REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

QUANTIFICAÇÃO DE EMISSÕES DE CO_2EQ EM DIFERENTES CENÁRIOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

QUANTIFICATION OF CO_2 E EMISSIONS IN DIFFERENT ORGANIC SOLID WASTE MANAGEMENT SCENARIOS

CUANTIFICACIÓN DE LAS EMISIONES DE CO_2EQ EN DIFERENTES ESCENARIOS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

Graziela Pinto de Freitas
Doutora
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9447-3743
E-mail: grazielaapfreitas@gmail.com

Maria José de Holanda Leite
Doutora em Ciências Florestais
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), Brasil
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4154-3901
E-mail: maryholanda@gmail.com

Ana Cecília Novaes de Sá
Doutora
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4939-8844
E-mail: ananovaees1@gmail.com

Gracielle Ferreira de Souza
Mestra
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6634-5018
Orcid: graciellef.souzaa@hotmail.com

Resumo

A gestão inadequada dos resíduos sólidos orgânicos constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, sobretudo em função das elevadas emissões de gases de efeito estufa associadas ao modelo tradicional de disposição em aterros sanitários. Nesse contexto, o presente estudo é relevante por evidenciar, de forma quantitativa, o potencial de tecnologias sustentáveis, como os biodigestores, na mitigação das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) e na promoção de práticas alinhadas à Economia Circular. Diante disso, o objetivo do trabalho foi quantificar as emissões de CO_2eq em diferentes cenários de gestão e tratamento de resíduos sólidos orgânicos, avaliando a contribuição do uso de biodigestores no contexto da Economia Circular. A metodologia baseou-se em um estudo de caso desenvolvido em um restaurante localizado no município de São Luís–MA, envolvendo a caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos gerados, a coleta de dados in loco, a extrapolação anual das informações e a estimativa das emissões por meio da ferramenta nacional de cálculo de gases de efeito estufa no manejo de resíduos sólidos. Foram simulados três cenários de gestão, contemplando diferentes combinações de aterro sanitário, biodigestão anaeróbia, compostagem, reciclagem e aproveitamento energético do biogás, além da aplicação da análise SWOT para avaliação das forças, fraquezas, oportunidades

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

e ameaças associadas ao uso de biodigestores. Os resultados demonstraram que o cenário com maior dependência do aterro sanitário apresentou os maiores níveis de emissões de CO_2eq, enquanto os cenários que priorizaram o tratamento biológico dos resíduos orgânicos e o aumento das taxas de reciclagem promoveram reduções expressivas dessas emissões. O cenário com maior eficiência na coleta e no aproveitamento energético do biogás destacou-se como o mais eficiente, apresentando maior geração de créditos ambientais e menor impacto climático. Conclui-se que a adoção de biodigestores, associada à redução da disposição em aterros sanitários e ao fortalecimento da reciclagem, configura-se como uma estratégia ambientalmente viável para a gestão de resíduos orgânicos. Recomenda-se o fortalecimento de políticas públicas, investimentos em infraestrutura, incentivos econômicos, capacitação técnica e ações de educação ambiental, visando ampliar a adoção de tecnologias de tratamento biológico e consolidar práticas sustentáveis fundamentadas nos princípios da Economia Circular.
Palavras-chave: Economia Circular; Biodigestão Anaeróbia; Pegada de Carbono.

Abstract

Inadequate management of organic solid waste constitutes one of the main contemporary environmental challenges, especially due to the high emissions of greenhouse gases associated with the traditional model of disposal in sanitary landfills. In this context, the present study is relevant as it quantitatively demonstrates the potential of sustainable technologies, such as biodigesters, to mitigate carbon dioxide equivalent (CO_2eq) emissions and to promote practices aligned with the Circular Economy. Therefore, the objective of this study was to quantify CO_2eq emissions under different scenarios of organic solid waste management and treatment, evaluating the contribution of biodigester use within the Circular Economy framework. The methodology was based on a case study conducted in a restaurant located in the municipality of São Luís, Maranhão, Brazil, involving the gravimetric characterization of the generated solid waste, on-site data collection, annual extrapolation of the information, and estimation of emissions using the national greenhouse gas calculation tool for solid waste management. Three management scenarios were simulated, comprising different combinations of sanitary landfill disposal, anaerobic digestion, composting, recycling, and energy recovery from biogas, in addition to the application of SWOT analysis to assess the strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with biodigester use. The results showed that the scenario with the greatest reliance on sanitary landfills presented the highest levels of CO_2eq emissions, whereas scenarios prioritizing biological treatment of organic waste and increased recycling rates promoted significant emission reductions. The scenario with the highest efficiency in biogas collection and energy recovery stood out as the most effective, presenting greater generation of environmental credits and lower climate impact. It is concluded that the adoption of biodigesters, combined with the reduction of landfill disposal and the strengthening of recycling practices, represents an environmentally viable strategy for organic waste management. The study recommends strengthening public policies, investments in infrastructure, economic incentives, technical training, and environmental education actions to expand the adoption of biological treatment technologies and consolidate sustainable practices based on the principles of the Circular Economy.
Keywords: Circular Economy; Anaerobic Digestion; Carbon Footprint.

Resumen

La gestión inadecuada de los residuos sólidos orgánicos constituye uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos, especialmente debido a las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al modelo tradicional de disposición en vertederos sanitarios. En este contexto, el presente estudio es relevante al evidenciar de manera cuantitativa el potencial de tecnologías sostenibles, como los biodigestores, para mitigar las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) y promover prácticas alineadas con la Economía Circular. En este sentido, el objetivo del estudio fue cuantificar las emisiones de CO_2eq en diferentes escenarios de gestión y tratamiento de residuos sólidos orgánicos, evaluando la contribución del uso de biodigestores dentro del marco de la Economía Circular. La metodología se basó en un estudio de caso desarrollado en un restaurante ubicado en el municipio de São Luís, Maranhão, Brasil, que incluyó la caracterización gravimétrica de los residuos sólidos generados, la recolección de datos in situ, la extrapolación anual de la información y la estimación de las emisiones mediante la herramienta nacional de cálculo de gases de efecto invernadero para la gestión de residuos sólidos. Se simularon tres escenarios de gestión, que contemplaron diferentes combinaciones de disposición en vertedero

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

sanitario, digestión anaerobia, compostaje, reciclaje y aprovechamiento energético del biogás, además de la aplicación del análisis SWOT para evaluar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas asociadas al uso de biodigestores. Los resultados demostraron que el escenario con mayor dependencia del vertedero sanitario presentó los niveles más altos de emisiones de CO_2eq, mientras que los escenarios que priorizaron el tratamiento biológico de los residuos orgánicos y el aumento de las tasas de reciclaje promovieron reducciones significativas de dichas emisiones. El escenario con mayor eficiencia en la captación y el aprovechamiento energético del biogás se destacó como el más eficiente, presentando una mayor generación de créditos ambientales y un menor impacto climático. Se concluye que la adopción de biodigestores, asociada a la reducción de la disposición en vertederos sanitarios y al fortalecimiento del reciclaje, constituye una estrategia ambientalmente viable para la gestión de residuos orgánicos. Se recomienda fortalecer las políticas públicas, las inversiones en infraestructura, los incentivos económicos, la capacitación técnica y las acciones de educación ambiental, con el fin de ampliar la adopción de tecnologías de tratamiento biológico y consolidar prácticas sostenibles fundamentadas en los principios de la Economía Circular.
Palabras clave: Economía Circular; Digestión Anaerobia; Huella de Carbono.

1. Introdução

A gestão de Resíduos Sólidos (RS) caracteriza-se como sendo um dos principais desafios da sociedade, visto que o modelo econômico atual é baseado em uma economia linear, ou seja, produção, consumo e descarte. Esse modelo, acoplado ao consumismo da população, tem como consequência o aumento da geração de RS (Bruhn et al., 2023).

No ano de 2020 a economia foi impactada pela pandemia da COVID-19, pois com o objetivo de conter o vírus foram tomadas medidas emergenciais que influenciaram negativamente este setor. No âmbito ambiental, também pode-se perceber um forte impacto negativo em decorrência da geração de resíduos sólidos, visto que a população passou por alterações de mudanças de hábitos (Mohammed *et al.* 2021).

Diante deste cenário, Mohammed et al. (2021) relatam que a pandemia de 2020 aumentou a necessidade de uma alteração no modelo de crescimento econômico, dando ênfase aos conceitos da Economia Circular (EC), pois os impactos decorrentes do modelo de crescimento, assim como o elevado grau de consumismo devem ser devidamente ponderados e bem gerenciados, de maneira que não comprometa a integridade ambiental das futuras gerações.

A utilização exagerada dos recursos naturais e, consequentemente, a geração de resíduos, dentre os quais os orgânicos, tem feito parte de um sistema linear, que não está mais sustentando por si. Em resposta a essa situação adversa de gerenciamento dos recursos do modelo linear tradicional, alguns governos e empresas, estão buscando inovar na questão de gestão, buscando um novo modelo econômico, onde a EC vem recebendo destaque (Michelini *et al.* 2017; Mandpe *et al*. 2022).

A EC caracteriza-se como sendo uma solução alternativa e viável para romper com o paradigma do modelo linear. As pressões exercidas nos recursos naturais pela sociedade, exige uma reorientação do modelo econômico atual, logo se faz necessário aplicar uma metodologia de produção-consumo que esteja de acordo com o desenvolvimento sustentável (Ghisellini *et al.* 2016).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Na busca por um novo modelo alternativo para o desenvolvimento de práticas de gestão de RS e, consequentemente, na mudança de comportamento da sociedade, no que diz respeito à produção de bens para consumo, pode-se citar o aumento da geração de resíduos sólidos (RS) orgânicos e inorgânicos que são um dos principais problemas da atualidade (Margaritis, 2018).

Os RS são materiais resultantes das atividades humanas, que podem ser reciclados e parcialmente utilizados, gerando entre outros benefícios, proteção à saúde pública, economia de energia e de recursos naturais. De acordo com estimativa do Banco Mundial (2018), a taxa de geração anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) alcançou o marco de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas, onde um terço não é tratado em condições adequadas e que, seguindo essa tendência, tal montante irá aumentar 70% até 2050, chegando aos 3,4 bilhões de toneladas por ano (Kaza *et al.* 2018).

Em se tratando de Brasil, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, estimou que foram coletados no ano de 2022 mais de 63,8 milhões de toneladas de RS, deste total, apenas 73,7% são dispostos em aterro sanitário. No Brasil, os RS são formados em média por 65% de Resíduos Sólidos Orgânicos - RSO (BRASIL, 2024).

Os resíduos sólidos orgânicos (RSO) quando não tratados e descartados aleatoriamente, podem causar situações adversas ao meio ambiente, devido à elevada produção de biogás e chorume. Cabe ressaltar ainda que estudos técnicos e científicos demonstraram que a gestão tradicional baseada no aterro sanitário contribui para o incremento das emissões dos gases de efeito estufa (GEE), potencial de contaminação a médio e longo prazo e manutenção onerosa após o encerramento da operação (PLANSAB, 2019). Desta forma, estes resíduos devem receber tratamento ambientalmente adequado.

Assim, surge a necessidade de implantação eficiente de medidas que visem o correto tratamento de tais resíduos. O tratamento dos resíduos pelo processo de digestão anaeróbia – DA com a utilização de biodigestores vem se mostrando bastante eficiente e de baixo custo. Neste tipo de tratamento, busca-se a estabilização da matéria orgânica. O processo de DA gera o biogás, que é rico em metano (CH_4), entre 50 - 75%, e pode ser aproveitado energeticamente (Zahan; Maazuza; Othman, 2019).

Para Aboudi et al. (2020), devido a produção do biogás gerado na DA do tratamento RSO, este processo apresenta-se como sendo relevante para a transição do sistema linear para uma EC. Stanchev et al. (2020) apontam que a DA apresenta benefícios diretos no âmbito ambiental, e indiretos no social e econômico.

Diante do exposto, o trabalho aqui apresentado, justifica-se pela elevada quantidade de RSO gerados diariamente, acoplado aos possíveis impactos ambientais produzidos pelo processo de decomposição de tais resíduos quando esses são dispostos em locais inadequados. Vale ressaltar que os RSO quando tratados corretamente, deixam de ser um passivo ambiental e passam a serem introduzidos na cadeia produtiva, saindo do contexto linear (produção, consumo, descarte), passando a ser introduzidos nos paradigmas da EC.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Diante deste cenário, se faz necessário o estudo de métodos de gerenciamento dos RS com foco na sustentabilidade. Esses métodos devem ser capazes de lidar com todos os materiais no fluxo de geração economicamente viável, socialmente aceitável e sustentável de forma a não comprometer as necessidades da atual e futuras gerações, bem como ter foco na preservação, reutilização e reciclagem de recursos, em detrimento da eliminação destes (Bui et al., 2022).

A EC busca mitigar problemas ambientais tornando a sustentabilidade mais realista com perspectiva de futuro mais sustentável, pois transforma os processos lineares em um sistema que recicla, processa e renova materiais (SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2016; AKERMAN, HUMALISTO; PITZEN, 2020).

Esse estudo almejou responder a seguinte pergunta: (i) a introdução de biodigestores no modelo de gestão e tratamento de RSO reduz as emissões de CO_2eq emitidas ao meio ambiente?

