seu poder calorífico a partir do Modelo de Dulong modificado, e estimar o potencial energético. Os cálculos mostraram que o poder calorífico do resíduo sólido urbano se encontra no intervalo esperado, de acordo com a literatura. 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 uma média de 10,86 MJ/kg. A análise do potencial energético do resíduo sólido urbano apresentou possibilidades vantajosas e sustentáveis de aproveitamento do resíduo através da geração de energia após aplicação de tecnologias *Waste-to-Energy*, como a incineração do resíduo ou sua utilização para produção do combustível derivado de resíduos.

**Palavras-chave:** resíduos sólidos; energia; sustentabilidade.

---

1 Bacharel em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense.

2 Bacharelado em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense.

3 Doutorado em Engenharia Civil com ênfase em Meio Ambiente, Universidade Federal Fluminense. Professora Titular do Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense.

4 Mestre em Agronegócios, Universidade de Brasília.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Banco Mundial, a geração anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) atingiria 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 1,043 kg por dia, foram produzidos cerca de 81,8 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 Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022).

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

Diante da necessidade da gestão do 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 Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica, ainda, que estas unidades são capazes de gerar oito vezes menos emissões de GEE quando comparadas à outras formas de destinação (IPCC, 2014).

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). 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 pode calorífico e que pode ser usado para recuperar energia e substituir combustíveis fósseis (Gíz, 2017).

Alinhada a isto se encontra a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, que prioriza o aproveitamento energético frente à disposição de resíduos em aterros através 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, destaca-se neste trabalho o Plano

Municipal de Saneamento Básico do município de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, que traz medidas e propostas para o desenvolvimento da gestão integrada de resíduos sólidos.

Neste sentido, 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 resíduo sólido urbano do município de Niterói, utilizando a caracterização gravimétrica apresentada no Plano Municipal de Resíduos Sólidos (PMRS) e a gestão integrada de resíduos sólidos indicada no Plano Municipal de Saneamento Básico.

No presente documento, a gestão do resíduo da cidade de Niterói será colocada em foco, analisando, desta forma, os documentos elaborados pela Ampla Assessoria e Planejamento Ltda., aqui neste artigo referenciada apenas como “Ampla”. Fazem parte do Plano Municipal de Saneamento Básico de Niterói (PMSB) os documentos identificados como Produto 4B (Ampla, 2020a), que traz o Diagnóstico Técnico e Operacional do Sistema de Manejo de Resíduos Sólidos, e como Produto 8 (Ampla, 2020b), que compreende o planejamento estratégico, com diretrizes, estratégias e metas do PMSB.

Munidos dos dados presentes nos referidos documentos, para a realização dos cálculos de energia gerada a partir dos resíduos, foi tomado como base o cálculo do Poder Calorífico Seco realizado a partir do modelo de Dulong modificado, apontado por Chang *et al.* (2007) e Komilis *et al.* (2012) como um método rápido e econômico de se obter resultados muito próximos aos experimentais.

Após aplicação desta metodologia, é possível inferir, através dos cálculos realizados, que existe a possibilidade de gerar energia a partir dos resíduos que são apenas dispostos no aterro, através da aplicação de tecnologias WTE, ainda que seja necessário um acompanhamento efetivo dos poluentes gerados pelo processo, garantindo seu sucesso de implantação.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resíduo Sólido: Destinação X Disposição

A PNRS, implementada 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 do Sisnama, do SNVS e do Suasa (Brasil, 2010).

O último levantamento realizado pela ABRELPE (2022) apresentou que 61% dos resíduos sólidos urbanos são dispostos adequadamente, enquanto 39%, de todo o RSU que segue para disposição final, são dispostos de forma inadequada, sendo encaminhados para aterros controlados e lixões, os quais, de acordo com o prazo da PNRS, deveriam ter sido extintos em 2014. Entretanto, 2.500 lixões ainda se encontram ativos e, seguindo o ritmo atual, seriam necessários 55 anos para sua extinção (CNN Brasil, 2022).

Em relação à taxa de cobertura de coleta do RSU, segundo dados da ABRELPE (2022), a taxa nacional é de 93,04%; em relação às taxas regionais, observou-se que também há uma discrepância entre as regiões do país, onde a Sudeste conta com 98,6%, a maior do país, e o Nordeste conta com 82,7%, a menor.

