

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA (ACV) DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XII-014>

Sophia Fernanda da Silva Souza*, Kelly Danielly da Silva Alcântara Fratta, Marco Aurelio Cinaqui Amaral, Juliana Tófano de Campos Leite, Graziella Colato Antonio Zaninetti

*Universidade Federal do ABC (UFABC), Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Email: sophia.fernanda@aluno.ufabc.edu.br

RESUMO

A Lei nº 12.305/10 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos e estabelece desde mudanças de comportamento da população até o comprometimento das empresas com o próprio resíduo produzido. De acordo o Panorama da ABRELPE (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente) 2022, a geração de resíduos sólidos no Brasil foi de 217 mil toneladas/dia, ou 81,8 milhões de toneladas/ano. É incontestável que o volume de resíduos sólidos urbanos continuará a crescer, portanto são necessárias políticas públicas e tecnologias adequadas para dar a destinação correta a estes resíduos. Segundo a PNRS, deve ser observada a seguinte ordem de hierarquia de gestão: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Com foco nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi realizar uma avaliação do ciclo de vida (ACV) de tratamentos de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU), buscando analisar os impactos ambientais associados a cada processo. A partir dos dados obtidos com a ACV, foi utilizada a análise SWOT (*strength, weakness, opportunity, threat*) para uma melhor compreensão das vantagens e desvantagens de cada método, a fim de serem identificadas possíveis melhorias e metodologias mais adequadas para a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Os resultados obtidos apontaram que processos bioquímicos tendem a ser mais benéficos ambientalmente, enquanto processos termoquímicos são mais vantajosos do ponto de vista energético. Numa análise geral, entendeu-se que o cenário que aliou processos bioquímicos e termoquímicos, no caso biodigestão anaeróbia, coleta de gás de aterro para reaproveitamento energético e incineração, obteve melhor desempenho. Portanto, para uma melhor gestão de RSU, do ponto de vista energético e ambiental, é importante a integração de diferentes soluções e tratamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Recuperação energética, Digestão anaeróbia, Processo bioquímico, Análise de ciclo de vida, Processo termoquímico.

ABSTRACT

The law No. 12.305/10 establishes the National Solid Waste Policy (PNRS), outlining its principles, objectives, and instruments, as well as guidelines for integrated management and solid waste handling. It establishes measures ranging from changes in public behavior to companies' responsibility for the waste they generate. According to the 2022 Panorama by ABRELPE (Brazilian Association of Waste and Environment), solid waste generation in Brazil reached 217 thousand tons per day, or 81.8 million tons per year. It is undeniable that the volume of urban solid waste will continue to grow; therefore, public policies and appropriate technologies are needed to ensure proper waste disposal. According to the PNRS, the following waste management hierarchy should be observed: prevention, reduction, reuse, recycling, treatment of solid waste, and environmentally sound final disposal of residues. Focusing on this context, the objective of this research was to conduct a life cycle assessment (LCA) of urban solid waste energy recovery treatments to analyze the environmental impacts associated with each process. Based on the data obtained from the LCA, a SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) analysis was conducted to better understand the advantages and disadvantages of each method, aiming to identify possible improvements and more suitable methodologies for energy recovery from urban solid waste. The results indicated that biochemical processes tend to be more environmentally beneficial, while thermochemical processes are more advantageous from an energy perspective. Overall, the scenario combining biochemical and thermochemical processes—specifically anaerobic digestion, landfill gas collection for energy recovery, and incineration—showed the best performance. Therefore, for better urban solid waste management from both an energy and environmental perspective, integrating different solutions and treatments is essential.

KEY WORDS: Energy recovery, Anaerobic digestion, Biochemical process, Life cycle assessment, Thermochemical process.

INTRODUÇÃO

O grau de complexidade da gestão de resíduos sólidos se eleva à medida que o aumento do poder de compra, em conjunto com o crescimento populacional corroboram para o crescimento da geração de resíduos. Proporcionalmente, surgem preocupações econômicas e ambientais, à medida que o processo de geração excessiva de resíduos reflete o desperdício de recursos materiais e energéticos ao longo da cadeia produtiva e, muitas vezes, contribui para a geração de gases do efeito estufa e contaminações.

Dentro do contexto dos resíduos sólidos, os resíduos sólidos urbanos (RSU) constituem uma conjuntura especialmente urgente. Segundo o Panorama da ABRELPE 2022 (ABRELPE, 2022) a geração foi de 2224 mil toneladas/dia de RSU no país, ou 81,8 milhões de toneladas/ano, totalizando uma média de 1,043 kg de resíduos por dia por brasileiro. E apesar do constante esforço para o desenvolvimento de um escopo legislativo que vá de encontro às necessidades nacionais quanto ao gerenciamento de RSU, como a promulgação da Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o âmbito executivo ainda falha em aplicar estratégias adequadas.