O objetivo geral deste estudo foi quantificar as emissões de CO_2eq em diferentes cenários propostos para a gestão e tratamento dos RSO em um restaurante, localizado na cidade de São Luís-MA/Brasil, no ano de 2023, assim como analisar as implicações do uso de biodigestores no contexto da EC. Para atingir esse objetivo, a pesquisa reuniu os objetivos específicos: a seguir: a) apontar estratégias para aprimorar a implementação e adoção dos biodigestores na EC; b) estimar a quantidade de CO_2eq da geração de RS de um restaurante através de diferentes cenários de gerenciamento e c) analisar criticamente as vantagens e limitações do uso de biodigestores no tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos e sua eficácia na sustentabilidade através do método SWOT;

2 Material e Métodos

A presente pesquisa foi desenvolvida sobre duas perspectivas distintas. Na primeira fase do trabalho aqui apresentado, optou-se por desenvolver uma pesquisa empírica através do método análise SWOT, e na segunda fase, realizou-se um estudo de caso em uma organização que utiliza RSO como forma de matéria prima para produção de energia através de biodigestores. Com isso, buscou-se apresentar uma visão mais detalhada da utilização de biodigestores voltados para a EC, assim como as emissões de CO_2 que são emitidas no tratamento dos RS. Esta avaliação foi realizada através da simulação de possíveis cenários da gestão e tratamento de RS. As etapas adotadas para o cumprimento do procedimento metodológico utilizados podem ser observadas no fluxograma (Figura 1).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

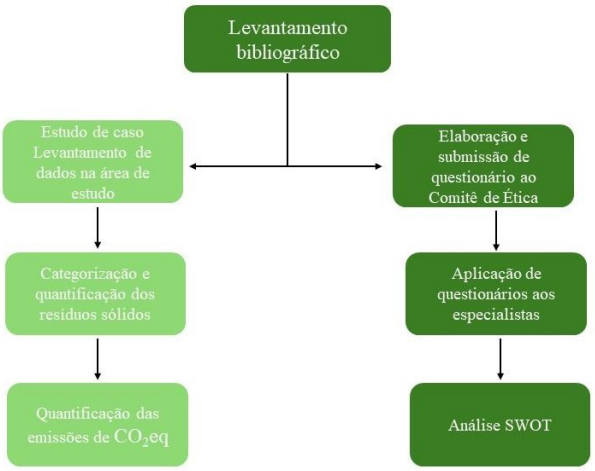


Figura 1. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa. Fonte: Autores (2024)

2.1 Coleta e estimativa dos dados para quantificação das emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE)

Foi realizada a caracterização dos RS de um restaurante localizado na cidade de São Luís – MA. Por razões de confidencialidade e respeito à privacidade do estabelecimento em questão (Lei de Proteção de Dados nº 13.709/2018), optou-se por mencioná-lo como sendo: restaurante A. Um dos principais motivos que se levou a selecionar o restaurante A como parte do objeto de pesquisa, foi o fato de que ele utiliza um biodigestor para o tratamento dos RSO, como observado na Figura 2.



Figura 2. Biodigestor modelo canadense utilizado no Restaurante A. Fonte: Autores (2023)

O biodigestor aqui mencionado tem dimensões do sistema de 400x180x150 cm, volume do tanque de gás 2500 litros, e volume do tanque de digestão anaeróbia 4300 litros. Este recebe uma quantidade diária de resíduos orgânicos de cozinha que chega até 10 kg/dia, o que gera de 4 a 6 horas por dia de cozimento e de 10 a 100 litros de biofertilizante.

Esse sistema é de suma relevância e interesse do estudo aqui apresentado, visto que se alinha aos objetivos de sustentabilidade ambiental, assim como demonstra um compromisso com uma gestão consciente de resíduos, podendo, provavelmente, ter impactos significativos na redução da pegada de carbono e,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

consequentemente, na conservação dos recursos naturais. Outro fator que influenciou na escolha deste restaurante foi sua localização estratégica, pois esta permitiu acessar facilmente o local para a coleta de dados e interagir com a equipe de gestão e funcionários.

A coleta de dados foi realizada no período de julho a setembro de 2023, dentro do restaurante A, que produz em média 110 refeições/dia, no horário do almoço. Com relação ao estoque, foram separados todos os resíduos sólidos (embalagens) produzidos em virtude de alimentos que foram confeccionados no próprio dia, como também dos alimentos que foram retirados das suas embalagens originais que chegaram ao estoque, porém impróprias ao armazenamento (papelão, vidro, plástico poroso, papel, isopor, madeira, metal).

Para caracterização dos dados, abordou-se como base a metodologia utilizada por Silva; Soares e Rossoni (2021). A coleta de dados *in loco* foi realizada por um período de dois meses, durante os quais foram coletados dados referentes a caracterização dos RS. O processo de coleta de dados consistiu principalmente na identificação e pesagem dos resíduos produzidos durante o período de estudo. Essa abordagem detalhada permitiu quantificar de forma precisa a quantidade de RS gerados no intervalo de tempo mencionado. Para pesagem dos RS utilizou-se a balança comercial digital Songhe Tools SH90901-J 40kg com escala de 5g (Figura 3).



Figura 3. Balança para pesagem dos resíduos. Fonte: Autores (2023)

A categorização dos resíduos foi realizada com base em sua natureza e potencial para reciclagem. Os resíduos foram divididos em duas categorias principais: Resíduos Orgânicos - RO: esta categoria englobou os RS provenientes dos gêneros alimentícios utilizados na confecção dos cardápios durante o período do estudo. Incluíam cascas de frutas, restos de vegetais, sobras de alimentos, entre outros resíduos orgânicos de origem alimentar. Em se tratando dos resíduos orgânicos também se levou em consideração os resíduos de jardins.

Resíduos Recicláveis: nos resíduos recicláveis realizou-se a pesagem de papel, papelão, plástico, têxteis, vidro e metais (Lafuente Junior, 2012). Esses materiais foram separados e pesados individualmente para determinar a quantidade específica de cada tipo de resíduo reciclável gerado no restaurante (Figura 4).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

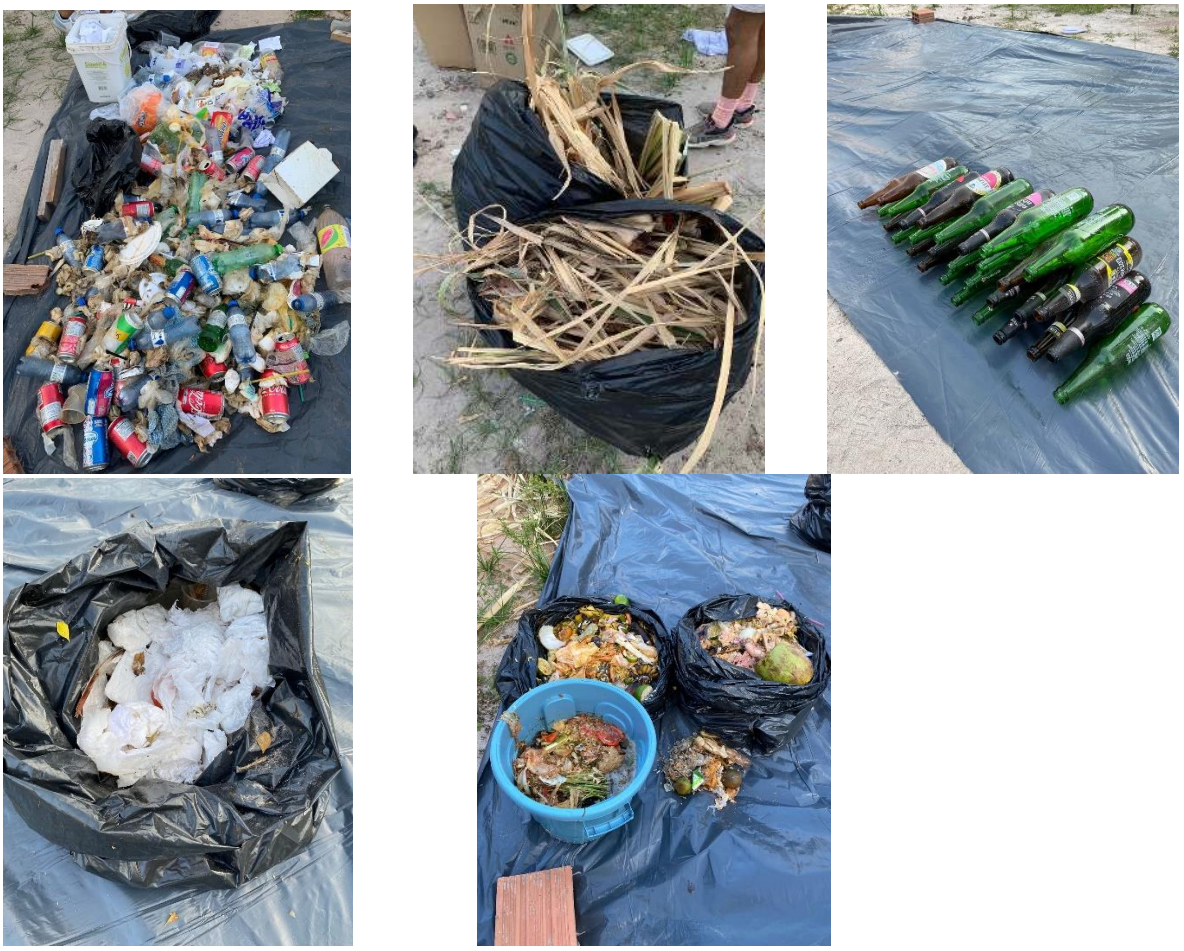


Figura 4. Gravimetria dos Resíduos Sólidos da área de estudo. Fonte: Autores (2023)

Os RS foram categorizados segundo Mandelli (1997) e De Conto et al. (2009), como apresentado no Quadro 1.

Quadro 3: Categorização dos Resíduos Sólidos

Categoria	**Resíduos presentes**
Matéria Orgânica	Restos alimentares de origem animal e vegetal (cascas de frutas, verduras, preparo da alimentação), podas de árvores, flores, folhas e grama.
Plástico	Sacos; sacolas; embalagens de refrigerantes, de água, de leite, de iogurte, de sorvete, de margarina, de óleo; de azeite; de biscoitos e de bombons; copos de água e café; isopor; esponjas; papéis de balas; embalagens de cosméticos, e de produtos de limpeza; engradados; cabide e pás de veneziana.
Papel e papelão	Caixas de alimentos, de bebidas, de ovos, de filtro de café, de chá, de medicamentos, jornais, revistas, sacolas (principalmente oriundas de feiras de negócios) e livros.
Vidro	Garrafas de bebidas (cerveja, refrigerante, vinho, bebidas destiladas), copos, embalagens de produtos alimentícios e de medicamentos.
Metal	Latas de bebidas, de leite e achocolatados.
Madeira	Madeiras no geral
Têxteis	Restos de tecido, peças de vestuário, panos de limpeza, luvas e touca.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Fonte: Adaptado de Mandelli (1997); De Conto et al. (2009).

Todos os dados coletados (quantidade em massa dos diferentes componentes dos resíduos sólidos) foram organizados em planilhas em Excel, obedecendo ao método de quantificação proposto por De Conto *et al.* (2009). Posteriormente, os dados foram organizados em tabelas.

Como a coleta de dados foi realizada durante o período de dois meses, foi necessário realizar a extrapolação dos dados para o período de um ano, visto que para realização dos cálculos das emissões de CO_2eq, foi necessário a utilização da quantidade de RS em kg/ano.

Para estimativa dos dados coletados na área de estudo, utilizou-se o método de identificação de serie temporal. Primeiramente foi definida a estrutura de modelo para série temporal, conforme a Equação 1:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - a_3 y(k-3) - a_4 y(k-4) - a_5 y(k-5) - a_6 y(k-6) - a_7 y(k-7)$$

Equação (1)

y_k representa a quantidade de resíduos sólidos orgânicos gerados no k-ésimo dia de observação (kg/dia), enquanto k corresponde ao índice discreto associado aos dias de funcionamento do restaurante durante o período de coleta de dados.

De forma que $k \in \mathbb{Z}_+$ sendo este, o dia do ano observado dentro do intervalo dos dias de terça a domingo (dias de funcionamento do restaurante A) e y é o valor verdadeiro da quantidade de resíduos sólidos gerados em kg. $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ e $a_7 \in \mathbb{R}$ foram os parâmetros estimados no modelo a partir dos dados experimentais, considerando uma amostra com os primeiros 41 dados experimentais, baseado no método de identificação de sistemas (Aguirre, 2000).

$$\hat{a}_1 = 0{,}0010$$
$$\hat{a}_2 = 0{,}1178$$
$$\hat{a}_3 = -0{,}2063$$
$$\hat{a}_4 = 0{,}0752$$
$$\hat{a}_5 = 0{,}1788$$
$$\hat{a}_6 = 0{,}6755$$
$$\hat{a}_7 = 0{,}1636$$

Os dados experimentais mencionados anteriormente, foram referentes a quantidade de RS gerados nos dias de coleta. Optou-se por utilizar 41 dados, pois foram os dias que mais se aproximaram com relação a quantidade pesada. Com isto, aumentou-se as chances de se ter uma extrapolação que demostre o quantitativo real de geração de RS no período de um ano.

Uma vez obtido o modelo a partir dos dados experimentais a estrutura de modelo da Equação 1, pode ser reescrita como (Equação 2):

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

$$\hat{y}(k) = -\hat{a}_1\hat{y}(k-1) - \hat{a}_2\hat{y}(k-2) - \hat{a}_3\hat{y}\,(k-3) - \hat{a}_4\hat{y}(k-4) - \hat{a}_5\hat{y}(k-5) - \hat{a}_6\hat{y}(k-6) - \hat{a}_7\hat{y}(k-7) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: $\hat{y}(k)$: é o valor estimado da quantidade de resíduos sólidos em kg gerado no dia k.

A Equação (2) expressa a forma estimada do modelo, obtida após o ajuste dos parâmetros com base nos 41 dados experimentais selecionados, considerados representativos do padrão médio de geração de resíduos.

