

EFEITO DAS MELHORIAS NOS ÍNDICES DE COLETA SELETIVA SOBRE O POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA POR COMBUSTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE SANTO ANDRÉ

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-015>

Juliana Tófano de Campos Leite (*), Marília Rodrigues Serra, Kelly Cristina Rosa Drudi, Ísis dos Anjos Silva, Graziella Colato Antonio Zaninetti

* juliana.toneli@ufabc.edu.br

RESUMO

Neste estudo, foi realizada uma avaliação do impacto da variação das taxas da coleta seletiva sobre o potencial de recuperação energética por combustão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do município de Santo André/SP. Foram analisados três cenários, considerando-se as taxas atuais de reciclagem do município e as metas do PLANARES para 2040. A partir de dados secundários sobre a composição gravimétrica e a taxa média de geração de resíduos, para cada cenário de gestão integrada dos resíduos, foi realizado um balanço de massa para determinar a quantidade e a composição dos resíduos destinados às Usinas de Recuperação Energética (UREs). Como esperado, os resultados indicaram que o aumento da coleta seletiva reduz a massa de RSU destinada à URE, influenciando o poder calorífico e diminuindo a energia gerada. A produção anual de eletricidade variou de 68.742,85MWh (cenário 3) a 111.842,18 MWh (Cenário Base), apresentando-se suficiente para suprir o consumo de 27.000 a 45.500 habitantes, se baseando no consumo médio de 205,5kWh/hab/mês em São Paulo. O cenário 3 reduziu a recuperação energética em 13,95%. Embora a coleta seletiva comprometa parcialmente a geração de energia elétrica, ela amplia a vida útil dos aterros e reforça as ações de sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: recuperação energética, combustão direta, coleta seletiva, resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

This study assessed the impact of varying selective collection rates on the potential for energy recovery through combustion of municipal solid waste (MSW) in the municipality of Santo André, São Paulo. Three scenarios were analyzed, considering the municipality's current recycling rates and the PLANARES targets for 2040. Using secondary data on gravimetric composition and average waste generation rate for each integrated waste management scenario, a mass balance was performed to determine the quantity and composition of waste destined for Energy Recovery Units (UREs). As expected, the results indicated that increasing selective collection reduces the mass of MSW destined for UREs, influencing the heat value and decreasing the energy generation. Annual electricity production ranged from 68,742.85 MWh (scenario 3) to 111,842.18 MWh (Base Scenario), which is sufficient to meet the consumption of 27,000 to 45,500 inhabitants, based on an average consumption of 205.5 kWh/inhab/month in São Paulo. Scenario 3 reduced energy recovery by 13.95%. Although selective collection partially compromises electricity generation, it extends the useful life of landfills and reinforces sustainability actions.

KEY WORDS: energy recovery, direct combustion, selective collection, municipal solid waste

INTRODUÇÃO

A geração crescente dos resíduos sólidos urbanos (RSU), alavancada pelo desenvolvimento econômico e pelo crescimento da cultura consumista, concomitante à necessidade de uma economia circular, com menor extração de recursos naturais e aproveitamento integral dos materiais, compõem um cenário desafiador para a gestão integrada desses resíduos. No Brasil, onde a geração per capita de RSU atingiu 1,04 kg/habitante/dia em 2022 (ABRELPE, 2023), estratégias como coleta seletiva e recuperação energética são pautadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES, 2022), com vistas a reduzir a massa de RSU gerada, a qual será quase que exclusivamente destinada a aterros. Santo André, município da Região Metropolitana de São Paulo com 748.919 habitantes e geração diária de 640,02 toneladas de RSU, é reconhecido como um exemplo em políticas públicas que incentivam práticas de sustentabilidade na gestão de resíduos, sendo classificado como a segunda melhor na gestão de resíduos sólidos do Estado de São Paulo, ficando atrás somente de Campinas, segundo o Índice de Sustentabilidade de Limpeza Urbana (ISLU) publicado pela ABREMA, no ano de 2023. Nesta edição, o estudo contemplou a análise de 3.947 cidades, levando em consideração quatro aspectos: engajamento do município; sustentabilidade financeira; recuperação dos resíduos coletados; e impacto ambiental.