## 2.2 Economia Circular

A economia circular (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).

Trazendo à tona a PNRS, várias definições no âmbito do tratamento de RSU estão em consonância com os princípios da EC (Teixeira; Teixeira, 2022).

Dentre eles, especificamente, como diretriz do PNRS, inclui-se 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).

## 2.3 Potencial Energético do RSU e Tecnologias *Waste-To-Energy*

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.

A incineração 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 (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, formando o combustível de resíduo (CDR), o que garantiria um maior rendimento na combustão devido à elevação do PCI (Poder Calorífico Inferior) e um excesso de ar 50% menor se mostra necessário.

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

No que diz respeito a pirólise, essa tecnologia 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; Popoola; Ayodele, 2022).

## 2.4 Gestão de Resíduos do Município de Niterói

Um dos grandes avanços do município de Niterói na área de gestão de resíduos foi a aprovação do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município (PMGIRS), exigindo a implementação de coletas e estimulando a reciclagem (Niterói, 2012a). De acordo com a Ampla (2020a), o manejo dos resíduos sólidos domiciliares segue: o acondicionamento, a coleta domiciliar e seletiva, o transporte, a destinação e disposição final.

Os resíduos de coleta convencional seguem para a Unidade de Transbordo do Morro do Céu em caminhões compactadores, onde caminhões de capacidade maior serão preenchidos e farão o transporte até o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) Alcântara, em São Gonçalo. Essa coleta é realizada pela empresa ECONIT, cobrindo 100% do território de Niterói, segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (AMPLA, 2020a).

A coleta seletiva, ou diferenciada, é realizada de três formas: porta-a-porta, itinerante e pontos de entrega voluntária (PEV). O recolhimento da coleta seletiva também é realizado pela ECONIT, sendo enviados para a Cooperativa de Catadores do Morro do Céu para o enfardamento e posterior comercialização. Os rejeitos são encaminhados para o CTR Alcântara (CLIN, 2023). No município de Niterói, de acordo com o Plano Municipal de Resíduos Sólidos (PMRS), o resíduo domiciliar é composto de resíduos orgânicos

(48,84%), resíduos secos recicláveis (46,07%) e outros resíduos (5,09%) (Niterói, 2012b).

## 2.5 O PMSB no Município de Niterói

O levantamento de dados realizado pela assessoria Ampla permitiu a avaliação de tendências e a construção de projeções do PMSB de Niterói, resultando em um documento com oportunidades para promover uma melhor Gestão Integrada de Resíduos Sólidos no âmbito 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. 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. (AMPLA, 2020a).

Como base para a definição dos passos a serem seguidos, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) é uma ferramenta fundamental, estabelecendo ações e metas para a gestão do setor. A partir do aumento gradativo do desvio de resíduos do aterro sanitário e, conseqüentemente, o aumento de sua recuperação, o plano indica meios de atender os pontos e exigências da PNRS. Assim, este artigo demonstrou que em uma projeção para 2023, os resíduos recicláveis secos dispostos em aterro representarão 50% e os úmidos 55% para a Região Sudeste.

## 3 METODOLOGIA

Tendo como base as informações obtidas com o referencial teórico anteriormente apresentado e, em especial, utilizando os dados contidos nos documentos desenvolvidos pela Ampla (2020a; 2020b), o presente trabalho utilizou da metodologia descrita a seguir em vistas de calcular o PCI e, assim, ser possível sugerir melhorias.

### 3.1 Proposta de Melhoria e Cálculo do PCI

Como forma de garantir o total aproveitamento dos resíduos, propõe-se avaliar a possibilidade de utilização desses rejeitos em tecnologias *waste-to-energy*, realizando uma análise crítica do potencial calorífico e do potencial energético da mistura.

Para a determinação do poder calorífico do resíduo, é necessário realizar primeiramente a análise elementar e a 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. A análise elementar consiste 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) (Tabela 1) (Poli, *et.al*, 2013; Jimenez, 2016).