Para que o estimador da Equação 2 seja completamente caracterizado, foi necessário estimar a incerteza combinada, expandida do estimador a partir dos primeiros 41 dados, levando-se em consideração o ajuste da densidade de probabilidade pela distribuição *t-student*, devido a possibilidade de obter o parâmetro t, necessário para o ajuste da incerteza, a partir de informações estatísticas obtidas do conjunto de observações da amostra, tais como: tamanho, média e desvio padrão (Aguirre, 2005). Para isso, foi utilizado o intervalo de confiança de 95%, e um grau de liberdade de 40 $(41-1=40)$, resultando num parâmetro $t = 2{,}021$. A incerteza combinada resultou em $u_c(y) = 5{,}0742$ e a incerteza combinada expandida $u_{ct}(y) = t \cdot u_c(y) = 2{,}0210 \cdot 5{,}0742 = 10{,}2550$. Logo $\hat{y}(k)$ pode ser caracterizado com a respectiva incerteza combinada expandida como (Equação 3):

$$\hat{y}(k) - 10{,}2550 \leq E[y] \leq \hat{y}(k) + 10{,}2550 \quad \text{Equação (3)}$$

Observa-se que o valor verdadeiro (esperança matemática $E[y]$) referente a estimação $\hat{y}(k)$, apresenta 95% de probabilidade de estar dentro do intervalo mencionado na Equação 3. Com os dados extrapolados, utilizou-se o Software Matlab para gerar o gráfico da Figura 5.

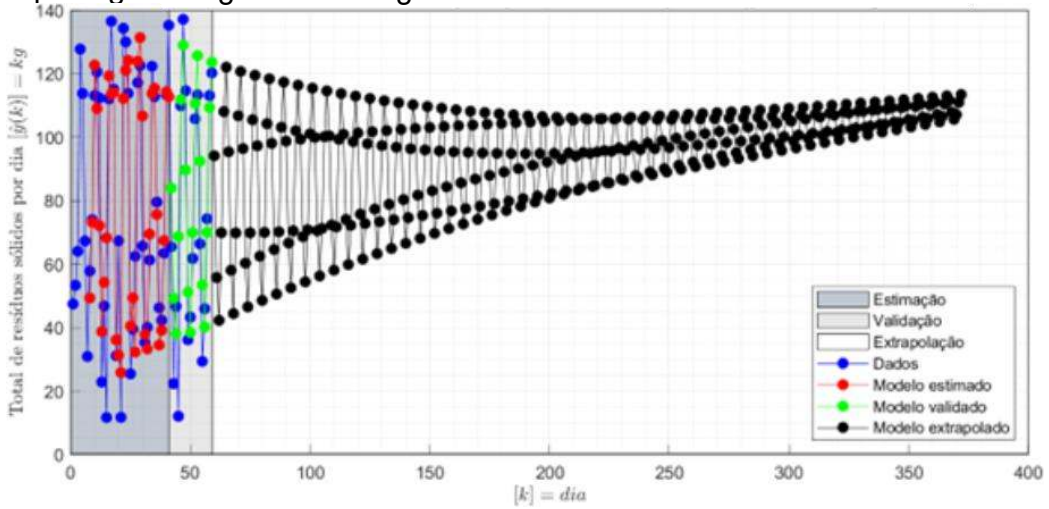


Figura 5. Extrapolação dos dados. Fonte: Autores (2023)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

A Equação (3) apresenta a estimativa final acompanhada da incerteza combinada expandida, calculada a partir da distribuição t de Student, adotando-se um nível de confiança de 95% e 40 graus de liberdade. Tal procedimento permite incorporar a variabilidade dos dados observados, conferindo maior robustez estatística à extrapolação anual da geração de resíduos sólidos.

Após a estimativa dos dados, foi realizado o cálculo de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RS do restaurante A para avaliar o efeito da gestão dos resíduos orgânicos, assim como os impactos ambientais do uso dos biodigestores no tratamento desses resíduos.

O cálculo foi realizado para medição dos gases foi através da criação de cenários levando-se em consideração tendências na gestão de resíduos sólidos. Para a obtenção dos resultados foi utilizada a Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil. A ferramenta faz parte do conjunto de apoio à gestão, lançada em 2021 e, tem como objetivo auxiliar gestores na tomada de decisões.

Assim realizou-se comparações de dois cenários a um cenário de linha de base. Todos os cenários foram programáveis em relação às opções de gestão de resíduos, com exceção do quantitativo anual de resíduos e da composição, que foi mantida nos cenários para garantir uma base de comparação.

As emissões calculadas incluem todas as emissões futuras causadas por determinada quantidade de resíduos tratados. Isso significa que, quando os resíduos são tratados no biodigestor, por exemplo, as emissões calculadas de GEE (toneladas de CO_2eq por tonelada de resíduo), incluem as emissões acumuladas que essa quantidade de resíduos gerará durante a sua degradação.

2.2 Avaliação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no manejo dos resíduos sólidos

A Calculadora de emissões de GEE para resíduos foi elaborada em software Microsoft Excel. A planilha possui seis abas, sendo estas: Introdução, Início, Reciclagem, Destinação, Resultados e Cálculos. Na introdução foram apresentadas informações relacionadas a quantidade de resíduos gerados no restaurante em estudo, assim como a composição gravimétrica, teor de água e fator de Emissão de GEE específico para geração de eletricidade.

A aba de reciclagem foi dividida em materiais secos e orgânicos, sendo possível apontar a parcela de resíduos orgânicos reciclados por compostagem ou DA. Para a DA, optou-se por proporcionar dois cenários, voltado para a produção de eletricidade ou de biometano.

Em se tratando da destinação, as opções variaram entre aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás e opções de recuperação através da digestão anaeróbia e compostagem. Na etapa dos resultados, estes foram subdivididos em três abas, uma para cada cenário e uma aba específica para todos os resultados, onde foi possível realizar uma análise comparativa entre tais. Cada resultado foi referente aos débitos e créditos separados por processos de reciclagem e destinação.

O objetivo da aplicação da identificação da pegada de carbono no gerenciamento de RS do restaurante A, foi avaliar como as diferentes tecnologias e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

melhoras no nível de DA e compostagem impactam na redução dos gases de efeito estufa (GEE). A unidade funcional adotada foi o quantitativo de resíduos sólidos gerados no ano de 2023, assim como, a parcela que deixou de ser aterrada em detrimento do que foi tratado no biodigestor.

No estudo aqui apresentado foram consideradas apenas a destinação dos resíduos até o aterro sanitário e o posterior tratamento que por ele é dado. Não se considerou os agentes intermediários e vendas a indústria de reciclagem.

Como dados de entrada utilizou-se a quantidade de resíduo sólido gerado no ano de 2023, a parcela de resíduo tratada no biodigestor e a que foi encaminhada ao aterro sanitário. Como saídas, foram consideradas as emissões de poluentes.

O Cenário 1 foi utilizado para comparação entre os demais cenários, este fez referência ao momento atual do estabelecimento (ano de 2023). A seguir, pode-se observar cada cenário estimado neste estudo.

Cenário 1 (base): No cenário base, foi utilizado o quantitativo de resíduo gerado e enviado ao aterro sanitário de São Luís - MA, e ao biodigestor para tratamento, direcionando a parcela de resíduos recicláveis secos. Considerou que foi gerado gás metano no biodigestor, sendo este, coletado e utilizado para geração de gás de cozinha.

Neste momento 48% são enviados ao aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás, no entanto, considerou-se que ocorre apenas 30% de eficiência de coleta de gás (Figura 6).

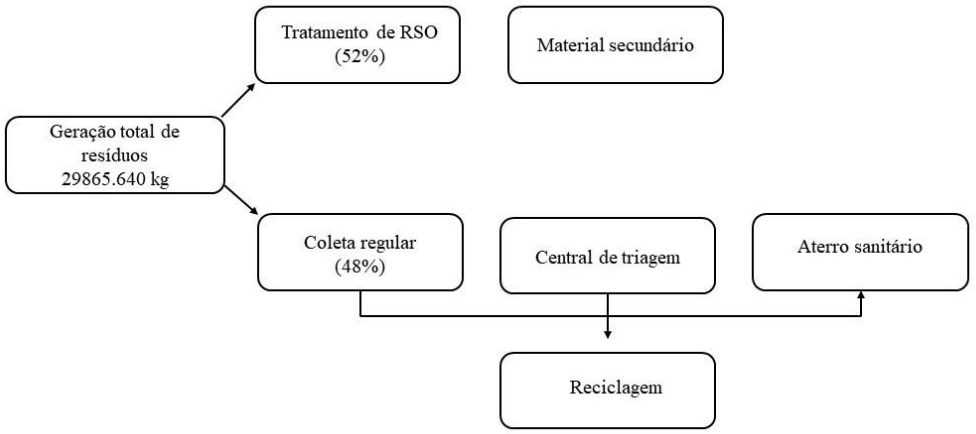


Figura 6. Cenário 01 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A. Fonte: Autores (2023).

Cenário 2: Aumento de 10% na reciclagem através da compostagem de resíduos úmidos, tendo 38% enviado a aterro sanitário com possibilidade de coleta de gás e eficiência de 40% na sua coleta (Figura 7).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

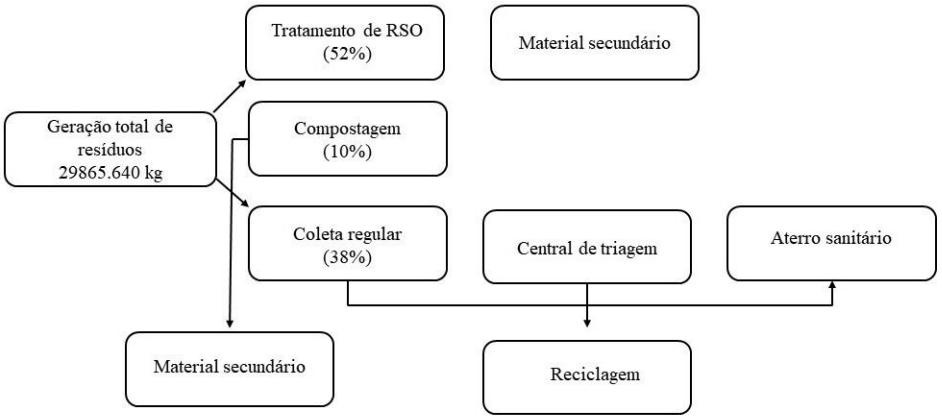


Figura 7. Cenário 02 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A. Fonte: Autores (2023).

Cenário 3: Aumento de 10% na reciclagem de resíduos destinados a compostagem. Considerou-se que 70% do gás coletado no aterro é utilizado para produção de energia elétrica e 30% para produção de biometano (Figura 8).

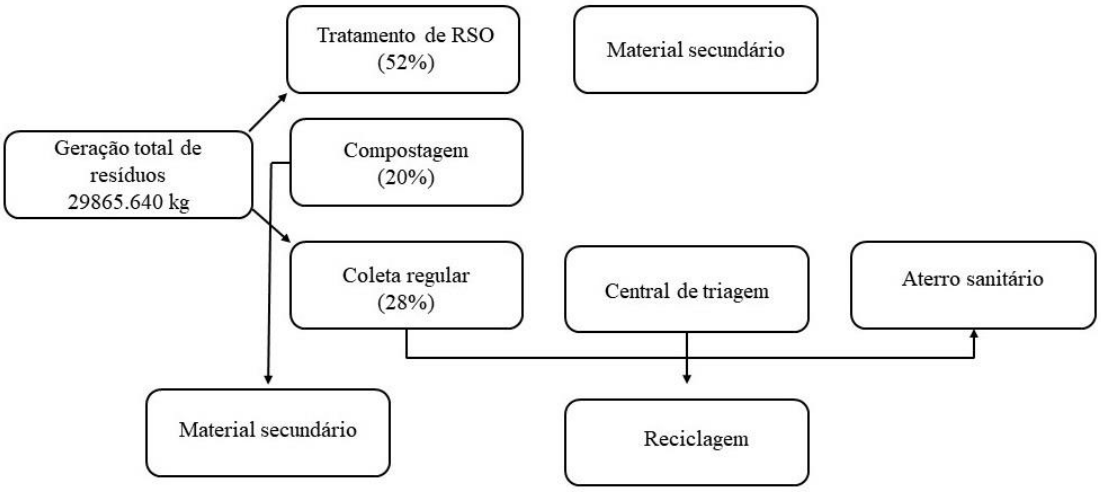


Figura19. Cenário 03 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A Fonte: autora (2023)

Também foi realizada uma análise da composição de cada resíduo, pois a composição está diretamente ligada as emissões de GEE do tratamento e disposição final dos RS, pois diferentes frações de resíduos contêm quantidades diferentes de carbono orgânico degradável. Na Tabela 1 observa-se a composição dos resíduos em termos percentuais de umidade e foram propostos seguindo as considerações do IPCC (2006).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Tabela 1. composição do Resíduos Sólidos Urbanos padrão sugerida para uso na Calculadora

Composição	% em peso úmido
Resíduos alimentares	48,8%
Resíduos verdes	3,0%
Papel e papelão	13,1%
Plástico	13,1%
Vidros	2,4%
Mentais ferrosos	2,3%
Alumínio	0,6%
Têxteis	2,6%
Borracha e couro	0,7%
Fraldas	4%
Madeira	4,7%
Resíduos minerais	0,0%
Outros	4,7%

Fonte: adaptado do IPCC (2006) e PLANARES (2020)

Na composição outros, foram inseridos os materiais não mencionados no quadro, a exemplo de escamas de peixes, ossos etc. Nos cálculos levou-se em consideração o teor de umidade de cada resíduo, pois a umidade está diretamente relacionada com o poder calorifico podendo este variar, e consequentemente, impactar nos resultados.

O teor de água foi caracterizado como sendo baixo, quando a umidade se apresenta menor que 40% e alto quando está se encontrar acima de 40%. Giegrich (2021), sugere as características do teor de água a serem consideradas para determinar se o resíduo apresenta baixo ou alto teor de água. O Quadro 2 apresenta quais tipos de resíduos foram considerados com baixo e alto teor de água.