A gestão e o gerenciamento dos resíduos no município de Santo André cabem ao Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André – SEMASA, que atende 99,8% dos 118 bairros, divididos em 15 setores com coletas mista e seletiva. As informações estão disponibilizadas no site do SEMASA (2024). O programa de coleta seletiva estruturado no município é resultado da Lei Municipal Nº 7.733 de 1998, que instituiu a Política Municipal de Gestão e Saneamento Ambiental de Santo André, contemplando os seguintes instrumentos:

- Coleta porta a porta, com segregação na fonte, em que os resíduos são separados pela própria população em duas classes: resíduos secos (embalagens, plásticos, papel/papelão, alumínio e vidro) e resíduos úmidos (resíduos de cozinha, resíduos sanitários)
- Estações de coleta de resíduos, chamados ecopontos: locais destinados para a coleta de resíduos recicláveis, entulhos, lixo eletrônico, móveis velhos, pneus, óleo de cozinha, dentre outros, com volume de até 1m³.

O município dispõe de uma ampla rede de ecopontos, que são Estações de Coleta distribuídas pelas diferentes regiões. Segundo dados da prefeitura de Santo André, em 2022, a cidade inaugurou dez novas unidades, aumentando em cerca de 40% a capacidade de recuperação de materiais recicláveis. Essas iniciativas têm como objetivo principal reduzir o descarte irregular de resíduos e aumentar a vida útil do Aterro Sanitário que atende a cidade.

Os resíduos úmidos são compostos majoritariamente por restos de alimentos e resíduos sanitários, misturados às demais categorias de materiais (plástico, papel/papelão, têxteis, materiais inertes e outros) contaminados ou descartados de forma inadequada, uma vez que deveriam ser destinados à coleta seletiva. Segundo dados da última gravimetria realizada no município de Santo André, no ano de 2015 (Gutierrez, 2016), apresentados na Figura 1, essas frações representaram mais de 80% do total dos resíduos gerados, sendo 50,81% de orgânicos e 32,59% de sanitários. A coleta dos resíduos úmidos ocorre três vezes por semana por meio de caminhões modelo compactador e a destinação é o aterro municipal de Santo André. Os resíduos secos, coletados uma vez por semana, são encaminhados em caminhões compactadores para as cooperativas de reciclagem atuantes, onde são triados e comercializados. Atualmente, o sistema de coleta seletiva porta a porta responde por 5% do total dos resíduos coletados no município (SEMASA, 2023)

Atualmente, os resíduos úmidos e os rejeitos das cooperativas do município de Santo André são integralmente destinados ao aterro sanitário municipal, o qual recebe cerca de 630 toneladas diárias de resíduos (SEMASA, SINIR 2019), sendo 0,85kg/dia por habitante. O aterro municipal, que possui uma área de 40 mil m², ficou praticamente fechado entre os anos de 2010 e 2014, tendo sido reaberto após ampliação da área para disposição dos resíduos (SEMASA, 2025). A necessidade de grandes áreas com características adequadas para a disposição final dos resíduos é uma das desvantagens dos aterros sanitários.

Uma possibilidade para aumentar a sua vida útil é a adoção do tratamento de resíduos sólidos por combustão em Usinas de Recuperação Energética (URE), com aproveitamento da energia térmica gerada para a conversão em eletricidade. A recuperação energética de resíduos apresenta como vantagens a redução da massa de resíduos destinada aos aterros sanitários e a contribuição para a diversificação da matriz energética. Para o projeto e dimensionamento dessas usinas, é necessário conhecer as características dos resíduos como combustíveis, especialmente o seu poder calorífico. Nesse sentido, as mudanças nos sistemas de gestão integrada de resíduos sólidos, como o incremento das práticas de coleta seletiva, por exemplo, interferem nas propriedades desses resíduos, de modo que devem ser consideradas pelos gestores durante a seleção das tecnologias a serem adotadas.

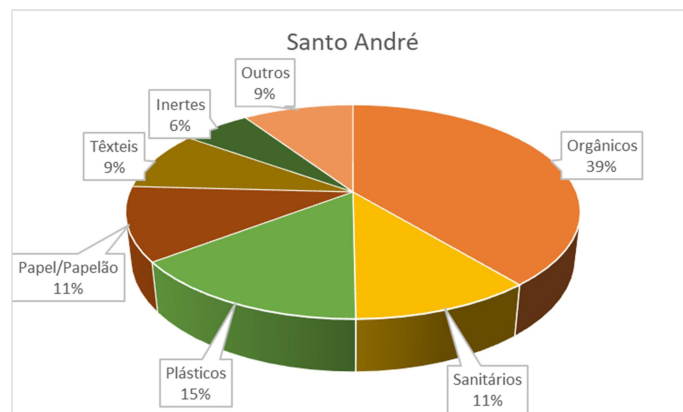


Figura 1. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do município de Santo André- Ano 2015
Fonte: Adaptado de Drudi (2017)

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar o efeito do incremento na coleta seletiva sobre a geração de energia elétrica a partir dos resíduos úmidos. Este trabalho alinha-se ao PLANARES (Plano Nacional de Resíduos Sólidos), que prevê metas de reciclagem até 2040, e analisa três cenários, partindo-se do atual e considerando-se o incremento da coleta seletiva em 5 e 20%.