A legislação brasileira também incentiva o reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos gerados no país. A prática ainda é embrionária no Brasil, uma vez que exige uma cadeia de coleta e pré-tratamento bem estruturada para o melhor aproveitamento do potencial energético dos resíduos. Em um país cuja coleta seletiva é incipiente e boa parte dos resíduos sólidos são enviados a aterros e lixões, há uma maior necessidade de investimento para a concretização eficaz da aplicação da lógica waste-to-energy. No entanto, é importante a valorização dessa prática, à medida que dá aporte a ambas as preocupações nacionais: destinação de RSU e geração de energia limpa.

A avaliação de ciclo de vida vem se tornando uma forte ferramenta na compreensão dos ganhos e perdas ao longo de uma cadeia produtiva. Esse instrumento se estrutura a partir de uma metodologia com passos bem definidos, a fim de garantir uma padronização do processo. Assim, seu uso pode ser particularmente empregado para a visualização das vantagens e desvantagens do ponto de vista energético, econômico e ambiental de cada possível destinação para os resíduos sólidos urbanos, permitindo uma análise comparativa entre diferentes cenários.

Diante do exposto, pretende-se utilizar a ACV para analisar diferentes rotas de recuperação energética (bioquímica e termoquímica) de resíduos sólidos urbanos, focando principalmente nas melhorias ambientais causadas pela utilização destas tecnologias.

OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi avaliar a análise do ciclo de vida (ACV) de diferentes tecnologias de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos (RSU). Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar os diferentes tipos de tratamentos para a recuperação energética dos RSU;
- Avaliar e comparar os impactos ambientais ocasionados pelos diferentes tratamentos de recuperação energéticas dos RSU.

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo foi dividida em três partes, sendo a primeira uma revisão bibliográfica e coleta de dados, seguida pela utilização do software IWM-2 (*Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory, Second Edition*) para avaliar o ciclo de vida e aplicação da análise SWOT (*strength-weakness opportunity-threat*) para comparação dos impactos dos processos de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Para a realização da análise comparativa, elegeu-se a gestão de resíduos no município de Santo André para um estudo de caso.

Para uma melhor análise entre os diferentes processos de tratamento de resíduos sólidos optou-se por diferentes cenários. Os cenários apresentam etapas de triagem e reciclagem, considerando que esses processos já fazem parte da realidade da gestão de resíduos andreeense, e são fases essenciais para possíveis tratamentos, bioquímicos e termoquímicos. Foram escolhidos 5 cenários, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos cenários estudados

Fonte: Elaboração própria

CENÁRIO	1	2	3	4	5
TRIAGEM	X	X	X	X	X
RECICLAGEM	X	X	X	X	X
DIGESTÃO ANAERÓBIA		X	X		X
COMPOSTAGEM		X			
INCINERAÇÃO				X	X
ATERRO SANITÁRIO	X	X	X	X	X

Os valores de proporção de RSU destinados a cada tratamento foram determinados pelo próprio software, a partir das quantidades de resíduos orgânicos e secos, e os materiais que podem ser aproveitados de cada processo. O usuário só seleciona as porcentagens de participação de cada método de tratamento. As proporções utilizadas em cada cenário são apresentadas a seguir:

Cenário 1: Esse cenário passa pelos processos de triagem, reciclagem e disposição final em aterro com coleta de gás de aterro e tratamento de lixiviado. A porção total de RSU equivale a 302.524 toneladas, das quais 3,53% (10.674 toneladas) são reaproveitadas durante o processo de reciclagem e 96,47% (291.850 toneladas) são enviadas ao aterro sanitário.

Cenário 2: Nesse cenário, a porção total de 302.524 toneladas de RSU é encaminhada para triagem, 3,53% (10.674 toneladas) são reaproveitadas durante o processo de reciclagem. A porção orgânica é encaminhada para tratamento bioquímico, sendo 29,67% da porção total de RSU (89.757 toneladas) destinadas a compostagem e 29,67% (89.757 toneladas) enviadas para digestão anaeróbica. O rejeito total enviado ao aterro sanitário equivale a 37,13% (112.336 toneladas).

Cenário 3: Nesse cenário, o RSU passa pelos processos de triagem, reciclagem e biodigestão anaeróbica, com rejeito encaminhado a aterro sanitário com coleta de gás de aterro e tratamento de lixiviado. A porção total de 302.524 toneladas de RSU é encaminhada para triagem, 3,53% (10.674 toneladas) são reaproveitadas durante o processo de reciclagem. Da porção orgânica, 59,33% (179.513 toneladas) passam por processo por digestão anaeróbica. O rejeito total enviado ao aterro sanitário equivale a 37,13% (112.336 toneladas).