Quadro 2. Tipos de resíduos com base no baixo e alto teor de água

Baixo teor de água	Alto teor de água
O resíduo parece seco.	O resíduo apresenta água está escorrendo
Os resíduos têm um alto teor de cinzas	Os resíduos têm um alto nível de restos de alimentos
Os resíduos têm um baixo nível de podas de jardins e parques	Os resíduos têm um alto nível de poda de jardins e parques
Os resíduos são armazenados em condições secas	Os resíduos armazenados abertamente e sujeitos à precipitação possuem maior teor de água.

Fonte: Adaptado de Giegrich (2021).

Com base na composição e teor de água previamente definidos, foram calculados os teores de carbono regenerativo, teor de carbono fóssil e poder calorífico e multiplicados pela porcentagem de cada fração de resíduos (Quadro 3). O baixo e o alto teor de água foram relacionados com os RO e a fração não especificada, pois considerou-se que as frações mencionadas variam o teor de água com maior frequência. Os resíduos caracterizados como papel/papelão, plástico, vidro, metais e têxteis, geralmente têm um teor de água estável e apresentam poder calorífico fixo (Quadro 4).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Quadro 3. Índice de carbono total e fóssil de cada tipo de resíduo

Tipo de resíduo	Carbono total % em peso úmido	Carbono fóssil % em peso úmido
Resíduos alimentares	15,2	0
Resíduos verdes	19,6	0
Papel e papelão	41,4	1
Plástico	75	100
Vidros	0	0
Metais ferrosos	0	0
Alumínio	0	0
Têxteis	40	20
Borracha e couro	56,3	20
Fraldas	28	10
Madeira	42,5	0
Resíduos minerais	0	0
Outros	2,7	100

Fonte: IPCC (2006)

Quadro 4. Resíduos e seus respectivos poder calorífico

Tipo de resíduo	Poder calorifico (MJ/kg de resíduos úmidos)
Resíduos orgânicos com baixo teor de água	4
Resíduos orgânicos com alto teor de água	2
Papel	11,5
Plástico	31,5
Vidros	0
Metais	0
Têxteis	14,6
Madeira	15
Resíduos minerais	0
Outros com baixo teor de água	8,4
Outros com alto teor de água	5

Fonte: Giegrich (2021)

O teor de carbono, assim como o poder calorífico interferem diretamente nos cálculos das emissões dos GEE, visto que o poder calorífico é um indicador importante para a combustibilidade dos resíduos, apresentando o poder de queima dos mesmos Giegrich (2021).

Em se tratando da quantidade de GEE por quilowatt-hora de eletricidade que cada as fontes de energia emitem para o meio ambiente, esta pode variar consideravelmente a depender do tipo de combustível analisado. Logo para fins de cálculo, optou-se por utilizar um valor padrão de emissão para geração de eletricidade no Brasil, sendo este de 93gCO_2eq/kWh, tendo como referência o ano de 2017 (*STATISTICAL OFFICE BRAZIL,* 2019).

Para análise do cenário referente a etapa de reciclagem dos resíduos, utilizou-se as taxas de reciclagem de diferentes frações de resíduos e,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

adicionalmente, o tipo de tratamento no caso de resíduos orgânicos. Os resíduos secos considerados na análise foram: papel, papelão, plástico, vidro, metal e alumínio. A taxa de reciclagem relacionou à quantidade de cada fração de resíduos correspondente ao total de resíduos na categoria mencionada.

Em se tratando dos resíduos utilizados na compostagem e biodigestão anaeróbia, estes foram classificados em resíduos alimentares e resíduos verdes (jardins). Considerou-se que o composto produzido nesses processos irá ser aplicado na agricultura ou jardinagem para substituir fertilizantes químicos. O biogás produzido pode ser usado para gerar eletricidade ou ser refinado como biometano visando seu uso no setor de transportes, em substituição ao gás natural veicular.

As emissões de GEE para as frações de resíduos que foram inseridos na etapa de reciclagem foram determinadas levando-se em consideração a massa de resíduos e um fator de emissão de GEE, apresentados no Quadro 5, os dados mencionados refletem a situação brasileira.

Quadro 5. Fatores de emissão de Gases Efeito Estufa

kg CO_2eq/t resíduo	**Resíduo orgânico**		**Resíduos inorgânicos**				
	Biodigestão	Compostagem	Papel e papelão	Vidro	Metais	Alumínio	Plástico
Emissões (produção primária)	90	95	1.256	483	64	697	410
Emissões evitadas (reciclado)	24	24	1.548	604	1.712	9.880	1.910
Resultado líquido	66	71	-292	-121	-1.648	-9.183	-1.500

Fonte: Giegrich (2021)

Ressalta-se que os resultados obtidos representam estimativas de emissões acumuladas de CO_2eq associadas ao manejo dos resíduos sólidos, não devendo ser interpretados como resultados de uma Avaliação do Ciclo de Vida completa, mas sim como uma análise comparativa entre cenários de gestão, adequada ao suporte à tomada de decisão em políticas e estratégias de gerenciamento de resíduos.

2.3 Desenvolvimento do questionário para análise da matriz SWOT

Conforme mencionado, em um primeiro momento foi realizada a análise SWOT. Através do embasamento desenvolvido na revisão bibliográfica, elaborou-se o questionário utilizando-se a ferramenta *Google Forms*. O questionário foi desenvolvido levando-se em consideração os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças com base na sustentabilidade.

Após a elaboração do questionário, este foi submetido ao processo de avaliações para possíveis alterações de acordo com os profissionais da área, sendo estes acadêmicos de mestrado, doutorado e professores. Enviou-se um total de 10 questionário, eles sugeriram alterações nas questões e nos textos introdutórios, para maior compreensão dos respondentes. As alterações sugeridas foram analisadas e o questionário foi atualizado.

Após a correção do questionário, deu-se início à seleção de empresas e pesquisadores aptos a responderem às perguntas. A escolha de incluir tanto

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

empresas quanto acadêmicos pesquisadores que trabalham ou estudam o uso de biodigestores foi feita com o objetivo de obter uma compreensão mais ampla sobre as vantagens e desvantagens dessa tecnologia, especialmente sob a ótica da EC. Acredita-se que as empresas que já estão utilizando biodigestores possam oferecer informações práticas valiosas sobre os impactos gerados. Por outro lado, os acadêmicos, sendo especialistas e detentores do conhecimento mais atualizado, contribuem com uma perspectiva profunda e técnica sobre o tema.

Para a divulgação do questionário, foi feito um contato prévio com os participantes via e-mail ou telefone. Nesse contato, explicou-se a seriedade e a importância da pesquisa para fins acadêmicos. Inicialmente, o questionário foi enviado a 31 contatos.

Com o intuito de expandir a disseminação do questionário, foi utilizada o método de amostragem em “bola de neve”. Segundo Vinuto (2014), essa técnica, que é uma forma de amostragem não probabilística, emprega cadeias de referências para alcançar participantes. É frequentemente aplicada em pesquisas com grupos de difícil acesso ou quando não se requer uma contagem exata de participantes.

Após o contato inicial, foi solicitado que, além de responderem ao questionário, eles também indicassem novos contatos que utilizam biodigestores em suas redes pessoais, ampliando assim o alcance e o volume de respostas. Obteve-se um total de 38 respostas de participantes diversificados, que empregam biodigestores em seus processos ou realizam pesquisas relacionadas ao tema.

O questionário foi dividido em quatro seções:

Seção 1: Forças e Pontos Fortes.
Seção 2: Fraquezas e Pontos Fracos.
Seção 3: Oportunidade.
Seção 4: Ameaças.

As Seções 1 e 2 fazem referência ao ambiente interno da empresa e, as Seções 3 e 4 ao ambiente externo na qual estão inseridos. As questões foram elaboradas de forma que em cada seção foram apresentadas quatro afirmativas que foram respondidas de acordo com uma escala Likert, com variação de 1 a 5 (Dalmoro; Vieira, 2014), onde cada valor indicado equivale indicam:

1 - Discordo totalmente
2 - Discordo
3 - Neutro
4 - Concordo
5 - Concordo totalmente

Também se realizou uma pergunta discursiva, com o objetivo de apontar as particularidades de cada tipo de biodigestor. No geral foram aplicadas 20 questões, sendo 16 afirmativas e 4 discursivas.

Antes de enviar o questionário para ser respondidos, este foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa do Hospital Universitário Lauro Wanderley (CEP/HULW), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), CAAE: 70538023.8.0000.5183, conforme estabelecido Resolução n° 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e suas complementares, que requer a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

aprovação no conselho de ética para pesquisas que tratam de temas que tenham participação ativa com seres humanos.

Foi elaborado um Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, com a finalidade de esclarecer os objetivos do estudo, assegurar a participação voluntária e o sigilo da identidade.

3. Resultados e Discussão

3.1 Avaliação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no manejo dos resíduos sólidos

Para análise dos dados referentes as emissões de CO_2eq considerou-se a composição gravimétrica dos resíduos da área de estudo, conforme observado na Figura 20. Foi possível observar que a composição atual dos RS possui um alto teor de água devido à grande composição de matéria orgânica coletada. Esta composição inicial dos resíduos do restaurante A, foi considerada a principal influência nas emissões de GEE na disposição final e tratamento.

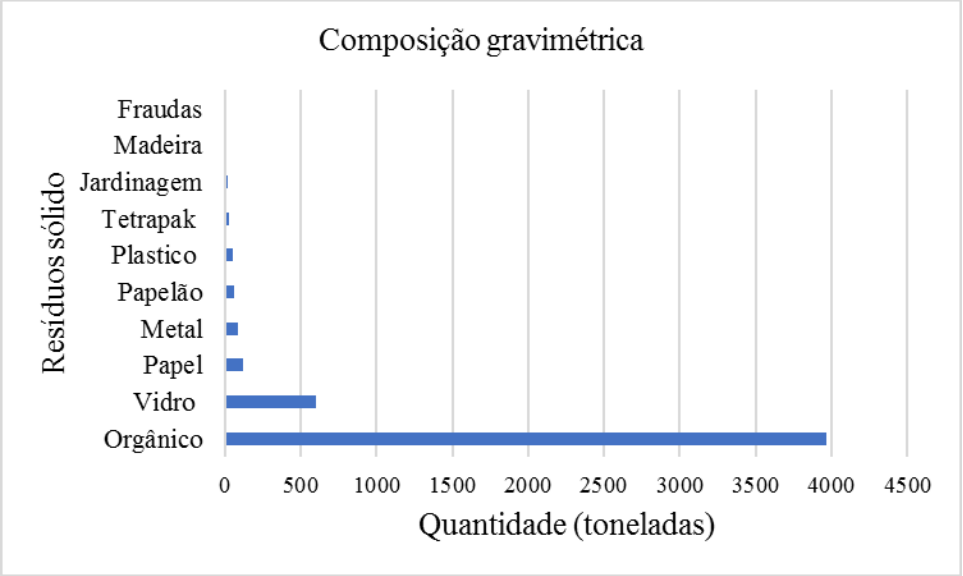


Figura 6. Composição gravimétrica. Fonte: Autores (2023)

Diante deste cenário, vale ressaltar dois aspectos principais a serem analisados: o teor de carbono e poder calorifico, relacionados ao teor de água dos RS. Tendo em vista a composição gravimétrica dos resíduos, assim como a quantidade de material reciclado, foi possível identificar o poder calorífico e o teor de carbono dos resíduos (Tabela 2).

Tabela 2. Teor calorífico e de carbono para os Resíduos Sólidos do restaurante A para o ano de 2023

Poder calorífico	2,2
Teor total de carbono (% de resíduo úmido)	14,1
Teor total de carbono fóssil (% de resíduo úmido)	0,8
Teor de carbono regenerativo (% de resíduo úmido)	13,3

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Segundo Giegrich (2021), o poder calórico é caracterizado em função de teor de umidade dos RS. Em decorrência da maior proporção de resíduos orgânicos, visto a área de estudo ser um restaurante, onde a principal fonte de matéria prima fornecida são alimentos, foi considerado que tais apresentaram alto teor de água. Em se tratando dos teores de carbono, estes também variam em decorrência da gravimetria dos RS da área. Para uma maior produção de biogás, necessário se faz que o RS apresente elevado teor de carbono regenerativo, enquanto alto teores de carbono fóssil estimulam a produção das emissões atmosféricas e, consequentemente, contribuindo as mudanças climáticas.

Na Tabela 3 pode-se observar os valores considerados para a atividade de reciclagem. A destinação, assim como os tipos de tratamento adotadas também foram descritos na referida tabela. Considerou-se neste cenário que os RO utilizados no processo de reciclagem não foram convertidos em biometano, visto que no restaurante em estudo não é realizado o processo de refinamento e/ou processamento do biogás gerados nos biodigestores.