Tabela 1 - 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	70	21,4	3,6
Vidro	0,5	0,1	0,4	0,1	0	98,9	1,1/2	0	0
Metal	4,5	0,6	4,3	0,1	0	90,5	2	0	0
Papel	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6	10,2	75,6	8,4
Plástico	60	7,2	22,8	0	0	10	0,2	95,8	2
Tecidos	48	6,4	40	2,2	0,2	3,2	10	66	17,5
Borracha	69,7	8,7	0	2/0	1,6	20	1,2	83,9	4,9
Madeira	49,5	6	42,7	0,2	0,1	1,5	20	68,1	11,3
Outros	26,3	3	2	0,5	0,2	68	3,2	68,1	0

Fonte: Adaptado de Jimenez (2016).

Ao realizar as análises elementar e imediata é possível calcular o PCI utilizando a Equação 1.

$$PCI_{úmido} = PCS_{seco} - W.HLV$$

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

Para amostras com alto teor de umidade utiliza-se a Equação 2, onde o  $PCS_{seco}$  é o Poder Calorífico Superior.

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

Nos casos em que os combustíveis contêm hidrogênio adota-se a Equação 3.

$$PCI_{úmido} = (1 - W).PCS_{seco} - [(1 - W).9.H + W]HLV$$

em que: H - teor de hidrogênio em base seca (%).



O cálculo do PCS<sub>seco</sub> (Equação 4), por sua vez, pode ser realizado a partir do modelo de *Dulong* modificado, apontado por *Chang et al.* (2007) e *Komilis et al.* (2012) como um método rápido e econômico de se obter resultados muito próximos aos experimentais.

$$PCS_{seco} = 7831.C_{orgânico} + 35932.(H - \frac{O}{8}) + 2212.S - 3545.C_{inorgânico} + 1187.O + 578.N$$

em que: C<sub>orgânico</sub> - teor de carbono orgânico em base seca (% massa); C<sub>inorgânico</sub> - teor de carbono inorgânico em base seca (% massa); N - teor de nitrogênio em base seca (% massa); S - teor de enxofre em base seca (% massa); O - teor de oxigênio em base seca (% massa).

De acordo com *Poli et al.* (2013), devido à pequena influência do C<sub>inorgânico'</sub> da ordem de 32 kcal em relação a um total 3500, considera-se a parcela 3545.C<sub>inorgânico</sub> igual a 32 kcal/kg. Assim, adequando a Equação 4 e substituindo na Equação 3, obtém-se o cálculo a partir da Equação 5.

$$PCS_{seco} = (1-W).[7831.C_{orgânico} + 35932.(H - \frac{O}{8}) + 212.S - 32 + 1187.O + 578.N] - [(1-W).9H + W].583,2$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