Cenário 4: Nesse cenário são considerados os processos de triagem, reciclagem e tratamento termoquímico por incineração, com rejeito destinado a aterro com coleta de gás e tratamento de lixiviado. A porção total de 302.524 toneladas de RSU é encaminhada para triagem, 3,53% (10.674 toneladas) são reaproveitadas durante o processo de reciclagem. Da porção total, 24,53% (74.253 toneladas) são incineradas e restam desse processo 0,08% (260 toneladas) de materiais ferrosos que passam por processo de reciclagem. O rejeito total enviado ao aterro sanitário equivale a 71,84% (217.337 toneladas).

Cenário 5: Esse cenário passa pelas etapas de triagem, reciclagem, biodigestão anaeróbica e incineração, com rejeito destinado a aterro com recuperação energética e tratamento de lixiviado. A porção total de 302.524 toneladas de RSU é encaminhada para triagem, 3,53% (10.674 toneladas) são reaproveitadas durante o processo de reciclagem. Da porção total, 59,33% (179.513 toneladas) são enviadas tratadas por digestão anaeróbica e 24,54% (74.253 toneladas) são incineradas e 0,08% (260 toneladas) equivalem aos materiais ferrosos que sobram desse processo e foram reaproveitados por reciclagem. O rejeito total enviado ao aterro sanitário equivale a 12,50% (37.824 toneladas).

Os dados de entrada utilizados na parte de geração de resíduos foram retirados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Santo André de 2017 (PMGIRS) e o estudo gravimétrico divulgado pelo SEMASA com ano base de 2015. No entanto, há um desacordo entre a forma como os dados são requeridos no software e a forma como são apresentados no estudo gravimétrico utilizado. O estudo

gravimétrico andreense não apresenta os valores específicos para resíduos comerciais e institucionais, portanto essa seção foi desconsiderada. Considerando esses fatores, os dados de entrada foram inseridos de acordo com os dados apresentados na Tabela 2 e na Figura 1.

Tabela 2. Dados de entrada utilizados no software

Fonte: Elaboração própria

Tipo de dado	Valor	Referência
População	715.231	PMGIRS- Santo André
Média de pessoas por residência	2,7	IBGE
Tonelada de resíduos gerados por uma pessoa durante um ano	398,9	Dado adaptado do PMGIRS- Santo André
Toneladas de resíduos de poda em um ano	17.155	Dado adaptado do PMGIRS- Santo André

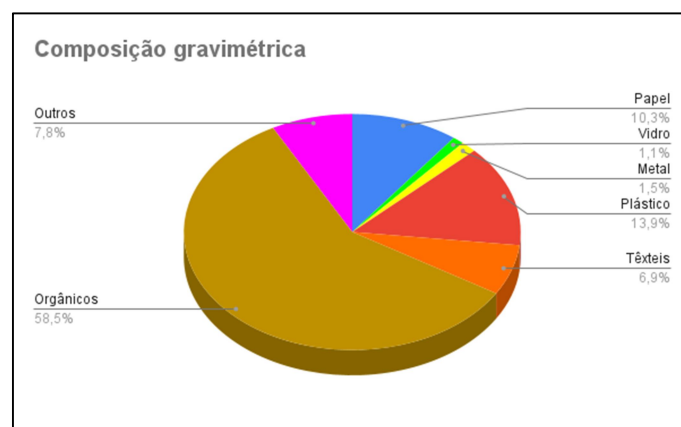


Figura 1: Composição gravimétrica do município de Santo André. Fonte: Elaboração própria.

O software também exige a entrada de dados específicos acerca do sistema de coleta do município estudado. Foi considerado um sistema de coleta seletiva, 100% porta a porta, além disso também foi considerado que há certo grau de separação de materiais para a reciclagem.

Os dados de resíduos enviados à reciclagem, por residência anualmente, foram baseados no estudo gravimétrico de 2015, que apresenta a quantidade de resíduos com potencial de reciclagem. Para o estudo, foi considerado um cenário em que 30% desses resíduos fossem enviados para as cooperativas de reciclagem de Santo André. Esse valor foi baseado no estudo de Reichert (2014), no caso optou-se por um cenário ligeiramente mais otimista, com valor 5% maior. Considerando esses parâmetros, os valores finais foram 19,48 kg de plástico, 3,06 kg de metal e 21,29 kg de papel enviados para reciclagem, por residência, ao longo de um ano.

Grande parte dos valores necessários para o inventário dos processos de tratamento bioquímico, termoquímico e aterro sanitário já são determinados previamente pela aplicação. No entanto, adicionaram-se os dados de eficiência do tratamento de lixiviado de 90,7% (ARAÚJO ET AL, 2020), o valor de eficiência de recuperação energética em processos de incineração de 20% (LIMA, 1994) e a porcentagem de 10% materiais ferrosos recuperados das cinzas resultantes da incineração (ŠYC, M. ET AL, 2020).