Tabela 3. Taxas de reciclagem e tratamento dos RS para os resíduos sólidos urbanos

Taxa de Reciclagem do RS seco	
Tipo de material	**(%)**
Papel, papelão	30%
Plásticos	30%
Vidros	30%
Metais ferrosos	30%
Alumínio	60%
Resíduos Sólidos Orgânicos reciclados que são utilizados na agricultura, em áreas verdes ou no florestamento	
Resíduos de alimentos	62%
Resíduos de jardins	38%
Resíduos sólidos orgânicos para reciclagem	
Compostagem	0%
Digestão anaeróbia (DA)	52%
Biogás da digestão anaeróbia para produção de eletricidade	60%
Biogás da digestão anaeróbia para produção de biometano	0%

Fonte: Autora (2023)

Na Figura 7, observa-se os valores de emissões de CO_2eq para o cenário 1. A primeira barra indicou as emissões de GEE relacionadas à reciclagem (débitos). A segunda barra representou a economia de emissões dos processos primários em razão da reciclagem e utilização de matéria-prima secundária (créditos e valores negativos). A terceira barra mostrou o efeito líquido, ou seja, a diferença entre créditos e débitos. Diante deste cenário, quanto maior for o valor de créditos, significa uma maior recuperação de resíduos, que resulta na redução de liberação de gases poluentes, tendo um ganho positivo ambiental referente as mudanças climáticas.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Das 29 toneladas de RS geradas no ano de 2023, estimou com base nos resultados de entrada que 48% dos resíduos foram enviados para o aterro sanitário e 52% dos resíduos foram submetidos ao processo de tratamento através da DA. Dos 48%, apenas 10% da parcela foi reciclada, sendo possível gerar mais "débitos" de GEE do que "créditos", resultando em um valor total positivo de emissões de GEE, ou seja, a reciclagem se configura como um parâmetro positivo na redução das mudanças climáticas. Nessa perspectiva, um aumento nos créditos indica uma recuperação mais significativa de resíduos, levando a uma redução na emissão de gases poluentes e resultando em ganhos ambientais positivos no contexto das mudanças climáticas.

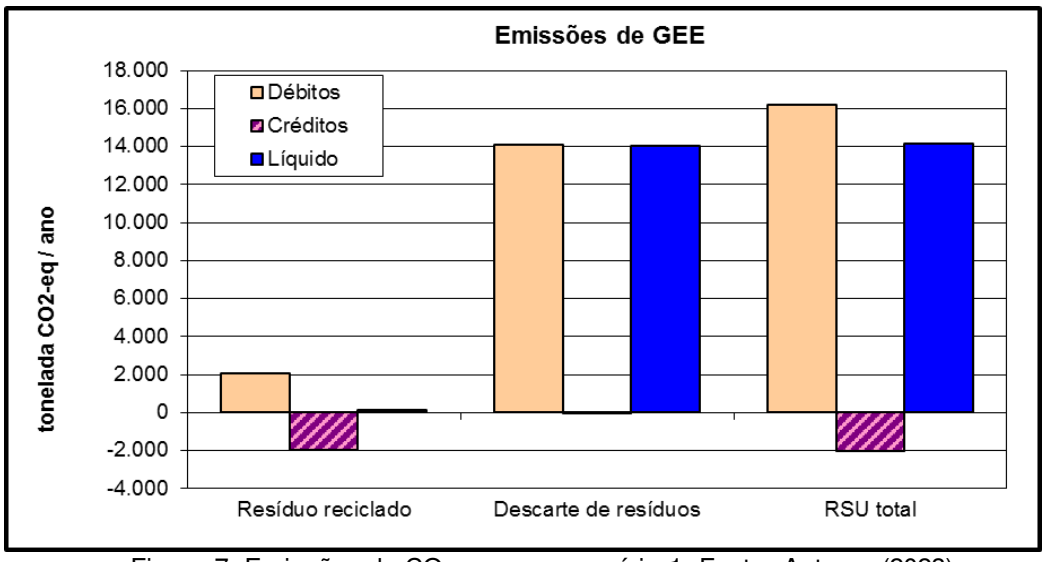


Figura 7. Emissões de CO_2eq para o cenário 1. Fonte: Autores (2023)

Como pode-se perceber, a quantidade de débito foi maior (14.099 toneladasCO_2eq/ano) para o modelo de destinação final, logo gerou um passivo ambiental, com consequência no aumento das emissões de GEE, resultando em uma perda ambiental referente as mudanças climáticas.

Considerando uma baixa taxa de reciclagem adotada no cenário 1, com apenas um modelo de destinação final de RS, sendo este o aterro sanitário, e a baixa capacidade em coletar todo o gás gerado, houve mais débitos do que créditos (Tabela 4), o que significa elevadas taxas de geração de GEE com o modelo de gestão atual.

Tabela 4. Débitos e Créditos do modelo de gestão do cenário 1

	Resíduo reciclado	**Destinação de resíduos**	**RSU total**
Débitos	2.075	14.099	16.174
Créditos	-1.966	-32	-1.998
Líquido	109	14.066	14.175

Fonte: Autores (2023)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

De acordo com um estudo desenvolvido por RIPA et al. (2017), a reciclagem proporciona um desempenho positivo voltado para a redução das emissões de GEE. Caso não houvesse nenhuma ação de reciclagem, o número total de emissões teria sido ainda mais elevado. Além dos GEE ao reciclar materiais como papel, plástico, vidro e metal, esses itens são desviados do fluxo de resíduos tradicional, diminuindo a pressão sobre os locais de disposição final (Ghidorsi *et al.;* 2021).

Iqbal et al. (2019), também analisaram o tratamento de RSO nos biodigestores e compostagem em comparação ao aterro sanitário e incineração com geração de energia, os autores afirmaram que a melhor alternativa é acoplar a incineração e os métodos de tratamento biológicos da fração orgânica, dando ênfase a biodigestão. No estudo mencionado, não se considerou alternativas de reciclagem, priorizando a incineração com geração de energia para os resíduos secos e o tratamento biológico para os RSO, seguindo a mesma conclusão que Liu et al. (2017). No entanto, Dong et al (2017) ressaltaram que a incineração sem geração de energia não é uma alternativa favorável à redução de GEE (Dong *et al.,* 2017).

Liu et al. (2017) afirmaram que em função do potencial recuperação de energia, a integração de incineração dos RSU com alternativas biológicas foi o melhor cenário em todas as categorias de impactos estudadas. O estudo desenvolvido por Liu et el. (2017) foi desenvolvido na China, onde se identificou na composição gravimétrica uma alta porcentagem de RSO, assim como na pesquisa aqui apresentada, logo os autores concluíram que a DA através do uso de biodigestores se destacou entre as alternativas, já que reaproveita a energia oriunda do gás metano para geração de energia elétrica e utiliza o residual como fertilizante, reaproveitando nutrientes aumentando assim a síntese de carbono.

- Cenário 2

Para o cenário 2, foram simuladas algumas melhorias em comparação ao cenário 1. Essas melhorias podem vir advindas de um plano de gestão de RS, melhoras de políticas internas e aumento da conscientização da reciclagem por parte dos gestores da área de estudo. Para este cenário, continuou-se a utilizar a disposição final como sendo o aterro sanitário, porém considerou-se o aumento dos materiais recicláveis passando agora para 62%. Com relação ao tratamento dos RSO, considerou-se a DA acoplada a compostagem. Desta forma, foi possível verificar uma pequena redução no teor de carbono fóssil (Tabela 5), ou seja, uma redução na emissão de poluentes.

Tabela 5. Poder calorifico e teor de carbono referente ao cenário 2

Poder calorífico	2,9%
Teor total de carbono (% de resíduo úmido)	17,1%
Teor total de carbono fóssil (% de resíduo úmido)	3,5%
Teor de carbono regenerativo (% de resíduo úmido)	15,9%

Fonte: Autores (2023)

Pujara et al., (2023) e Tiseo (2020) avaliaram a DA e a compostagem como técnica de tratamento dos RSO, estes verificaram resultados satisfatórios

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

com relação a redução dos GEE quando os RO são devidamente tratados e não são dispostos em locais inadequados. Os autores também demonstraram em seus estudos que a reciclagem consegue contribuir significativamente para evitar o descarte de RSU em aterros sanitários e reduzir em consequência a emissão de CO_2.

Mesmo com a baixa redução do teor de carbono fóssil, percebeu-se uma melhora satisfatória com relação coleta do gás produzido e eficiência no tratamento do biogás, estes geraram um aumento de créditos em decorrência da maior porcentagem de RO reciclados, o que apresentou uma redução nas emissões de GEE, apenas com a melhora na eficiência de tratamento e aumento na coleta de reciclagem. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 8.

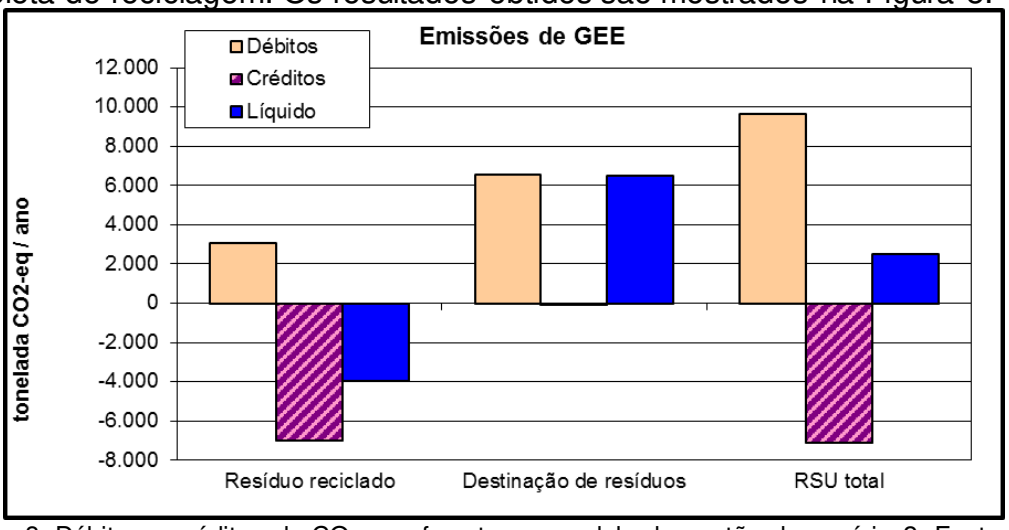


Figura 8. Débitos e créditos de CO_2eq referente ao modelo de gestão do cenário 2. Fonte: Autores (2023)

Na Tabela 8, observa-se que com o aumento da parcela reciclada, houve uma melhora no resultado líquido dos resíduos. Logo, como o único local de disposição final é o aterro sanitário, fez com que esse modelo de gestão tivesse mais débitos do que créditos. A Tabela 6 apresenta a relação entre créditos e débitos para o cenário em estudo.

Tabela 6. Débitos e Créditos do modelo de gestão do cenário 2

	Resíduo reciclado	**Destinação de resíduos**	**RSU total**
Débitos	3.052,269	6.570,190	9.622,459
Créditos	-7.004,620	-89,455	-7.094,08
Líquido	-3.952,350	6.480,735	2.528,381

Fonte: Autora (2023)

Embora, para este cenário, a uma melhora na eficiência de gás, visto que foi considerado 100% do resíduo que é coletado é enviado ao incinerador, esse modelo não conseguiu diminuir de forma considerável o número de emissões totais de RSU, o que corrobora com Aracil et al., (2018), pois demonstraram que ao utilizar a incineração como forma de destinação final, o número de emissões de GEE para a destinação de resíduos continua sendo alto, visto que se faz necessário realizar um processo de conversão, limpeza de gás para,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

posteriormente, gerar eletricidade dentro do incinerador, mesmo este sendo considerado pela legislação vigente como sendo uma técnica que contribui para a redução das emissões.

Como no cenário 2 foi simulado um percentual maior de reciclagem e tratamento biológico, este apresentou um valor maior de créditos ao comparar com o cenário 1, pois considerou-se que a reciclagem evita que mais matéria-prima seja extraída da natureza e, consequentemente, reduzem o impacto da produção primária, que é maior do que a reciclagem em termos de emissões de CO_2eq. e gastos com energia elétrica.

Adicionalmente, a ampliação das taxas de biodigestão e compostagem fortalecem a integração do sistema com os princípios da Economia Circular (EC). Além dos benefícios mencionados, Costa (2023), afirmou que o tratamento dos resíduos voltados aos princípios da EC proporciona um aumento das taxas de coleta, e, consequentemente, renda para os trabalhadores, além de promover a geração de empregos no setor por meio da comercialização desses resíduos. Essa dinâmica teria impactos positivos no desempenho social dos envolvidos, especificadamente os trabalhadores.

- Cenário 3

Considerou-se alternativas mais eficientes e novas tecnologias para o tratamento de resíduos. No cenário 3, além do aumento da parcela de material reciclado, tanto os secos quando os RSO, apenas 28% são direcionados ao aterro sanitário. Neste cenário, a eficiência de coleta e tratamento de gás foi de 100%, sendo 80% utilizados para produção de eletricidade e 20% utilizados para produção de biometano. Na Tabela 7, observa-se o poder calorifico referente a simulação do cenário 3.

