8ºCONRESOL
8º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade
FOZ DO IGUAÇU
• 06 a 08 de Maio de 2025 •

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: EFEITO DAS MELHORIAS NOS ÍNDICES DE COLETA SELETIVA SOBRE O POTENCIAL DE GÁS DE ATERRO NO MUNICÍPIO DE ITAQUAQUECETUBA

DOI: http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XIV-006

Marília Rodrigues Serra (*), Kelly Cristina Rosa Drudi, Isis dos Anjos Silva, Graziella Colato Antonio Zaninetti, Juliana Tófano de Campos Leite.
* Universidade Federal do ABC, marilia.serra@ufabc.edu.br

RESUMO
O estudo visa apresentar a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU), por meio da captação de biogás em aterros sanitários, como uma estratégia relevante para reduzir os gases que são agravantes do aquecimento global, e gerar energia elétrica. Avaliou-se o município de Itaquaquecetuba, o qual não dispõe de coleta seletiva ou cooperativas de triagem, tendo a totalidade de seus resíduos destinados diretamente a aterros sanitários. O estudo sobre o município demonstrou que a contribuição do aproveitamento energético pela utilização do gás de aterro seria suficiente para atender 2400 habitantes da própria cidade. O estabelecimento dos índices de reciclagem utilizados, para realizar propostas sustentáveis sobre a coleta seletiva dos resíduos consonantes com o que prevê a legislação, demonstrou o seu efeito na separação dos recicláveis influenciando na diminuição da geração global teórica do biogás, por considerar que neste trabalho, o modelo do IPCC (2006), que para a estimativa de produção de biogás considera a contribuição do carbono orgânico total vindo deste percentual na composição gravimétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Recuperação energética, Gás de aterro, Resíduos Sólidos Urbanos, Coleta Seletiva, biogás.

ABSTRACT
The study aims to present energy recovery from municipal solid waste (MSW) through biogas capture in landfills as a relevant strategy to mitigate greenhouse gases that exacerbate global warming and generate electricity. The municipality of Itaquaquecetuba was analyzed, which lacks selective waste collection programs or recycling cooperatives, resulting in all its waste being directly disposed of in landfills. The study demonstrated that the energy potential from landfill gas utilization could meet the electricity needs of 2,400 residents within the municipality.The establishment of recycling rates, aimed at developing sustainable proposals for selective waste collection aligned with existing legislation, revealed their impact on recyclable separation, thereby reducing overall theoretical biogas generation. This conclusion was reached by applying the IPCC (2006) model, which estimates biogas production based on the contribution of total organic carbon derived from the gravimetric composition of waste. The model accounts for the percentage of organic material diverted through recycling, thereby reducing the availability of biodegradable waste for methane production.

KEY WORDS: Energy Recovery, Landfill Gas, Urban Solid Waste, Selective Waste Collection, biogas

2 linhas em branco, fonte Times New Roman, tamanho 10

INTRODUÇÃO

No ano de 2022, passados 13 anos da criação da PNRS no Brasil, foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) como um importante instrumento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecendo as diretrizes para gestão integrada a longo prazo. Os mecanismos de gestão são um dos principais eixos do PLANARES e, dentre eles, está a proposta de recuperação energética pela conversão de resíduos sólidos em combustível, energia térmica ou eletricidade, por meio de processos como a digestão anaeróbia, a recuperação de gás de aterro sanitário, a combustão direta ou coprocessamento. A recuperação energética de resíduos sólidos urbanos é uma realidade altamente difundida em países desenvolvidos como Japão, Alemanha e Suécia. Desta forma, a recuperação energética dos resíduos sólidos é uma estratégia que uniria os dois grandes desafios atuais: a geração crescente de RSU nas cidades e a demanda por outras fontes renováveis que venham compor a matriz energética.

A administração dos resíduos no Brasil está sob responsabilidade dos municípios, os quais muitas vezes não possuem suficiente aporte financeiro independente para investir nas áreas de educação ambiental e tecnologias para o seu gerenciamento. Dessa forma, há uma tendência de organização entre os municípios na forma de consórcios públicos (Lopes, 2006). O município de Itaquaquecetuba faz parte da região metropolitana de São Paulo e microrregião de Mogi das Cruzes e é membro consorciado do CONDEMAT- Consórcio de Desenvolvimento dos Municípios do Alto Tiête - que é responsável pelo planejamento microrregional e prestação de serviços nas diversas áreas de desenvolvimento dos municípios, e é responsável por garantir a elaboração do Plano Municipal de Resíduos Sólidos (PMRS) dos municípios consorciados. Apesar disto, Itaquaquecetuba não conta com iniciativas de coleta seletiva ou tratamento de seus resíduos, sendo a sua totalidade disposta em aterros sanitários.