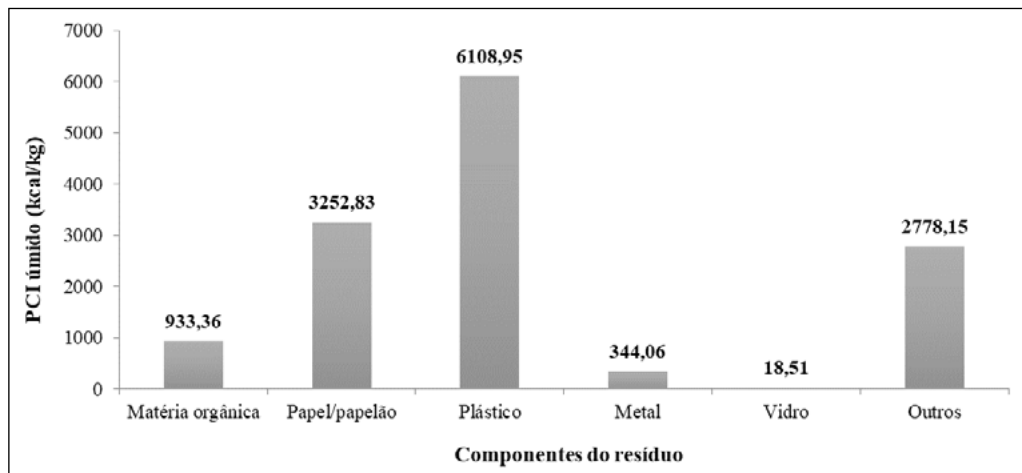
### 4.1 Cálculo do PCI Individual

Para que seja possível obter o poder calorífico da mistura de resíduos, é necessário que seja realizado o cálculo do PCI<sub>úmido</sub> individual, correspondente à cada fração. De acordo com a análise gravimétrica fornecida pelo PMRS de Niterói, os resíduos sólidos domiciliares possuem os seguintes componentes: matéria orgânica, papel/papelão, plástico, metal, vidro e outros (que englobam materiais têxteis, borrachas, madeira, resíduos sanitários).

Dessa forma, utilizando os valores correspondentes de análise elementar e imediata presentes na Tabela 1 e a Equação 5 apresentadas, foram obtidos os resultados presentes na Figura 1.



Figura 1 - Gráfico contendo os valores de PCI úmido correspondente à cada fração



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

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. Com a determinação dos PCI individuais, pode ser obtido o PCI da mistura, considerando a participação de cada material na composição gravimétrica do resíduo.

## 4.2 Caracterização do RSU ao Longo dos Anos

### Comportamento Do Poder Calorífico Inferior

Para avaliar o poder calorífico dos resíduos restantes, assim como seu potencial energético, tomou-se como referência a composição dos RSU do ano de 2019. Segundo os dados da CLIN, a geração média diária nesse ano foi de 417,4 toneladas e a partir do PCI individual de cada fração, foi calculado o PCI da mistura de resíduos restante (Tabela 2).

Tabela 2 - PCI dos resíduos destinados ao aterro em 2019

Fração	Quantidade restante (t/dia)	%	PCI <sub>úmido</sub> individual (kcal/kg)	PCI <sub>úmido</sub> individual (MJ/kg)
Matéria Orgânica	203,86	49,73	933,36	3,91
Papel/Papelão	75,86	18,51	3.252,83	13,61
Plástico	85,17	20,78	6.108,95	25,56
Metal	16,29	3,97	344,06	1,44
Vidros	7,50	1,83	18,51	0,08
Outros	21,25	5,18	2.778,15	11,62
Total	409,93	100,00	2.493,36	10,43

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

O valor obtido está dentro do esperado para um RSU bruto proveniente de locais com alta porcentagem de matéria orgânica na composição, que de acordo com a literatura, varia entre 6,0 e 12,0 MJ/kg. (Kami, 2019).

O plano realiza uma projeção em um horizonte de 20 anos, totalizando  $1,71 \times 10^6$  toneladas com esse destino, cuja caracterização se altera devido às metas de desvio adotadas.

### 4.3 Avaliação do Potencial Energético

O potencial energético é obtido pelo poder calorífico da mistura e sua respectiva quantidade. Para o ano de referência, 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, como mostra a Tabela 3.

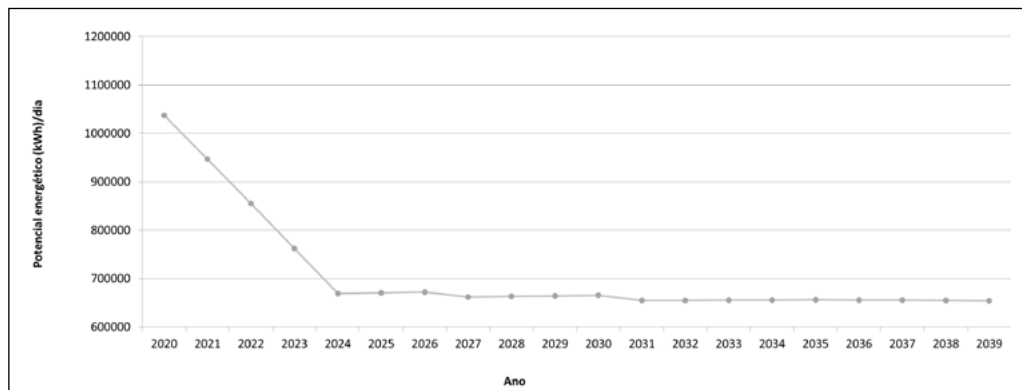
Tabela 3 - Potencial energético diário do ano de referência

Ano	Resíduo restante (t)	PCI (kcal/kg)	PCI (MJ/kg)	Potencial Energético (kWh/dia)
2019	409,92	2.493,36	10,43	$1,19 \times 10^6$

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A Figura 2 apresenta os resultados para a projeção de desvios dos próximos 20 anos.