A parte que procede à coleta dos dados fornecidos pelo software IWM-2 refere-se ao cálculo de indicadores. Para a análise do impacto ambiental resultante dos diferentes cenários foi utilizada a metodologia proposta por Den Boer et al. (2005, apud Da Rosa; Reichert, 2017), em que o resultado dos indicadores é obtido a partir da massa das substâncias significativas para cada categoria de impacto, multiplicada pelo respectivo potencial de impacto. Os potenciais de impacto utilizados foram os fornecidos pela base de dados CML-IA, da Universidade de Leiden. Quanto aos valores de consumo energético, foi utilizado diretamente o valor de GJ calculado pelo software IWM-2. Na Tabela 3 são apresentados os valores de emissões consideradas para cada categoria de impacto.

Tabela 3. Dados de entrada utilizados no software**Fonte: Elaboração própria**

Categoria de impacto	Emissões atmosféricas consideradas	Emissões hídricas consideradas
Mudanças climáticas	CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O	-----
Toxicidade humana	Partículas, NO _x , N ₂ O, SO _x , HCl, HF, H ₂ S, amônia, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, zinco, dioxinas, fenóis	Arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, zinco
Formação de foto-oxidantes	CO, CH ₄ , NO _x , SO _x	-----
Toxicidade do solo	Arsênio, cádmio, cromo, cobre, dioxinas, HF, chumbo, mercúrio, níquel, zinco	Dioxinas, mercúrio
Acidificação	Amônia, NO _x , SO _x	-----

A partir do cálculo dos indicadores aplica-se a normalização desses resultados, que consiste na divisão dos valores por um determinado parâmetro. Nesse caso, utilizou-se os valores fornecidos por De Bruijn, Van Duin e Huijbregts (2014), em que a referência é dada pelos resultados mundiais de cada categoria de impacto em 1995, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de normalização utilizados**Fonte: De Bruijn, H.; Van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J. (2014)**

Categoria de impacto	Mundo, 1995
Mudanças climáticas (kg CO ₂ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	6.830
Toxicidade humana (kg 1,4-diclorobenzeno eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	8.800
Formação de foto-oxidantes (kg C ₂ H ₄ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	8,04
Acidificação (kg SO ₂ eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	52,9
Uso de energia (GJ energia eq·ano ⁻¹ ·cap ⁻¹)	72,0

A fim de ampliar a visualização dos impactos ambientais resultantes de cada cenário, é possível fazer uma análise atribuindo pesos a cada categoria de impacto. Essa é uma etapa opcional da análise de ciclo de vida e não há uma especificação quanto aos pesos que devem ser atribuídos a cada indicador de impacto, sendo uma escolha arbitrária de acordo com os objetivos da ACV realizada. Foram escolhidos os seguintes pesos fornecidos por De Bruijn, Van Duin e Huijbregts (2014):

Tabela 5. Pesos considerados na análise**Fonte: De Bruijn, H.; Van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J. (2014)**

Categoria de impacto	Peso
Formação de foto oxidantes	0,8
Mudanças climáticas	2,4
Toxicidade humana	1,1
Acidificação	1,3

Destaca-se que o consumo energético não está descrito na tabela de pesos de impacto ambiental, pois será considerado separadamente do critério ambiental.

A análise SWOT (strenght-weakness opportunity-threat) foi utilizada com o intuito de analisar e comparar os principais pontos dos processos de recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos. Esta análise é dividida em dois grupos principais: ambiente interno e externo. Sendo composta por quatro divisões distintas, podendo ser avaliadas a curto, médio e longo prazo.

RESULTADOS

Os resultados obtidos para cada categoria de impacto apresentam valores negativos para os cenários que trouxeram menores impactos ao meio ambiente, portanto são benéficos, ou menos danosos. Já os valores positivos refletem um impacto maior, portanto causam malefícios ao meio ambiente. Os valores de consumo energético estão apresentados de maneira análoga, nos quais valores negativos refletem um menor consumo e maior produção energética, enquanto valores positivos significam que houve maior gasto energético ao longo dos processos desse cenário.

Também é necessário ressaltar que o software IWM-2 considera compostos orgânicos gerados em etapas bioquímicas um produto de reciclagem. Por isso, cenários que apresentam produção de composto refletem menos impacto na categoria de reciclagem.

Os resultados obtidos para cada categoria de impacto são apresentados nas Tabelas 6 a 9 e Figuras 2 a 5.