Tabela 7. Poder calorifico e teor de carbono referente ao cenário 3

Poder calorífico	2,4%
Teor total de carbono (% de resíduo úmido)	15,0%
Teor total de carbono fóssil (% de resíduo úmido)	0,9%
Teor de carbono regenerativo (% de resíduo úmido)	14,1%

Fonte: Autores (2023)

Ao simular a gestão de RS levando-se em consideração uma maior eficiência no tratamento e coleta, pode-se verificar uma melhora significativa na redução de GEE. Os resultados líquidos negativos significam que os créditos são maiores que os débitos, desta forma, o cenário 3 permitiu uma maior redução das emissões (Figura 9).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

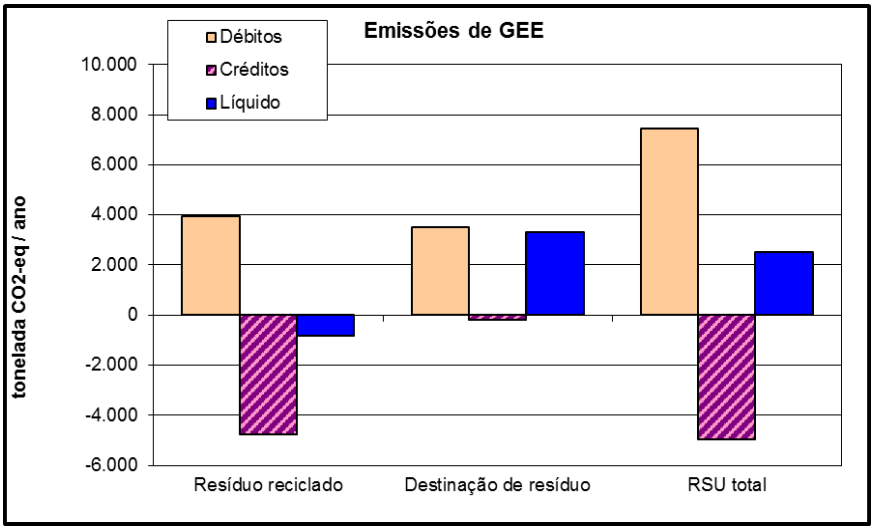


Figura 9. Débitos e créditos de CO_2eq referente ao modelo de gestão do cenário 3. Fonte: Autores (2023)

A maior influência pela qual a solução para os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) se tornasse positiva em termos de redução de emissões de GEE foi em decorrência do aproveitamento do biogás gerado para produção de eletricidade. Nesse caso, o valor líquido mostrou uma diferença menor entre os débitos e créditos (Tabela 8)

Tabela 8. Débitos e Créditos do modelo de gestão do cenário 3

	Resíduo reciclado	**Destinação de resíduo**	**RSU total**
Débitos	3.944,621	3.515,81	7.460,431
Créditos	-4.753,2	-191,128	-4.944,33
Líquido	-808,577	3.324,682	2.516,106

Fonte: Autores (2023)

Cherubini et al. (2008), ao analisar como a gestão de RS afetou o desempenho energético na cidade de Roma, destacaram a importância não só do tratamento dos resíduos sólidos, como também a eficiência na coleta e utilização do mesmo para alguma finalidade, neste caso a geração de energia. Os autores observaram que a abordagem que tratou tanto os RSO quanto os inorgânicos por meio da combustão teve o melhor desempenho, apresentando uma eficiência superior na recuperação de energia.

No cenário 3 também se realizou a simulação de uma quantidade menor de resíduos que foram encaminhados ao aterro sanitário, dando ênfase ao processo de DA através de biodigestores e compostagem, como consequência pode-se obter um valor reduzido da quantidade de CO_2eq, Mandpe et al. (2022) e Kaza et al. (2018), destacaram que unidades de aterro sanitário, emitem GEE mesmo após o encerramento de suas atividades. No ano de 2016, as emissões de GEE do setor de gerenciamento de RS totalizaram 1,6 bilhão de toneladas de CO_2eq, representando 5% das emissões globais (Lu; Qu; Hanandeh, 2020).

Vale destacar que a redução da quantidade de resíduos aterrados foi mais significativa para diminuir as emissões de GEE, do que a recuperação energética do biogás coletado Coelho e Lange (2016).

- Comparação entre os cenários

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Na análise comparativa entre os três cenários, percebeu-se que o cenário com maiores taxas de coletas e tratamentos através de biodigestores e compostagem, permitiu um gerenciamento de RS mais eficiente e com menos poluição atmosférica (Figura 10).

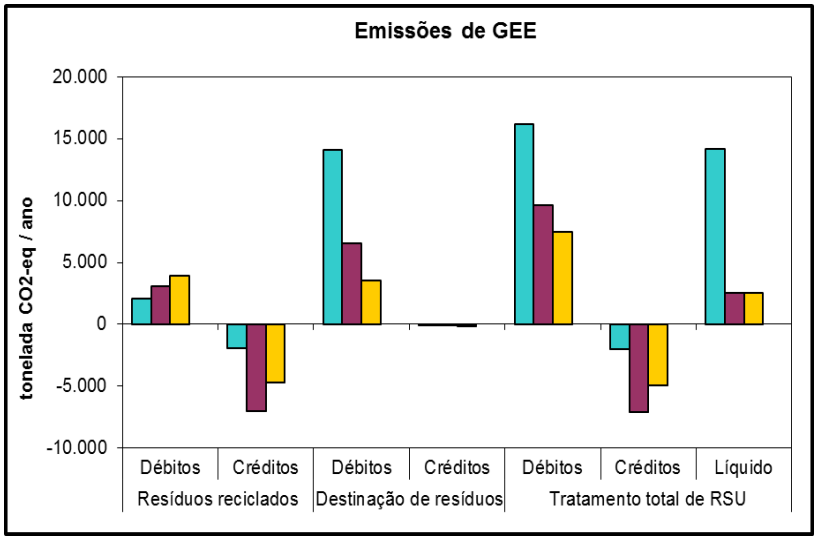


Figura 10. Débitos e créditos de CO_2eq referentes aos modelos de gestão dos três cenários propostos. Fonte: Autores (2023)

O Cenário 3 destacou-se significativamente ao apresentar resultados superiores de créditos em comparação aos demais, isto se deve ao fato da introdução de tecnologia de tratamento, a exemplo dos biodigestores, quanto a eficácia em capturar e utilizar integralmente o gás gerado para a produção de biometano e eletricidade, eliminando qualquer escape para a natureza. Este cenário foi o único que, pode-se visualizar um salto positivo relacionado as emissões de CO_2.

O Cenário 2 demonstrou um desempenho intermediário, apesar de apresentar uma maior eficiência na coleta de gás e na implementação da compostagem. O Cenário 1 obteve o resultado mais desfavorável, devido à sua ineficácia na coleta do gás gerado e a baixa taxa de reciclagem. Esse fato pode ser atribuído as altas contribuições de CO_2, além do CH_4, contido no biogás produzido no aterro que é queimado e não há recuperação de energia.

Ao considerar o valor total e comparar os três cenários, destaca-se que o Cenário 3 é o único que registrou uma relação líquida positiva na redução das emissões, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 11. Débitos e Créditos de CO_2eq para os três modelos de gestão

		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Resíduos reciclados	Débitos	2074,83	3052,27	3944,62
	Créditos	-1966	-7004,6	-4753,2
Destinação de resíduos	Débitos	14098,7	6570,19	3515,81
	Créditos	-32,38	-89,455	-191,13
Tratamento total de RSU	Débitos	16173,5	9622,46	7460,43

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

	Créditos	-1998,3	-7094,1	-4944,3
	Líquido	14175,2	2528,38	2516,11

Fonte: Autora (2023)

Nos cenários que se baseiam exclusivamente no aterro sanitário, a maior parte das emissões está associada à produção de gases provenientes da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos depositados, como o gás metano (CH_4) e o sulfeto de hidrogênio (H_2S).

Em todos os cenários, à medida em que os RS foram alocados em tratamentos alternativos em relação ao aterro sanitário, observou-se reduções de emissões de GEE. Desta forma, foi possível afirmar que o cenário 3 foi mais eficiente em termos de emissão de GEE.

Como no cenário 1, uma grande parte do RS é encaminhada ao aterro sanitário, Spokas et al. (2006) e Hrad et al., (2012) ressaltam que no local mencionado ocorre uma alta geração de GEE, visto a elevada emissão de gás metano, oriundo da decomposição de matéria orgânica, fato verificado pelos valores obtidos (79.843 TCO_{2eq}) para o ano de 2021.

Bovea e Powell (2006) afirmaram que a contribuição de impacto que ocorre no aterro sanitário é consequência direta das emissões dos GEE gerados, principalmente, pela liberação de CO_2 e CH_4 para a atmosfera (Banias et al., 2020; Yay, 2015). O impacto dessa etapa nas emissões totais foi identificado em estudos semelhantes como, por exemplo, Banias et al., (2020), Trentin et al., (2018), Mersoni e Reichert (2017) e Turner et al., (2016).

A alternativa de tratamento dos resíduos orgânicos por meio da DA resulta em eficiência energética não apenas considerando a produção de gases durante o processo de decomposição, como também a aplicação do composto orgânico resultante aumenta a qualidade do solo, resultando em menor quantidade necessária de fertilizantes sintéticos (California Environmental Protection Agency, 2017; IQBAL et al., 2019).

De maneira geral a reciclagem apresentou benefícios líquidos, cujos valores foram negativos em todos os cenários, ou seja, foi evitada liberação de GEE resultando em créditos ambientais (Coleho e Lange, 2018; Yildiz-Geyhan et al., 2019). A reciclagem apresentou essa mesma tendência nos estudos de Wang et al., (2022) e Yıldız-Geyhan et al., (2019).

3.2 Análise da Matriz SWOT

A seguir pode-se observar os resultados dos questionários aplicados aos especialistas. A Figura 11 apresenta os dados referentes aos pontos fortes da utilização de biodigestores no tratamento de RSO, ambos identificados na literatura e submetido aos participantes de forma de afirmativa.

Os termos A1, A2, A3 e A4 referem-se, respectivamente, as seguintes afirmativas do questionário:

(A1) Reciclagem de resíduos na fabricação de novos produtos.
(A2) Geração de energia renovável oriunda da produção de biogás gerado na DA.
(A3) Impactos econômicos através da utilização e venda do biogás.
(A4) Atuação da empresa nos preceitos do desenvolvimento sustentável.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

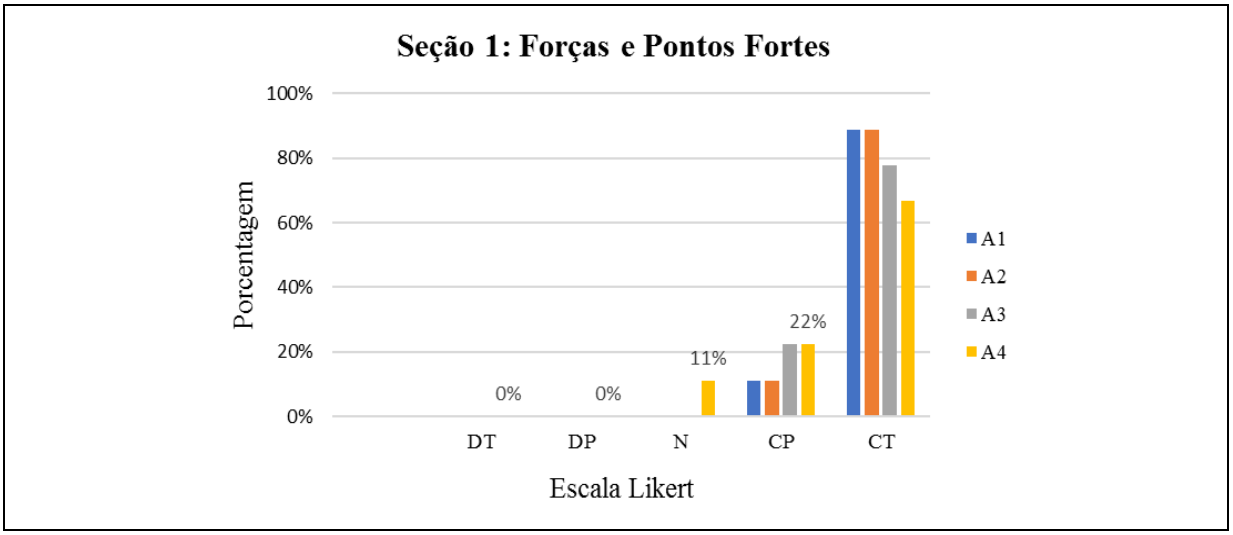


Figura 11. Respostas dos especialistas com relação a seção 1 (Forças e Pontos Fortes). Legenda: *A1: Afirmação 1; A2: Afirmação 2; A3: Afirmação 3; A4: Afirmação 4. *DT: Discordo Totalmente; DP: Discordo Parcialmente; N: Neutro; CP: Concordo Parcialmente; CT: Concordo Totalmente. Fonte: Autores (2023).

Analisando a referida figura, observa-se que 67% dos participantes concordaram totalmente com essa afirmação, enquanto 22% se mostraram indiferentes e outros 11% discordaram completamente.

O estudo aqui apresentado corrobora com os dados obtidos por Soares (2020), que analisou os pontos fortes do uso de biodigestores para tratar resíduos da suinocultura. O autor supracitado identificou como ponto forte: Redução do odor, moscas e larvas na manipulação dos resíduos orgânicos, produção de energia alternativa e limpa, geração de energia elétrica para alguns produtores, uso do biogás no fogão, redução/eliminação dos custos com energia.

A Figura 12 mostra os resultados referentes a segunda seção do questionário, relacionada às fraquezas e pontos fracos. Essa seção demonstrou uma maior disparidade nas respostas. As afirmativas A1, A2, A3 e A4 se referem, respectivamente, às seguintes afirmações no questionário: (A1) custos elevados associados ao transporte e armazenamento dos RO utilizados para abastecer os biodigestores; (A2) gastos significativos com infraestrutura para a construção e manutenção do biodigestor e da rede de distribuição do biogás; (A3) possibilidade de contaminação do solo, da água e do ar; (A4) inadequação na coleta seletiva.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

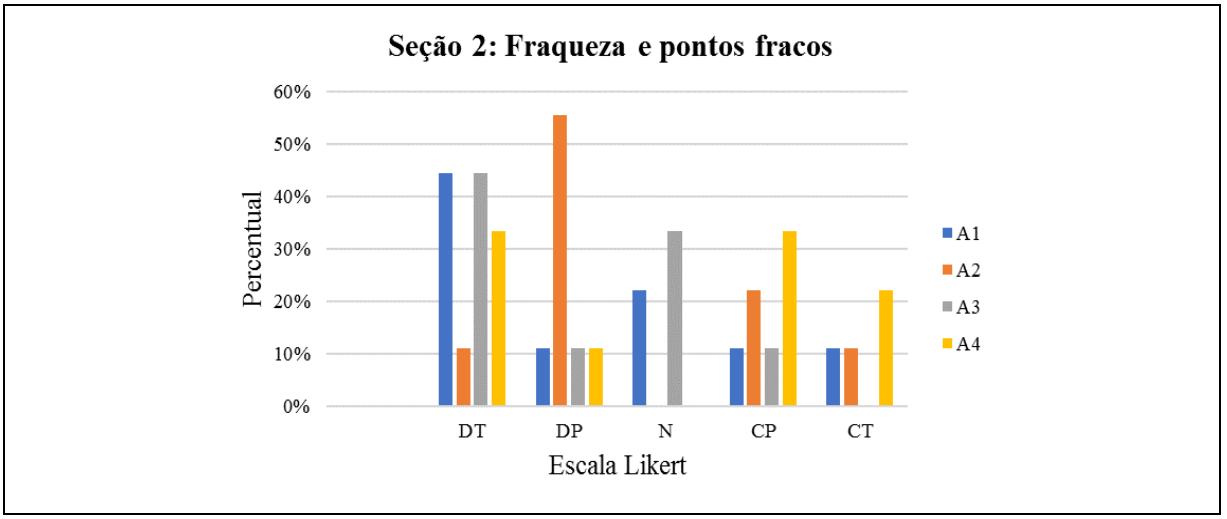


Figura 12. Respostas dos especialistas com relação a seção 2 (Fraquezas e Pontos Fracos). Legenda: *A1: Afirmativa 1; A2: Afirmativa 2; A3: Afirmativa 3; A4: Afirmativa 4. *DT: Discordo Totalmente; DP: Discordo Parcialmente; N: Neutro; CP: Concordo Parcialmente; CT: Concordo Totalmente. Fonte: Autores (2023).