O estudo de gravimetria do município foi realizado no ano de 2018, a partir da análise dos resíduos gerados em 23 setores de coleta, dos quais 86% apresentaram mais de 20% de plásticos na composição gravimétrica de seus RSU (Toneli et al., 2018). Os resultados do estudo gravimétrico estão apresentados na Figura 1. A média observada para a presença de plásticos nos resíduos foi de 22,80%, dos quais considera-se que ao menos 12,09% sejam passíveis de reciclagem. Esse valor está acima dos 16,8% observados na média nacional (ABREMA, 2022), o que é um reflexo da ausência de coleta seletiva, de modo que aproximadamente 48% do volume total dos RSU poderiam receber outra destinação, que não os aterros sanitários.

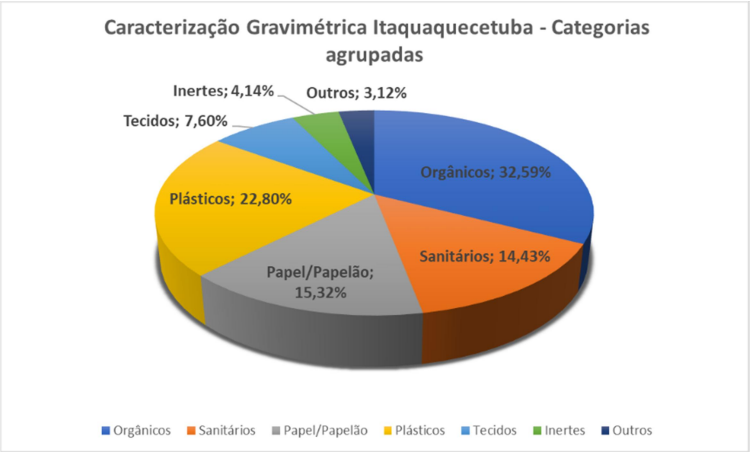

Figura 1: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Itaquaquecetuba, no ano de 2018. Fonte: Toneli, et al. (2018).

Uma vez que os resíduos têm os aterros sanitários como destino, a recuperação energética do gás de aterro que é naturalmente gerado consiste em uma forma de exploração da tecnologia outrora implementada somente para a disposição final. Se, por um lado, a Política Nacional de Resíduos Sólidos preconiza o fechamento de lixões a céu aberto e quer assegurar que todos os municípios façam o descarte somente de rejeitos no aterro sanitário, algo precisa ser feito a respeito dos aterros já em operação. A captura de biogás para a geração de energia, cria uma fonte de receita que pode reduzir a pressão por políticas de redução de resíduos na fonte ou retardo em investimentos em economia

circular, tornando-o financeiramente viável para recepção contínua de resíduos e não somente rejeitos. Torna-se importante ressaltar que o aproveitamento do biogás, neste sentido, é uma solução paliativa, cujo valor ambiental deve estar condicionado à transição para modelos sustentáveis a longo prazo, porém, enquanto existirem aterros, a captura do metano torna-se crucial para a mitigação de impactos.

Neste sentido, o presente estudo teve o objetivo de avaliar o efeito do aumento dos índices de reciclagem sobre a geração de energia elétrica pela recuperação do gás de aterro, para o município de Itaquaquecetuba.

OBJETIVO

Estimar o potencial de recuperação energética por gás de aterro no município de Itaquaquecetuba para diferentes cenários da gestão integrada dos resíduos sólidos municipais, considerando-se melhorias na taxa de coleta seletiva e dos índices de reciclagem.

METODOLOGIA

Tomando-se como ponto de partida o cenário atual de gestão de resíduos do município, foram realizadas propostas de cenários de gestão integrada, considerando-se a combinação de diferentes sistemas coleta e triagem, consonantes com o que prevê a legislação, para que essa abordagem se encontre alinhada com as diretrizes de recuperação energética do PLANARES (Brasil, 2022), que estabelece metas a longo prazo. Os cenários estão sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1- Definição dos Cenários de gestão integrada dos RSU com base nas taxas de coleta seletiva
Fonte: Autores

Nome	Coleta Seletiva	Referência
Cenário Base (1)	0%	Cenário atual (Itaquaquecetuba)
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 proposta (manual e mecanizada). Com base nesses resultados, foram determinadas as novas composições gravimétricas dos resíduos destinados ao aterro, bem como dos resíduos destinados à reciclagem.

Primeiramente, foram determinadas as massas dos resíduos oriundos das coletas seletiva e indiferenciada, conforme Equações (1) e (2).