Tabela 6. Resultado da categoria mudanças climáticas (kg CO₂ eq·ano⁻¹·cap⁻¹)

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Triagem	Tratamento bioquímico	Tratamento termoquímico	Aterro	Reciclagem	Total
1	2,05	0,00	0,00	22.102,7	-1.071,30	21.033,53
2	2,05	-64,93	0,00	4.714,34	-1.574,95	3.081,18
3	2,05	-171,56	0,00	4.714,34	-1.519,36	3.184,45
4	2,05	0,00	22.105,50	17.886,7	-1.143,68	2.6518,05
5	2,05	-171,56	22.105,54	498,34	-1.591,74	-1.415,24

Comparando as diferentes etapas, nota-se que, em todos os cenários, reciclagem e tratamento bioquímico corroboram para a diminuição dessa categoria de impacto. Infere-se, pela comparação entre os resultados do cenário 2 e 3, que o tratamento bioquímico realizado integralmente por digestão anaeróbia reduz mais significativamente os impactos de mudança climática em comparação com a compostagem. Já as etapas de tratamento termoquímico e aterro sanitário são as que mais contribuem para as mudanças climáticas.

Observa-se também, a partir dos dados do cenário 5, que o tratamento da porção orgânica por biodigestão anaeróbia, aliado ao tratamento de resíduos secos por combustão direta, gera uma redução significativa na quantidade de resíduos destinados a aterro sanitário, contribuindo para o bom desempenho desse cenário

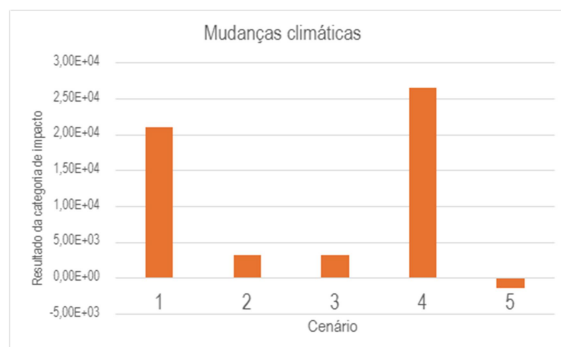


Figura 2: Gráfico comparativo dos resultados para a categoria de mudanças climáticas entre os diferentes cenários. Fonte: Elaboração própria.

Na categoria de mudanças climáticas, o cenário 4 apresentou o maior impacto, seguido do cenário 1. Quanto aos cenários de tratamento bioquímico, 2 e 3 obtiveram resultados semelhantes nessa categoria de impacto, com ligeira vantagem do cenário 3.

O cenário 5 destaca-se como o único que apresentou resultados negativos para essa categoria de impacto, tornando-se o mais vantajoso para a redução das contribuições para mudanças climáticas durante o gerenciamento de RSU.

Tabela 7. Resultado da categoria toxicidade humana (kg 1,4-diclorobenzeno eq·ano-1 ·cap-1)

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Triagem	Tratamento bioquímico	Tratamento termoquímico	Aterro	Reciclagem	Total
1	0,18	0,00	0,00	-2,56	0,52	-1,86
2	0,18	-5,91	0,00	-0,16	-1,27	-7,16
3	0,18	-15,55	0,00	-0,17	-1,07	-16,60
4	0,18	0,00	205,32	-2,34	0,31	203,48
5	0,18	-15,55	205,32	0,07	-1,27	188,76

As etapas de tratamento termoquímico por incineração apresentam os maiores valores de impacto de toxicidade humana, à medida que emitiram maiores quantidade de substâncias tóxicas para a saúde humana como amônia, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, manganês, mercúrio, níquel e zinco.

Já nas fases de aterros sanitário, assim como na etapa de tratamento bioquímico, há uma redução desses impactos. A partir da comparação de desempenho das etapas bioquímicas dos cenários 2 e 3, observa-se que, assim como na categoria de mudanças climáticas, a biodigestão anaeróbia integral dos RSU é mais benéfica para a redução da toxicidade humana do que a biodigestão anaeróbia aliada à compostagem. Nota-se também que, assim como na categoria de impacto anterior, a presença de uma etapa de tratamento bioquímico para tratamento dos resíduos orgânicos, em conjunto com uma etapa de incineração dos resíduos secos, é mais benéfica ambientalmente que o tratamento apenas por processos termoquímicos.



Figura 3: Gráfico comparativo dos resultados para a categoria de toxicidade humana entre os diferentes cenários. Fonte: Elaboração própria.

Os cenários que envolvem incineração apresentam altos valores de impacto, sendo o cenário 5 ligeiramente menos danoso. Os cenários 3, 2 e 1 refletiram, respectivamente, os melhores valores totais para essa categoria.