Figura 2 - Gráfico obtido através do Potencial Energético diário calculado ao longo de 20 anos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

O potencial calculado no primeiro ano do estudo é de cerca de  $1,04 \times 10^6$  kWh/dia, 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. O mesmo aplica-se aos próximos anos e, soma-se a isso, as mudanças expressivas no PCI da mistura de resíduos entre 2020 e 2024, destacadas anteriormente. Após 2024, onde a frequência e as taxas de aumento dos desvios pelos tipos de coleta seletiva diminuem no estudo e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos que vão para o aterro é praticamente constante, o potencial energético assume um comportamento estável.

#### 4.4 Possibilidades de Implementação

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 Política Nacional de Resíduos Sólidos e a hierarquia dos resíduos. No entanto, levando em consideração o fluxo apresentado pela Ampla, entende-se que o uso de tecnologias *waste-to-energy* 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 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 tecnicamente viável. Assim, considerando-se as eficiências

relatadas por Kami (2019) e Ouda *et al.* (2016), adotou-se o valor de 27% para conversão energética e as quantidades de energia que poderiam ser geradas estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Energia gerada por incineração

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

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Considerando a possibilidade de queima de todo o resíduo restante, e adotando a diminuição em massa de 75%, 1,28 x 10<sup>6</sup> toneladas seriam desviadas do aterro no período de 20 anos. Outra alternativa seria realizar o pré-tratamento da mistura de resíduos, transformando-a em CDR, com um poder calorífico mais alto. Kami (2019) propôs uma gestão integrada de resíduos que também envolvia o crescimento gradual de iniciativas de coleta seletiva e separação na fonte geradora, onde os resíduos não desviados são destinados à produção do combustível derivado de resíduos e a matéria orgânica segue para um biodigestor. Como no caso de Niterói existe a presença de materiais recicláveis misturados a outros resíduos, seria ideal que houvesse uma triagem, posterior a um separador magnético, onde os metais já seriam retirados.

Com a evolução do Plano Municipal de Niterói e o aumento da coleta seletiva e da triagem dos resíduos, uma quantidade cada vez maior poderia ser direcionada para a produção de CDR, reduzindo o despejo no aterro sanitário.

O potencial energético do produto poderia ser utilizado pelo próprio município, ou o mesmo poderia ser vendido para cimenteiras próximas, mantendo o baixo custo relacionado.

## 5 CONCLUSÃO

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 10,86 MJ/kg, foi possível observar suas variações de acordo com as mudanças nas frações específicas, devido ao aumento dos desvios por coleta seletiva ao longo dos anos.

Assim, o PMSB para resíduos sólidos urbanos de Niterói foi montado levando em consideração pré-requisitos indispensáveis para a gestão integrada que o cenário atual de geração excessiva de resíduos requer. 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

ABRELPE - Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. 2022. Disponível em <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em 14 ago 2023.

ALAO, Moshood Alao; POPPOOLA, Olawale; AYODELE, Temitope Raphael. Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. **Cleaner Energy Systems**, v. 3, p. 100034, 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cles.2022.100034>

ALSABBAGH, Maha. Mitigation of CO<sub>2</sub>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>

AMPLA - Ampla Assessoria E Planejamento Ltda. Plano Municipal de Saneamento Básico Produto 4B. 2020a. Disponível em <<https://www.seconser.niteroi.rj.gov.br/plano-municipal-de-saneamento-basico>>. Acesso em 30 ago 2023.

AMPLA - Ampla Assessoria E Planejamento Ltda. Plano Municipal de Saneamento Básico Produto 8. 2020b. Disponível em <<https://www.seconser.niteroi.rj.gov.br/plano-municipal-de-saneamento-basico>>. Acesso em 30 ago 2023.

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, 2 ago. 2010.