Foram apontadas as seguintes respostas dos participantes com relação a afirmativa 1: 44% discordaram totalmente e 22% permaneceram indiferentes. Vondra, Tous e Teng (2019), Czekala et al. (2020), relatam o contrário, de forma que foi identificada dificuldade logística e o alto custo de transporte relacionado ao tratamento dos RSO enviados para os biodigestores.

Já, em se tratando do elevado custo com infraestrutura para construção e manutenção periódica do biodigestor e da rede de distribuição do biogás, mais de 50% dos participantes discordaram parcialmente da afirmativa, pois existem biodigestores de baixo custo que são projetados para serem mais acessíveis. Araújo (2020), afirma que questões financeirassão os principais fatores que interferes na logística de se fazer uso de biodigestores, especialmente para comunidades de menor renda ou áreas com recursos limitados.

A falta de incentivo governamental na nesse tipo de tecnologia de tratamento de RSO foi um dos principais fatores identificados por Winquist et al. (2019), Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2019) e Xue et al. (2019) e mencionados pelos especialistas que participaram da pesquisa. Todos os autores afirmaram que se houvesse incentivo governamental os biodigestores seriam mais difundidos e mais bem aproveitados.

Os biodigestores, de baixo custo, podem envolver o uso de materiais e técnicas mais simples, bem como a adaptação da escala do sistema para atender às necessidades locais. Embora possam ter um potencial de produção de biogás e biofertilizante mais limitado em comparação com sistemas mais sofisticados e dispendiosos, ainda podem fornecer benefícios significativos, como o tratamento de RO, geração de energia e a melhoria da fertilidade do solo com a produção e uso de biofertilizantes.

Na terceira afirmativa da sessão dois, analisou-se a possibilidade de contaminação do solo, da água e do ar em decorrência da utilização dos biodigestores para o tratamento de resíduos orgânicos, quarenta e quatro porcento (44%) dos entrevistados discordaram totalmente, estes apontam que os biodigestores, quando projetados e operados corretamente, não causam contaminação do solo, água e ar. No entanto, é importante ressaltar que problemas podem ocorrer se os biodigestores não forem adequadamente projetados, construídos ou operados. Por exemplo, vazamentos nos biodigestores ou descargas inadequadas de biofertilizantes sem tratamento, podem resultar em poluição do

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

solo e da água. Da mesma forma, a falta de manutenção pode levar a emissões de gases não tratados, como sulfeto de hidrogênio, que podem afetar a qualidade do ar.

Em se tratando da coleta seletiva adequada, abordada na afirmativa quatro da sessão dois, afirmou-se que a coleta seletiva é considerada um ponto fraco dentro do processo de tratamento de RS fazendo uso de biodigestores, pode-se perceber que 56% dos especialistas concordaram totalmente e 44% apontaram concordar parcialmente. Estes consideram que a coleta seletiva ainda é considerada um aspecto de difícil gestão e, consequentemente, impacta diretamente do tratamento de RS fazendo uso de biodigestores.

De maneira geral, um dos principais pontos abordados foram os custos elevados de implementação, assim como programas de coleta seletiva, que por muitas vezes são onerosos, envolvendo aquisição de equipamentos, treinamento de pessoal, logística de coleta e educação ambiental.

Além do elevado custo, Loizia, Neofytou e Zorpas (2019); Paul et al. (2018); Cecchi e Cavinato (2019); Abad et al. (2019), abordaram que os RSO devem ser separados corretamente, para não interferir na eficiência do biodigestor, o que na maioria das vezes não ocorre por parte do gerador de resíduo.

Outro ponto abordado foi a falta de conscientização pública sobre a importância da coleta seletiva e a separação adequada dos materiais que pode resultar em baixa adesão. Isso limita a quantidade de materiais recicláveis coletados e afeta a eficácia da atividade.

Para mitigar esses impactos negativos, é essencial um planejamento cuidadoso, educação pública eficaz, investimento em infraestrutura apropriada e políticas governamentais que incentivem a participação da comunidade na coleta seletiva.

Na seção três abordou-se as oportunidades externas que os biodigestores podem impactar, quando utilizado para tratar RSO. Em um primeiro momento questionou-se aos especialistas a respeito da conscientização dos consumidores acopladas as preocupações ambientais. A Figura 13 mostra que as respostas ficaram divididas, pois 44% para ambas as classificações (concordam parcialmente e concordam totalmente), para a afirmação de que a implementação de biodigestores dentro de uma EC atende a uma categoria de consumidores que demonstram crescente consciência em relação às questões ambientais.

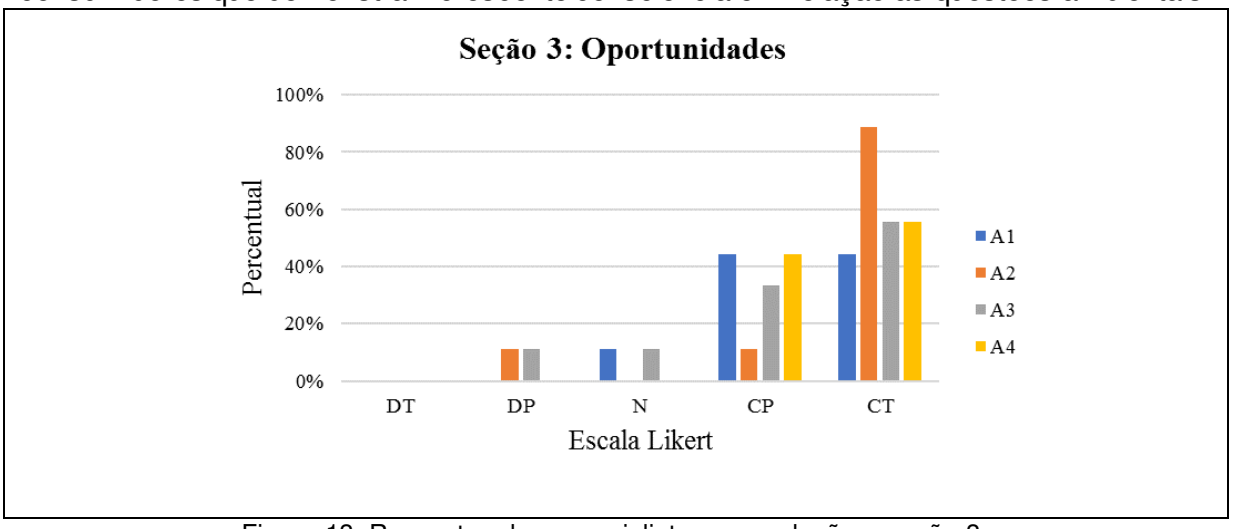


Figura 13. Respostas dos especialistas com relação a seção 3.
Legenda: *A1: Afirmativa 1; A2: Afirmativa 2; A3: Afirmativa 3; A4: Afirmativa 4
*DT: Discordo Totalmente; DP: Discordo Parcialmente; N: Neutro; CP: Concordo Parcialmente; CT: Concordo Totalmente. Fonte: Autores (2023)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Os especialistas apontaram que os consumidores conscientes, muitas vezes, procuram apoiar empresas e produtos que demonstram um compromisso real com a sustentabilidade. O uso de tecnologias, pode ser uma estratégia eficaz para atrair esse grupo de consumidores, mostrando que a empresa está adotando medidas concretas para reduzir seu impacto ambiental.

Para a afirmativa relacionada aos benefícios econômicos, por meio do comércio de carbono e da venda do biogás e do biofertilizante que são gerados no processo de tratamento de RSO, oitenta e nove porcento (89%) dos participantes demonstraram concordar totalmente com a afirmativa, pois além da premissa já conhecida de que o biogás produzido pelos biodigestores pode ser utilizado como fonte de energia para diversas finalidades, como geração de eletricidade, aquecimento ou cozimento, ainda pode-se acoplar outros benefícios econômicos, a exemplo pode-se citar:

- Redução de Custos Energéticos: Ao utilizar o biogás gerado internamente para suas próprias necessidades, para geração de eletricidade, isso pode reduzir os custos energéticos, proporcionando economias significativas ao longo do tempo.
- Receita Adicional através da venda dos créditos de carbono.
- Redução dos custos energéticos.

Produto de valor agregado através do biofertilizante.

- Melhoria na qualidade do solo.
- Marketing verde.

Na terceira afirmativa, dentro da seção de oportunidades, apontou-se sobre o sistema produtivo caracterizado como sendo vantajoso, devido à alta diversificação dos insumos, matéria-prima em abundância, acoplado ao baixo custo de mercado. Cinquenta e seis porcento (56%) dos entrevistados concordaram totalmente, 33% concordaram parcialmente e apenas 1% discordou em partes.

Com relação a obtenção de benefícios ambientais, relacionados a redução dos gases do efeito estufa, e sociais através do melhoramento da qualidade de vida para a população, 56% concordaram com a afirmativa e 44% concordaram em partes (Figura 23). Cecchi e Cavinato (2019); Kiselev et al. (2019); Slorach et al. (2019), também analisaram esta premissa, identificando o tratamento dos RO dentro do biodigestor reduz a emissão dos GEE na atmosfera configurando um ponto positivo do sistema.

A Figura 14 mostra os resultados da quarta seção, onde relacionou-se as principais ameaças dos biodigestores no tratamento de RS. Na afirmativa relatou-se sobre a falta de incentivo governamental, exemplificada pela carência de leis que subsidiem a implementação de biodigestores, ausência de incentivos fiscais para a adoção dessa tecnologia e escassez de infraestrutura adequada para a utilização eficiente do biogás. Setenta e oito por cento (78%) dos entrevistados afirmaram concordar totalmente com a afirmação, pois incentivos fiscais, como redução de impostos ou créditos tributários, podem tornar a adoção de biodigestores mais atrativa do ponto de vista financeiro. Sem esses incentivos, os potenciais usuários podem não ver vantagens suficientes para justificar o investimento.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

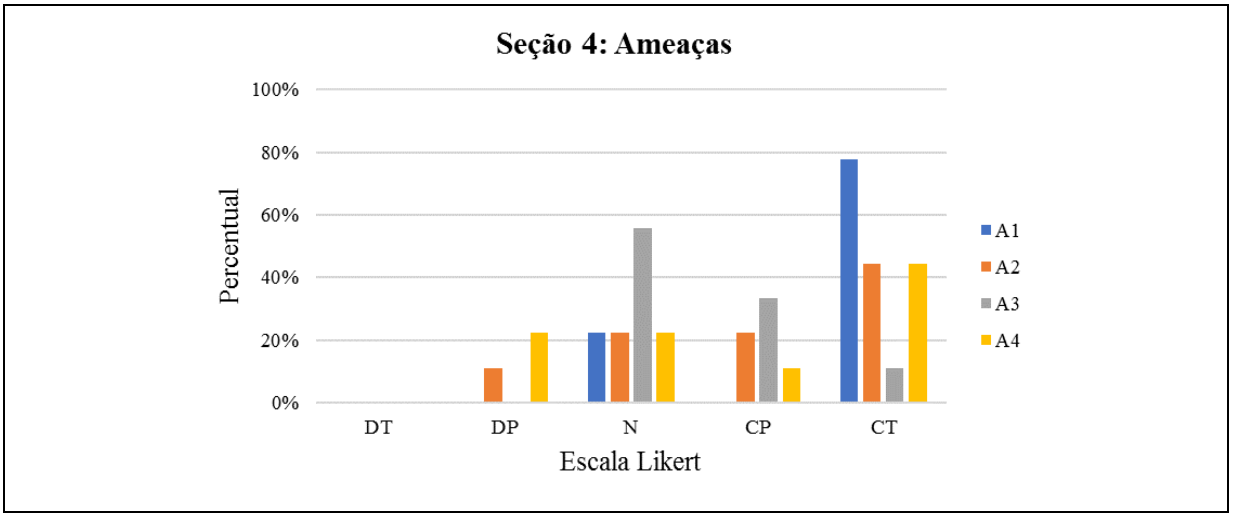


Figura 14. Respostas dos especialistas com relação a seção 4.
Legenda: *A1: Afirmativa 1; A2: Afirmativa 2; A3: Afirmativa 3; A4: Afirmativa 4
*DT: Discordo Totalmente; DP: Discordo Parcialmente; N: Neutro; CP: Concordo Parcialmente; CT: Concordo Totalmente. Fonte: Autores (2023)

Com relação a utilização eficiente do biogás gerado a partir dos biodigestores, observou-se que ele requer uma infraestrutura adequada para coleta, armazenamento e distribuição desse gás. Se essa infraestrutura não estiver disponível ou não for de fácil acesso, o potencial de utilização do biogás pode ser limitado.