Tabela 8. Resultado da categoria formação de foto-oxidantes (kg C₂H₄eq·ano-1 ·cap-1)

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Triagem	Tratamento bioquímico	Tratamento termoquímico	Aterro	Reciclagem	Total
1	0,36	0,00	0,00	1.819,98	-335,96	1.484,39
2	0,36	-10,06	0,00	395,34	-392,73	-7,09
3	0,36	-27,39	0,00	395,34	-6980,91	-6612,60
4	0,36	0,00	-69,88	1.470,06	-356,27	1.044,28
5	0,36	-27,39	-69,88	45,42	-406,73	-458,21

As etapas de aterro sanitário apresentam, em todos os cenários, os maiores valores para a categoria de impacto de formação de foto-oxidantes, pois destacaram-se na emissão de monóxido de carbono, metano e óxidos de nitrogênio.

Portanto, as etapas de tratamento bioquímico, que contribuem significativamente para a redução da emissão dessas substâncias, apresentaram melhor desempenho nessa categoria de impacto. Destaca-se, novamente, a etapa bioquímica realizada integralmente por biodigestão anaeróbia, que demonstrou melhores resultados em comparação com a etapa bioquímica realizada por compostagem e biodigestão anaeróbia.



Figura 4: Gráfico comparativo dos resultados para a categoria de formação de foto-oxidantes entre os diferentes cenários. Fonte: Elaboração própria.

Nota-se um desempenho amplamente melhor para o cenário 3, seguido do cenário 5. Enquanto o pior desempenho para essa categoria de impacto foi o apontado pelo cenário 1.

Tabela 9. Resultado da categoria acidificação (kg SO₂ eq·ano⁻¹ ·cap⁻¹)

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Triagem	Tratamento bioquímico	Tratamento termoquímico	Aterro	Reciclagem	Total
1	1,12	0,00	0,00	-7,66	-980,44	-986,98
2	1,12	-30,08	0,00	16,95	-1.236,22	-1.248,23
3	1,12	-82,49	0,00	16,95	-1.206,98	-1.271,40
4	1,12	0,00	-240,19	-13,38	-1.005,81	-1.258,27
5	1,12	-82,49	-240,19	11,23	-1.233,18	-1.543,52

Os maiores valores de acidificação são emitidos nas etapas de aterro sanitário, e etapas de triagem. Destacam-se como as etapas mais benéficas ambientalmente nessa categoria: a reciclagem, incineração e tratamentos bioquímicos, especialmente a biodigestão anaeróbia.

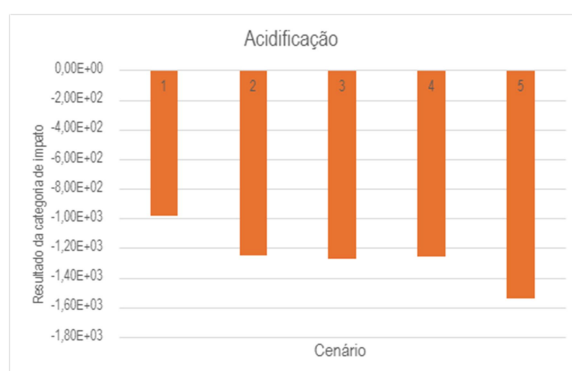


Figura 5: Gráfico comparativo dos resultados para a categoria acidificação entre os diferentes cenários. Fonte: Elaboração própria.

A partir da figura 10, observa-se que os cenários 2,3 e 4 apresentam valores próximos entre si. Já os cenários 1 e 5 destacam-se como o pior e melhor cenário na categoria de acidificação, respectivamente. Como citado previamente, optou-se pela aplicação de um sistema de pesos para a compreensão do impacto ambiental geral de cada cenário. Após a aplicação de pesos, nota-se que o cenário 5 apresenta o melhor desempenho ambiental, sendo o único cenário que resulta em impactos ambientais negativos. Esse resultado positivo se dá ao fato de que uma parcela considerável de seus

resíduos é destinada ao tratamento por digestão anaeróbia, que além de possibilitar um aproveitamento energético pela produção de biogás e produzir um composto que pode ser reaproveitado, demonstrou-se uma etapa ambientalmente benéfica para todas as categorias de impacto. Além disso, o tratamento de resíduos secos por incineração diminui a quantidade de RSU enviados ao aterro sanitário, etapa que apresentou resultado não satisfatórios para muitas categorias de impacto.

Tabela 10. Impacto ambiental geral por cada cenário

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Resultado
1	5,04E+04
2	5,76E+03
3	6,82E+02
4	6,31E+04
5	-5,56E+03

Os cenários que resultaram em maior impacto ambiental foram os cenários 4 e 1, respectivamente.

A Tabela 11 e a Figura 6 apresentam a avaliação sobre o consumo energético.