OBJETIVOS

Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir da combustão direta dos resíduos sólidos urbanos do município de Santo André para diferentes cenários da gestão integrada dos resíduos sólidos municipais, considerando-se melhorias na taxa de coleta seletiva.

METODOLOGIA

Para a elaboração dos cenários a serem estudados neste trabalho, foram consideradas melhorias nas taxas de coleta seletiva, considerando-se três cenários, conforme Quadro 1.

Quadro 1- Definição dos Cenários com base nas taxas de coleta seletiva.
Fonte: Autoras (2025)

Nome	Coleta Seletiva	Referência
Cenário Base (1)	0%	Cenário atual (Santo André)
Cenário 2	5%	Municípios da Região Metropolitana de São Paulo
Cenário 3	20%	Meta PLANARES (2022) para 2040

Para cada um dos cenários propostos, foi realizado um balanço de massa, aplicando-se os índices de referentes à taxa de coleta seletiva e de eficiência de triagem. Com base nesses resultados, foram determinadas as novas composições gravimétricas dos resíduos destinados à coleta seletiva e à Usina de Recuperação Energética (URE). Primeiramente, foram determinadas as massas dos resíduos oriundos das coletas seletiva e indiferenciada, conforme Equações (1) e (2).

$$RSU_{ind} = RSU_{total} - RSU_{seletiva} \quad (1)$$

$$RSU_{seletiva} = TCS \times RSU_{total} \quad (2)$$

Em que: RSU_{ind} = massa de RSU oriundos de coleta indiferenciada (t); RSU_{total} = massa total de RSU coletada no município (t); $RSU_{seletiva}$ = massa de RSU oriundos de coleta seletiva (t); TCS = Taxa de coleta seletiva (%)

Aos resíduos oriundos da coleta seletiva, aplicou-se o índice que representa a eficiência do sistema de triagem para determinar a massa de resíduos reciclados e a massa de rejeitos, conforme Equações (3) e (4). Para esse trabalho, adotou-se a triagem manual, com eficiência de 30%,

$$RSU_{reciclos} = ET \times RSU_{seletiva} \quad (3)$$

$$RSU_{rejeitos} = RSU_{seletiva} - RSU_{reciclos} \quad (4)$$

Em que: $RSU_{rejeitos}$ = massa de rejeitos resultantes do processo de triagem (t); $RSU_{reciclos}$ = massa de RSU destinados ao processo de reciclagem (t); ET = eficiência do processo de triagem (%)

A massa destinada às URE (RSU_{URE}) foi então determinada a partir da Equação (5), como sendo a somatória da massa oriunda da coleta indiferenciada e dos rejeitos do sistema de triagem.

$$RSU_{URE} = RSU_{ind} + RSU_{rejeitos} \quad (5)$$

Em que: RSU_{URE} = Massa de resíduos destinados aos sistemas com recuperação energética (t).

Para determinação da composição gravimétrica dos resíduos destinados à URE, tomaram-se como base a geração anual e a composição gravimétrica inicial (cenário base), de modo a determinar a massa total de cada uma das categorias na massa coletada de resíduos. Na sequência, a partir do cenário base, determinou-se a gravimetria dos recicláveis de cada município, a qual foi tomada como referência padrão no cálculo da massa de cada uma dessas frações no total destinado aos sistemas de coleta indiferenciada e seletiva.