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

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

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).

$$\boldsymbol{RSU_{reciclados} = ET \times RSU_{seletiva}} \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{RSU_{rejeitos} = RSU_{seletiva} - RSU_{reciclados}} \qquad (4)$$

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

A massa destinada aos aterros sanitários (RSU_{AT}) 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.

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

Em que: RSU_{AT} = Massa de resíduos destinados aos sistemas com recuperação energética (t).
Para determinação da composição gravimétrica dos resíduos destinados aos aterros, tomou-se como base a composição gravimétrica inicial dos resíduos (cenário base) para 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 avaliação da recuperação da energia do biogás, foi considerada a sua queima em motores de combustão interna com posterior conversão em energia elétrica. Para a estimativa do volume de metano gerado a partir dos resíduos dispostos nos aterros sanitários, tomou-se como base o modelo teórico proposto pelo *Intergovernamental Panel on Climate Change* (IPCC) (IPCC, 1996), definido nas Equações (6) e (7).

$$Q_{CH4} = \frac{Pop_{urb} RSU_{taxa} RSU_f L_O}{\rho_{CH4}} \quad (6)$$

$$L_0 = FCMxCODxCOD_f xFx \left(\frac{16}{12}\right) \quad (7)$$

Em que: Q_{CH4} = volume de metano gerado no aterro em 1 ano [m^3 CH_4. ano^{-1}]; Pop_{urb} = População do município [hab]; RSU_{taxa} = Taxa de geração de RSU do município [kg . hab^{-1} ano^{-1}]; RSU_f = Fração mássica dos RSU que é efetivamente disposta nos aterros [kg dispostos no aterro. kg^{-1} gerados] ; L_0 = Potencial de geração de metano dos RSU [kg de CH4.kg^{-1} de RSU]; ρ_{CH4} = densidade do Metano [kg/m^3]; FCM = Fator de correção de metano [%]; COD = carbono orgânico degradável presente nos RSU [kg de COD. kg^{-1} de RSU]; COD_f = Fração dissociável de COD [%]; F = fração volumétrica de CH_4 no biogás de aterro; 16/12 = Fator de conversão de carbono em metano [kg CH_4 . kg^{-1} de C]

Para estimar a energia elétrica resultante da queima do biogás em conjuntos moto-geradores, foram utilizadas as equações (8) e (9), seguindo a metodologia descrita por Dalmo et al. (2019).

$$P_t = \frac{Q_{CH4} PCI_{CH4}}{t} \eta_{cH4} \quad (8)$$

$$E_{disponível} = P_t \eta_{motor} NHT \quad (9)$$

Em que: P_t = Potência Térmica gerada na queima de CH_4 nos motores [kW]; PCI_{CH4} = Poder Calorífico Inferior do Metano [kJ/Nm^3 de CH4]; t = Fator para conversão de tempo: anos em segundos [s . ano^{-1}]; η_{CH4} = eficiência da coleta de metano nos aterros; η_{motor} = eficiência térmica dos motores de combustão interna; NHT = número de horas efetivamente trabalhadas em um ano, considerando-se as paradas para manutenção.

Os valores para os parâmetros das equações (6) a (9) foram definidos em função de dados do IPCC (1996) e de Dalmo et al. (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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	Itaquaquecetuba	Fonte
População	369.275	IBGE (2022)
Geração anual de resíduos sólidos (t/dia)	249,76	SNIS (2019)
Taxa de Geração de Resíduos (kg/hab.dia)	0,675	Calculado

Na Tabela 1 são apresentados os resultados referentes à massa coletada e à composição gravimétrica dos resíduos sólidos do município de Itaquaquecetuba para cada um dos cenários considerados. A Figura 2 ilustra, de forma comparativa, as massas totais de resíduos reciclados e destinados aos aterros sanitários, para cada um dos cenários avaliados.

Os dados da Tabela 1 e da Figura 2 demonstram que, como era esperado, o aumento nos índices de coleta seletiva resulta em uma menor proporção recicláveis na composição dos resíduos destinados aos aterros. Com isso, observa-se uma redução entre 1,5% (cenário 2) e 6% (cenário 3) da massa total destinada aos aterros, com consequente aumento na sua vida útil. Para que essa melhora seja mais significativa, faz-se necessário considerar maiores eficiências nos sistemas de triagem, além de índices mais expressivos de coleta seletiva.

Tabela 1. Geração, em massa, das diferentes categorias de resíduos sólidos urbanos para o município de Itaquaquecetuba.