Tabela 11. Resultados de consumo energético em GJ para cada cenário

Fonte: Elaboração própria

Cenário	Triagem	Tratamento bioquímico	Tratamento termoquímico	Aterro	Reciclagem	Total
1	19,54	0,00	0,00	-3.520,38	-2.616,89	-5.847,72
2	19,54	-629,11	0,00	-670,22	-2.616,89	-3.896,68
3	19,54	-1.648,11	0,00	-670,22	-2.616,89	-4.915,68
4	19,54	0,00	-4.289,03	-2639,29	-2.700,07	-9.608,85
5	19,54	-1.648,11	-4.289,03	-59,14	-2.700,07	-8.676,81

Nota-se que as etapas que apresentam maiores ganhos energéticos são as de tratamento termoquímico por combustão direta. Além disso, destaca-se a capacidade de reaproveitamento energético da coleta de gás de aterro, evidenciada principalmente no cenário 1. As etapas de biodigestão anaeróbia e reciclagem também apresentam desempenho energético satisfatório.

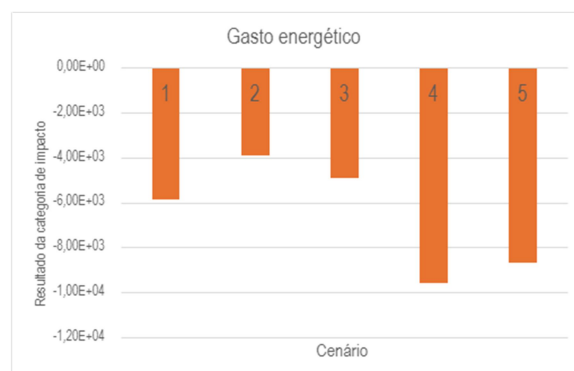


Figura 6: Gráfico comparativo dos resultados de consumo energético para os diferentes cenários. Fonte: Elaboração própria.

Analisando os resultados totais dos 5 cenários, nota-se que o cenário 4 resulta na maior produção energética, em virtude das suas etapas de combustão direta e recuperação energética de gás de aterro. Em seguida, o cenário 5 demonstra o segundo melhor desempenho energético, combinando etapas de recuperação por coleta de gás de aterro, biogás produzido por biodigestão anaeróbia e combustão direta dos resíduos secos.

O cenário de menor produção energética foi o cenário 2, já que a etapa de compostagem não permite recuperação energética como as demais tecnologias.

Os principais fatores considerados para a análise SWOT aplicada aos diferentes cenários são os resultados de impacto ambiental, desempenho energético e possíveis dificuldades de gestão e aplicação desses cenários.

Cenário 1:

- Pontos fortes: trata-se de um processo com menos etapas, o que acarreta numa menor dificuldade de gerenciamento.
- Pontos fracos: apresentou os piores valores para as categorias de impacto de acidificação e formação de foto oxidantes, além de ser o segundo pior cenário considerando os impactos ambientais gerais (com aplicação dos pesos).
- Ameaças: os custos de implementação de um aterro sanitário com sistema adequado de tratamento de lixiviados e captação de gás de aterro para reaproveitamento energético são altos e exigem estudos elaborados. Além disso, o aterro tem um tempo de vida útil.
- Oportunidades: esse cenário permite valores de produção energética relativamente altos, sendo o terceiro melhor cenário nessa categoria.

Cenário 2:

- Pontos fortes: é um cenário que apresenta baixos resultados de impacto ambiental, sendo o terceiro melhor resultado considerando os impactos ambientais gerais.
- Pontos fracos: o processo de compostagem exige esforços operacionais constantes, à medida que as leiras de compostagem devem ser revolvidas com frequência para permitir que as reações bioquímicas ocorram dentro dos níveis de oxigenação necessários. Além disso, esse cenário apresenta os menores valores de produção energética.
- Ameaças: tratamento bioquímicos exigem uma triagem adequada dos resíduos, certas contaminações ocasionalmente podem ocorrer e dificultar o processo. Além disso, a compostagem exige níveis adequados de umidade e temperatura, o que gera certa dependência das condições climáticas.
- Oportunidades: esse cenário possibilita a produção de 80.781 toneladas de composto que pode ser comercializado.

Cenário 3:

- Pontos fortes: é um cenário com bons resultados de impacto ambiental, sendo o segundo melhor considerando os impactos ambientais gerais. Além disso, destaca-se como o cenário que apresentou valores amplamente menores de formação de foto-oxidantes, em comparação com os demais.
- Pontos fracos: não apresenta desempenhos energéticos tão altos, em comparação com outros cenários.
- Ameaças: tratamento bioquímicos exigem uma triagem adequada dos resíduos, certas contaminações ocasionalmente podem ocorrer e dificultar o processo.
- Oportunidades: esse cenário possibilita a produção de 71.805 toneladas de composto que pode ser comercializado. Além disso, mesmo que em menor escala em comparação com outros cenários, há o reaproveitamento energético.