Para o processo de combustão com recuperação energética, considerou-se que a URE pode receber resíduos oriundos de dois fluxos: (1) Coleta Indiferenciada; (2) Coleta Seletiva, seguida de triagem manual. Para estimativa da energia gerada, foi considerada a queima direta por combustão seguida da conversão em energia elétrica. O cálculo da energia gerada foi realizado segundo a Equação (6), proposta por Mamede (2013) e descrita por Dalmo et al. (2019). Para estimar a energia total efetivamente gerada em um ano ($E_{g, total}$), foi considerado um fator de redução que relaciona o número de horas em que a URE opera efetivamente com o número de horas totais em um ano. Foram consideradas 8000h de operação efetiva da usina, o que resulta em um fator de redução de 0,91 (Equação 7).

$$E_g = 0,28 RSU_{comb} PCI_{total} E_e \quad (6)$$

$$E_{g, total} = 0,91 E_g \quad [MWh] \quad (7)$$

Em que: E_g = Energia elétrica gerada [MWh.ano-1]; RSU_{comb} = Massa total das frações combustíveis de RSU destinadas às usinas de recuperação energética, por ano [t. ano-1]; PCI_{total} = Poder Calorífico Inferior dos RSU destinados às usinas de recuperação energética [GJ/kg]; 0,28 = Constante de Conversão de Unidades [MWh.GJ-1]; E_e = Eficiência de transformação da energia térmica para elétrica

Segundo Dalmo et al (2019), a eficiência térmica das plantas de incineração depende de diversos fatores, podendo variar de 25 a 35%. O Poder Calorífico Inferior foi calculado a partir do modelo Proposto por Drudi et al. (2019), que considera os valores da composição gravimétrica e da umidade das diferentes frações combustíveis dos resíduos de Santo André (Equação 8). A composição gravimétrica e a umidade dos resíduos do município de Santo André foram obtidas a partir de dados de Drudi (2017).

$$PCI_{bu} = [(15.420r + 19.14S_a + 32.68P_l + 8.33P_a + 21.51T) \cdot (1 - W)] - (2.442 \cdot W) \quad (8)$$

Em que: PCI = Poder Calorífico Inferior; bu = base úmida; W = umidade; Or = concentração mássica de orgânicos; Sa = concentração mássica de sanitários; Pl = concentração mássica de plásticos; Pa = concentração mássica de papel/papelão; T = concentração mássica de têxteis.

Em função dos cenários propostos, foram considerados diferentes índices de eficiência e reciclagem, que resultaram em diferentes valores para as variáveis RSU_{comb} , **Composição Gravimétrica e Umidade**, interferindo diretamente no valor do PCI_{total} .

RESULTADOS

No Quadro 2 estão apresentados os dados secundários referentes à geração e à gestão de resíduos no município de Itaquaquecetuba, necessários para os cálculos dos balanços de massa e da geração de energia.

Quadro 2. Dados Demográficos e de geração de resíduos do município de Itaquaquecetuba

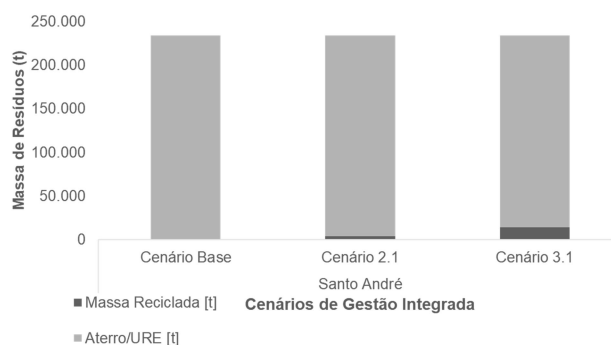
Dado	Santo André	Fonte
População	748.919	IBGE (2022)
Geração anual de resíduos sólidos (t/dia)	640,02	SNIS (2019)
Taxa de Geração de Resíduos (kg/hab.dia)	0,855	Calculado

Na Tabela 1 são apresentados os resultados referentes à massa coletada e à composição gravimétrica dos resíduos sólidos do município de Santo André para cada um dos cenários considerados. A Figura 1 ilustra, de forma comparativa, as massas totais de resíduos reciclados e destinados à URE, para cada um dos cenários avaliados.

Tabela 1. Composição Gravimétrica e geração, em massa, das diferentes categorias de resíduos sólidos urbanos para o município de Santo André.