CEWEP - Confederation of European Waste-To-Energy Plants. Waste-to-Energy: Energizing your waste. 2018. Disponível em: <<https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2018/07/Interactivepresentation-2018-New-slides.pdf>> Acesso em 05 set 2023.

CHANG, Y. F.; LIN, Chien Jung; CHYAN, Jih-Ming; CHEN, I. M.; CHANG, J. E. 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>

CLIN - Companhia Municipal de Limpeza Urbana de Niterói. Coleta Seletiva. 2023. Disponível em: <<https://www.clin.rj.gov.br/SiteCLIN/home/servicos/coletaseletiva/>> Acesso em 30 ago 2023.

CNN BRASIL. Cerca de 40% dos resíduos gerados por ano no Brasil vão para lixões a céu aberto, 2022. Disponível em <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/cerca-de-40-dos-residuos-gerados-por-ano-no-brasilvao-para-lixoes-a-ceuaberto/#:~:text=temos%20cerca%20de%202.500%20lix%C3%B5es, impactos%20para%20sa%C3%BAde%20a%20popula%C3%A7%C3%A3o>> Acesso em 21 ago 2023.

EPE – Empresa De Pesquisa Energética. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FLAMINI, Silvia Helena. Quando se joga dinheiro e futuro no lixo. **Revista GUIA – Integrando Seres e Saberes**, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: <<https://www.revistagua.ufscar.br/index.php/guia/article/view/23>> Acesso em: 24 set. 2024.

GÍZ – Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit. **Opções em Wasteto-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Guia para Tomadores de Decisão em Países Emergentes ou em Desenvolvimento**. Eschborn: GÍZ, 2017.

GUEDES, Flávio Leôncio.; JUCÁ, José Fernando; JÚNIOR, Antônio Italcly de Oliveira; JUNIOR, Wilson Ramos Aragão; ARAÚJO, José Antonio Ribeiro. 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, Jonas. **Waste to Energy 2023/2024**. 16. ed. Köln: Ecoprogram, 2023.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014.

KAMI, Eduardo Choozo Arenas. **Análise termoeconômica de sistema híbrido solar térmico integrado à unidade de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2019.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. **What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington: World Bank, 2018. <http://hdl.handle.net/10986/30317>

KOMILIS, Dimitrios; EVANGELOU, Alexandros; GIANNAKIS, Georgios; LYMPERIS, Constantinos. 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, Atul; SAMADER, 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, Ana Carolina Medina. **Análise Técnico Econômica do Processo de Gaseificação de Resíduo Sólido Urbano para a Geração de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do ABC, Santo André. 2016.

LEITÃO, Fabrício Oliveira; PAIVA, Ely Laureano; GUARNIERI, Patrícia; MONTEIRO, Larissa Costa. 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>

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

MAR, Kathleen; UNGER, Charlotte; WALDERDPRFF, Ludmila; BUTLER, Tim. 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>

NAM-CHOL, O.; HYI-SONG, Pak; YONG-CHOL, Sin; YONG-HYOK, Ri; YONG-NAM, Kim. 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 nº11.203, de 10 de Agosto de 2012**: Dispõe sobre a aprovação do plano de gestão integrada de resíduos sólidos do município de Niterói, 2012a.



NITERÓI. Plano Municipal de Resíduos Sólidos de Niterói. 2012b. Disponível em <<https://www.clin.rj.gov.br/SiteCLIN/wp-content/uploads/plano-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos.pdf>> Acesso em 14 abril 2024.

OUDA, Omar; RAZA, Syed Ahmed; NIZAMI, Abdul Sattar; REHAN, Mohammad; AL-WAKED, Rafat; KORRES, Nicholas. Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 328-340, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>

POLI, Dora de Castro Rubio; ZANCHETA, Márcio Nestor; BOARI, Zoroastro de Miranda; MELDONIAN, Nelson Leon; DE MOURA, Claudia Lucia de; JIURGIU, Paulo Adriano. 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>

REZA, Bahareh; SOLTANI, Atousa; RUPARATHINA, Rajeev; SADIQ, Rehan; HEWAGE, Kasun. 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, Cynthia Helena Soares Bouças; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. 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. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v16n2-012>

TRAVEN, Luka. 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>