Cenário 4:

- Pontos fortes: a combustão direta dos resíduos diminui seu volume e peso com maior eficiência.
- Pontos fracos: é o cenário com piores desempenhos ambientais, sendo o que contribui mais significativamente para as mudanças climáticas e toxicidade humana.
- Ameaças: o ideal é evitar a presença de resíduos úmidos no processo de combustão para manter as condições e processo. Além disso, a instalação de um incinerador com tecnologias de redução de emissão de gases inertes é custosa.
- Oportunidades: esse cenário apresenta as maiores oportunidades de recuperação energética dos resíduos. Além da combustão direta possibilitar o reaproveitamento de suas cinzas e a reciclagem de uma pequena porcentagem de materiais ferrosos que resta desse processo.

Cenário 5:

- Pontos fortes: esse cenário resulta nos menores valores de impacto ambiental, sendo o único que apresenta menores resultados de acidificação e mudanças climáticas. Além disso, alia aspectos positivos dos demais cenários, como a redução do volume de resíduos por incineração.
- Pontos fracos: esse cenário apresenta valores altos de toxicidade humana.
- Ameaças: é o cenário com mais etapas, o que exige critérios rigorosos de triagem e gerenciamento operacional de cada processo.

- Oportunidades: esse cenário apresenta a segunda melhor oportunidade de recuperação energética dos resíduos, provenientes das etapas de incineração, geração de biogás por digestão anaeróbia e coleta de gás de aterro. Além disso, a incineração possibilita o reaproveitamento de suas cinzas e a reciclagem de uma pequena porcentagem de materiais ferrosos que resta desse processo, enquanto a biodigestão anaeróbia também permite o aproveitamento do composto resultante desse processo.

A partir da análise SWOT é possível visualizar que o cenário 5 destaca-se como o mais vantajoso para o contexto do gerenciamento de RSU no município de Santo André. Apesar das preocupações quanto à toxicidade humana e as dificuldades operacionais, o cenário torna-se vantajoso à medida que apresenta bons resultados para outras categorias de impacto como mudanças climáticas. Além disso, esse cenário apresenta o segundo melhor desempenho energético, além de possibilitar a produção de composto e diminuir a quantidade de resíduos enviados ao aterro sanitário.

CONCLUSÕES

A partir da comparação de cenários com maior ênfase em processos bioquímicos, como os cenários 2 e 3, e o cenário com maior ênfase no processo termoquímico de incineração, nota-se que processos bioquímicos tendem a apresentar maiores vantagens do ponto de vista ambiental. Enquanto processos termoquímicos destacam-se quanto ao potencial de recuperação energética dos resíduos. A coleta de gás de aterro para recuperação energética também se demonstrou uma alternativa interessante, à medida que o cenário 1 apresentou o terceiro melhor desempenho de consumo energético.

No entanto, os resultados da análise SWOT enfatizam que a melhor alternativa para o gerenciamento de RSU é uma abordagem que integre diferentes processos de tratamento e recuperação energética. Os resultados do cenário 5, único que apresentou valor geral de impactos ambientais negativo, demonstraram as vantagens da combinação das etapas de biodigestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário com coleta de gás para recuperação energética.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal do ABC (UFABC), 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 FAPESP nº 2020/12269-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo. 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: nov. 2023.
2. ARAÚJO, L. G. S. DE et al. Avaliação da eficiência do tratamento de lixiviado de um aterro sanitário. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e564974466, 2020.
3. **CML-IA characterisation factors**. Disponível em: <<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>>. Acesso em: 20 maio. 2024.
4. DE BRUIJN, H.; VAN DUIN, R.; HUIJBREGTS, M. A. J. **Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards**. 2002. ed. [s.l.] Plenum Publishing Corporation, 2014.
5. DA ROSA, Artur Rech; REICHERT, Geraldo Antônio. **III-037-MODELAGEM EM ACV PARA A ESCOLHA DE SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA UM MUNICÍPIO DE GRANDE PORTE**, 2017
6. IBGE. **Santo André (SP)**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/santo-andre.html>>. Acesso em: 18 maio. 2024.
7. LIMA, Andre Xavier. **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica de Uma Usina de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos no ABCD**. 1994. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
8. MCDOUGALL, F. R. et al. (EDS.). **Integrated solid waste management: A life cycle inventory**. [s.l.] Wiley, 2001.
9. REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. **Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos**. Engenharia sanitária e ambiental, v. 19, n. 3, p. 301–313, 2014.
10. SEMASA. **PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Disponível em: <<https://www.semasa.sp.gov.br/wp-content/uploads/2018/12/PMGIRS-Santo-Andre%C3%A9.pdf>>.
11. ŠYC, M. et al. Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. **Journal of hazardous materials**, v. 393, n. 122433, p. 122433, 2020.