Fonte: Autoras (2025); Drudi (2019)

Categoria	Cenário Base ^a		Cenário 2		Cenário 3	
	Massa Coletada [t]	Gravimetria	Massa Coletada [t]	Gravimetria	Massa Coletada [t]	Gravimetria
Orgânicos	90.659,56	38,79%	90.659,56	39,38%	90.659,56	47,30%
Sanitários	25.241,64	10,80%	25.241,64	10,96%	25.241,64	13,17%
Plásticos	34.520,28	14,77%	33.243,96	14,44%	29.414,99	10,02%
Papel	25.989,54	11,12%	25.028,63	10,87%	22.145,88	7,54%
Têxteis	20.894,47	8,94%	20.121,94	8,74%	17.804,33	6,07%
Inertes	13.415,47	5,74%	12.919,45	5,61%	11.431,42	3,89%
Outros	22.997,94	9,84%	22.997,94	9,99%	22.997,94	12,00%

**Figura 1. Massa de resíduos Reciclados e destinados às Unidades de Recuperação Energética para diferentes taxas de coleta seletiva, variando de 0 a 20%, com triagem manual a 30% de eficiência. Fonte: Autoras (2025)**

Os dados da Tabela 1 e da Figura 1 demonstram que, como era esperado, o aumento nos índices de coleta seletiva resulta em uma menor massa total e em uma menor proporção recicláveis na composição dos resíduos destinados à URE.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos cálculos da energia elétrica gerada e da sua representatividade em relação ao consumo anual do município, para cada cenário.

Tabela 2. Energia Gerada [MWh/ano] por combustão de RSU, a partir de diferentes cenários de coleta seletiva no município de Santo André, com sistema de triagem manual com 30% de eficiência na recuperação de recicláveis.

Fonte: Autoras

Cenários	Coleta Seletiva	Energia Gerada [MWh/ano]		% do consumo anual do município	
		min	max	min	máx
Base	-	79.887,27	111.842,18	3,80%	5,33%
2	5%	77.852,53	108.993,55	3,71%	5,19%
3	20%	68.742,85	96.239,99	3,27%	4,58%

Os dados da Tabela 2 demonstram que se todo o resíduo do município fosse destinado à URE, seria possível gerar entre 68.000 e 112.000MWh anuais de energia. Considerando-se o consumo mensal médio de 205,5kWh por habitante do Estado de São Paulo, esse montante representa a energia necessária para atender entre 27.000 e 45.500 pessoas, aproximadamente (EPE, 2025). Uma análise dos resultados obtidos para os cenários 2 e 3, em comparação com o cenário base, mostra que o aumento dos índices de reciclagem resultou em reduções progressivas na recuperação energética por combustão, de 2,55 e 13,95%, respectivamente. Isso ocorre porque no processo de coleta seletiva, além de a massa total de resíduos destinada à URE diminuir, são removidas as frações combustíveis com menor umidade e maior poder calorífico.

CONCLUSÕES

A recuperação energética dos resíduos do município de Santo André pelo sistema de tratamento por combustão pode contribuir para geração de energia suficiente para atender até 45.500 habitantes. A separação de recicláveis diminui a geração de energia em até 13,95%, para os índices considerados neste trabalho, porém, contribui para a economia circular, com o aumento da reciclagem

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal do ABC, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil e da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).
Processo nº 2020/12269-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil | 2023. São Paulo, Brasil: ABRELPE, 2023
2. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL(BEN) 2024: Ano Base 2023. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br>. Último acesso: fevereiro 2025
3. DALMO, F.C et.al. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**. V 212, p 461—474, mar.2019
4. DRUDI KCR, DRUDI R, MARTINS G, ANTONIO GC, LEITE JTC. **Statistical model for heating value of municipal solid waste in Brazil based on gravimetric composition**. Waste Manag. 2019 Mar 15;87:782-790. doi: 10.1016/j.wasman.2019.03.012. Epub 2019 Mar 15. PMID: 31109582
5. EPE (Empresa de Pesquisa Energética) **Painel de Monitoramento do Consumo de Energia Elétrica**. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>. Último acesso em março de 2025
6. GUTIERREZ, A.C.G. Caracterização da fração combustível dos Resíduos Sólidos Urbanos úmidos do município de Santo André visando seu aproveitamento energético por processos termoquímicos. 2016.
7. LOPES, L. **Gestão e Gerenciamento Integrados dos Resíduos Sólidos Urbanos – Alternativas para pequenos municípios**. São Paulo: [s.n.].

8. SEMASA. Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André. Disponível em: <http://www.semasa.sp.gov.br>. Acesso em março de 2025.
9. SEMASA. Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André. Semasa em Números. 2023. Disponível em: <https://portais.santoandre.sp.gov.br/semasa/institucional/semasa-em-numeros/>. Acesso em abril de 2025.
10. SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa>. Acesso em março de 2025.