(Fonte: Autoras)

Categoria	Cenário Base		Cenário 2		Cenário 3	
	Massa Coletada [t]	Gravimetria	Massa Coletada [t]	Gravimetria	Massa Coletada [t]	Gravimetria
Orgânicos	29.650,42	32,59%	29.650,42	33,09%	29.650,42	34,67%
Sanitários	13.128,43	14,43%	13.128,43	14,65%	13.128,43	15,35%
Plásticos	20.743,47	22,80%	20.119,42	22,45%	18.247,26	21,34%
Papel	13.938,16	15,32%	13.518,84	15,09%	12.260,88	14,34%
Têxteis	6.914,49	7,60%	6.706,47	7,48%	6.082,42	7,11%
Inertes	3.766,58	4,14%	3.653,26	4,08%	3.313,32	3,87%
Outros	2.838,58	3,12%	2.838,58	3,17%	2.838,58	3,32%

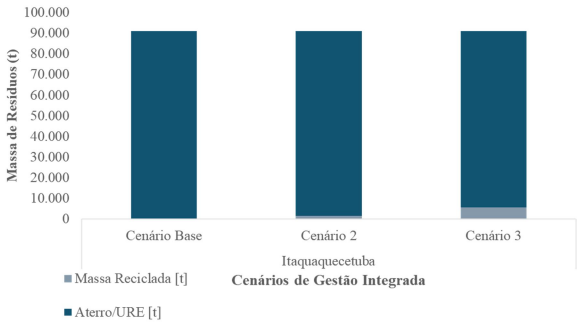

Figura 2: Massa de resíduos reciclados e destinados aos aterros sanitários, para o municípios de Itaquaquecetuba, para os diferentes Cenários de Gestão Integrada. Fonte: Autoras

Os dados da recuperação energética por gás de aterro estão apresentados na Tabela 2. Os valores máximo e mínimo se referem a diferentes índices de coleta de metano, sendo que o valor máximo, correspondente a uma eficiência 50% e o mínimo, de 10%.

Tabela 2. Energia Gerada [MWh/ano] por gás de aterro, a partir dos cenários consolidados para o município de Itaquaquecetuba

(Fonte: Autora)

Cenários	Coleta Seletiva	Energia Gerada [MWh/ano]		Representatividade	
		min	max	min	máx
Base	-	1.151,11	5755,55	0,11%	0,56%
2	**5%**	1.141,17	5705,86	0,11%	0,55%
3	**20%**	1.111,36	5556,79	0,11%	0,54%

Segundo dados do censo IBGE de 2022, Itaquaquecetuba é um município com 369.275 habitantes que geram 249,76 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos, resultando em um montante anual de 91.162,4 toneladas. Uma primeira análise dos resultados da Tabela 2 demonstra que se todo o resíduo do município fosse destinado a um aterro sanitário com sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, seria possível gerar entre 1.150 e 5.800MWh anuais de energia oriunda de fonte renovável. 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 450 e 2.400 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 do gás de aterro, de 0,86 e 3,45%, respectivamente. Esse resultado demonstra que apesar de a coleta seletiva não envolver a separação de orgânicos e sanitários, outros resíduos que contribuem para a digestão anaeróbia também são segregados, refletindo em uma redução na energia gerada. Isso ocorre também porque o modelo do IPCC considera o COD presente nas amostras de têxteis, papel e papelão. Essas variações devem ser previstas nos sistemas, porém, são irrelevantes quando considerados os benefícios ambientais, sociais e energéticos da reciclagem.

CONCLUSÕES

A recuperação energética do gás de aterro do município de Itaquaquecetuba pode contribuir para geração de energia renovável suficiente para atender até 2400 habitantes, se considerada uma eficiência de 50% na coleta de metano. A separação de recicláveis diminui a geração de energia em até 3,5%, para os índices considerados neste trabalho

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. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL(BEN) 2024: Ano Base 2023. Disponível em: https://ben.epe.gov.br. Último acesso: fevereiro 2025
2. 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
3. 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
4. EPE (Empresa de Pesquisa Energática) **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
5. IPCC. International panel on climate change. In: **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Workbook. 1996.

6. LOPES, L. **Gestão e Gerenciamento Integrados dos Resíduos Sólidos Urbanos – Alternativas para pequenos municípios.** São Paulo: [s.n.].

7. Malheiros, R., Campos, A.C., Oliveira, D.G., Souza, H.A. **Utilização de resíduos orgânicos por meio da compostagem como metodologia de ensino de Gestão e Educação Ambiental.** Anais V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Belo Horizonte: IBEAS, 2014. Disponível em: http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2014/VII-028.pdf. Acesso: 15 de abril de 2016.

8. Toneli, J. T. C. L.; Martins, G.; Antonio, G. C.; Marana, K. B. B.; Drudi, K. C. R.; Fratta, K. D. S. A. Caracterização Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos de Itaquaquecetuba. Reltaório Técnico. Santo Andre, 2018