A ausência de apoio governamental por meio de leis, incentivos fiscais e infraestrutura pode ser um obstáculo significativo para a implementação de biodigestores e a utilização eficiente do biogás. Superar esses desafios requer um esforço coordenado entre governos, setor privado e sociedade civil para promover a adoção de tecnologias mais sustentáveis.

Na afirmativa dois, trata sobre a falta de conhecimento e conscientização da população em geral, sobre os benefícios do uso de biodigestores, quarenta e quatro por cento (44%) demonstraram concordar totalmente com a premissa, 22% concordaram em partes, 22% se mantiveram neutros e 11% discordaram parcialmente. A falta de conhecimento e conscientização da população pode acarretar: baixa adoção do uso desse tipo de tecnologia, desperdícios de recursos, impactos ambientais, perda de oportunidade econômica, educação sobre sustentabilidade e resistência cultural ou social.

A afirmativa três, referente a ameaça do surgimento de fontes de energias renováveis mais atraentes. A maioria dos participantes (56%) se mostrou neutro com relação a afirmativa mencionada, 33% concordaram parcialmente e 11% concordaram totalmente. Slorach et al. (2019), também analisaram outros tipos de energias renováveis quando comparada ao biogás, estes identificaram a falta de previsibilidade para o futuro com relação a esta afirmativa.

As ameaças voltadas aos biodigestores foram principalmente com relação a possibilidade de declínio na produção dos insumos, por exemplos, problemas com transporte; diminuição da pecuária; utilização de dejetos para outra finalidade.

Na Tabela 12, pode-se observar a estatística descritiva das afirmativas do questionário e o Alpha de Cronbach das quatro dimensões analisadas (forças, fraquezas, oportunidades e ameaças).

Tabela 12. Estatistica descritiva das afirmativas do questionário e o *Alpha de Cronbach* das quatro dimensões analisadas

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

SWOT	Afirmativas	Média	Desvio Padrão	Variância	Assimetria	Curtose
FORÇAS (α=0,97)	Utilização de materiais considerados resíduos, como insumos/matéria-prima para novos produtos.	4,88	0,32	0,1	-2,62	5,26
	Geração de energia renovável por meio da produção do biogás	4,88	0,32	0,1	-2,62	5,26
	Maior lucratividade da empresa, coma utilização e venda do biogás e do biofertilizante.	4,66	0,48	0,23	-0,74	-1,56
	Atuação da empresa dentro de um desenvolvimento sustentável, um processo produtivo no qual respeite as limitações do meio ambiente e não polua.	4,55	0,69	0,48	-1,31	0,46
FRAQUESAS (α=0,78)	Alto custo com transporte e armazenagem dos insumos utilizados para abastecimento do biodigestor e do produto final: o biofertilizante e o biogás	3,7	1,3	0,38	-0,35	1,4
	Alto custo com infraestrutura para construção e manutenção periódica do biodigestor e da rede de distribuição do biogás.	3,6	1,3	0,1	-0,46	1,4
	Possibilidade de contaminação do solo, água e ar.	2,6	1,1	0,13	0,84	1,4
	Coleta seletiva inadequada	4,1	1,05	0,04	-1,09	1,4
OPORTUNIDADES (α= 0,82)	Atendimento a uma classe de consumidores cada vez mais consciente das questões ambientais.	4,3	0,7	0,08	-0,6	-0,28
	Benefícios econômico por meio do comércio de carbono e da venda do biogás e do biofertilizante.	4,7	0,44	0,17	-1,6	-0,73
	Sistema produtivo vantajoso, devido à alta diversificação dos insumos, matéria-prima em abundância, com baixo custo de mercado.	4,1	1,05	0,01	-1,09	0,61
	Obtenção de benefícios ambientais (redução dos gases do efeito estufa) e sociais (melhor qualidade de vida para a população).	4,5	0,52	0,02	-0,27	-2,57
AMEAÇAS (α= 0,76)	Falta de incentivo governamental, como por exemplo: leis de subsídio para construção do biodigestor; leis de incentivo fiscal para o uso de biodigestor; maior infraestrutura para utilização do biogás.	4,5	0,88	0,77	-1,62	0,73
	Falta de conhecimento e conscientização da população	4,1	1,16	1,36	-0,87	-0,8

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

em geral, sobre os benefícios do uso de biodigestores.					
Surgimento de fontes de energias renováveis mais atraentes.	3,7	0,83	0,69	0,5	-1,27
Possibilidade de declínio na produção dos insumos. Seja por exemplos como: problemas com transporte; diminuição da pecuária; utilização dos dejetos para outra finalidade.	3,4	1,2	1,52	0,41	-1,53

Fonte: Autores (2023)

Por meio da análise descritiva, foi possível identificar que as médias mais elevadas estão associadas às dimensões de "força" e "oportunidades", ao mesmo tempo em que os valores de erro padrão são mais baixos nessas dimensões. Além disso, os resultados de curtose indicaram que, para os participantes da pesquisa, há um nível de concordância mais substancial com as afirmações relacionadas à dimensão "força" em comparação com as afirmações da dimensão "oportunidade". Isso sugere que os respondentes tendem a expressar uma maior afinidade ou concordância com os aspectos relacionados à dimensão "força" em relação à dimensão "oportunidade".

As dimensões "forças", "fraquezas", "oportunidades" e “ameaças” mostraram valores satisfatórios para o coeficiente alfa de Cronbach, sugerindo consistência na confiabilidade interna das afirmações selecionadas para mensurar essas dimensões, conforme definido por Hair et al. (2019). De acordo com as diretrizes estabelecidas por Hair et al. (2019), os valores aceitáveis para o coeficiente alfa de Cronbach devem estar situados dentro da faixa de 0,70 a 0,90. Isso implica que as afirmações utilizadas para avaliar essas dimensões são consideradas confiáveis e consistentes na medição delas.

A matriz SWOT esta apresentada na Figura 15, que está subdividida em quatro quadrantes distintos. Os dois quadrantes superiores, identificados como "S" (Forças) e "W" (Fraquezas), dizem respeito ao ambiente interno das empresas ou organizações em análise. Por outro lado, os dois quadrantes inferiores, designados como "O" (Oportunidades) e "T" (Ameaças), estão relacionados ao ambiente externo. Os quadrantes à esquerda, que abrangem "S" (Forças) e "O" (Oportunidades), representam os pontos destacados pelos participantes da pesquisa que favorecem a adoção de biodigestores no contexto da Economia Circular (EC). Em contraste, os quadrantes à direita, incluindo "W" (Fraquezas) e "T" (Ameaças), identificam os aspectos levantados pelos entrevistados que representam obstáculos ou desafios para a implementação bem-sucedida de biodigestores no contexto da EC.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39



Figura 15. Resumo da matriz SWOT. Fonte: Autores (2023)

Na Figura 16, observa-se por meio de gráfico de tipo radar o resultado comparativo entre cada sessão (forças, fraquezas, ameaças e oportunidades).

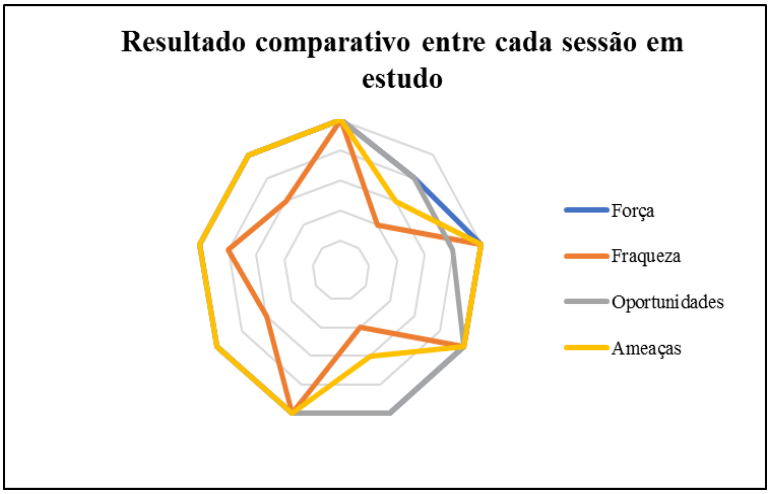


Figura 16. Resultado comparativo entre as sessões estudadas. Fonte: Autores (2023)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Foi possível analisar em termos de área, a contribuição de cada sessão nas afirmativas analisadas. Observou-se que os pontos do gráfico relacionados a fraquezas são os que merecem maior atenção quando se for fazer uso de biodigestores para tratamento de RO, visto que estes estão mais próximos do centro da figura, ou seja, na parte negativa do radar, apresentando um resultado menos satisfatório.

O presente estudo baseia-se em um estudo de caso único, desenvolvido em um restaurante de médio porte localizado no município de São Luís–MA, cujas características operacionais, volume de geração de resíduos, perfil de consumo e infraestrutura disponível podem não representar integralmente outros estabelecimentos do setor de alimentação ou realidades regionais distintas.

Ademais, a extrapolação anual dos dados foi realizada a partir de uma série temporal limitada a dois meses de coleta, ainda que se tenha adotado um modelo estatístico com estimativa de incerteza e intervalo de confiança de 95%. Dessa forma, variações sazonais associadas a períodos festivos, alterações no cardápio ou flutuações na demanda não foram plenamente capturadas.

Assim, a extrapolação dos resultados deve ser interpretada sob a condição de manutenção de padrões operacionais semelhantes aos observados no período de coleta, especialmente no que se refere à quantidade de refeições servidas, à composição gravimétrica dos resíduos e à eficiência operacional do biodigestor. Recomenda-se cautela na generalização dos resultados para escalas maiores, como redes de restaurantes ou sistemas municipais de gestão de resíduos, sendo necessária a realização de estudos complementares que considerem múltiplos casos e diferentes contextos socioeconômicos e regionais.

A integração entre os resultados da análise SWOT e os cenários de emissões de CO_2eq permite uma compreensão mais abrangente da viabilidade ambiental e estratégica da adoção de biodigestores no gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos. As forças identificadas na análise SWOT, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a geração de energia renovável e o aproveitamento do biofertilizante, refletem-se diretamente nos cenários que apresentaram menores valores de CO_2eq, especialmente aqueles com maior eficiência na biodigestão anaeróbia e no aproveitamento energético do biogás.

Por outro lado, as fraquezas apontadas, relacionadas aos custos iniciais de implantação, à necessidade de capacitação técnica e à manutenção dos sistemas, explicam as limitações observadas nos cenários com menor eficiência operacional. As oportunidades associadas ao fortalecimento de políticas públicas, incentivos econômicos e expansão da Economia Circular reforçam o potencial de ampliação dos cenários mais sustentáveis simulados neste estudo.

As ameaças identificadas, como a ausência de incentivos governamentais contínuos e a dependência de infraestrutura adequada, podem comprometer a replicabilidade dos cenários de menor emissão em contextos distintos. Dessa forma, a análise SWOT complementa os resultados quantitativos ao evidenciar que a redução das emissões de CO_2eq está condicionada não apenas a fatores técnicos, mas também institucionais, econômicos e sociais.

4. Conclusão

É de suma importância aprimorar a gestão dos RS, garantindo que sejam seguidas algumas ações prioritárias, a exemplo: evitar sua geração, reduzi-los, reutilizá-los, reciclá-los, tratar os resíduos sólidos e descartar os rejeitos de maneira

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

ambientalmente responsável. Além disso, é fundamental incorporar os princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social, adotando uma abordagem voltada a EC.

O presente estudo permitiu um maior detalhamento voltado para a gestão de RSO a serem tratados e utilizados como matéria-prima na produção de energia. Os resultados permitiram identificar que a tecnologia em questão apresenta impactos positivos no âmbito ambiental, social e econômico.

Especialistas na área afirmam que, tanto o biogás quanto o biofertilizantes contribuem para que empresas que adotem a prática aqui mencionada, opere dentro do paradigma da EC e do desenvolvimento sustentável. Logo, ainda se tem alguns entraves voltados a falta de incentivo governamental para que as empresas adotem essa prática de forma mais consolidada.

Outro ponto que se deve ter maior atenção é com relação a coleta seletiva dos RS, visto que no Brasil, essa atividade ainda não é tão difundida, principalmente em empresas de pequeno porte. Com relação a utilização eficiente do biogás gerado a partir dos biodigestores, o estudo aqui apresentado permitiu identificar que ele requer uma infraestrutura adequada para coleta, armazenamento e distribuição desse gás. Em relação aos impactos de emissões, os resultados apontam que quanto maior o tratamento de RSO, menor será o número de emissões de poluentes associadas.

Verifica-se que o cenário 1, modelo atual de gerenciamento de RS da área de estudo, teve o pior desempenho, devido ao grande número de materiais aterrados e poucas soluções alternativas que evitassem o aterramento. O biodigestor utilizado no local foi a única forma de destinação final que contribuiu de forma positiva com a redução das emissões de CO_2eq. Enquanto, os cenários 2 e 3 tiveram aumentos graduais de reciclagem e utilização de outras técnicas de tratamento, provocando redução mais significativa nas emissões.

Verificou-se que a reciclagem em ambos os cenários se caracteriza como fator indispensável para a redução de CO_2eq. Os cenários estudados destacam que é possível reduzir as emissões geradas pelos resíduos e prolongar a vida útil dos aterros sanitários, por meio da introdução de novas abordagens para o tratamento de resíduos e incentivos à modelos de gestão ambientalmente adequados.

De maneira geral a ACV encontra-se como sendo uma ferramenta crucial para orientar gestores na escolha das melhores soluções para uma gestão eficiente de resíduos, visando eliminar ou reduzir os impactos ambientais do sistema. Contudo, é de suma relevância continuar desenvolvendo pesquisas que aprimorem a aplicabilidade do cenário mais vantajoso.

Por fim, espera-se que esta pesquisa possa contribuir para a expansão de estratégias focadas na redução das emissões de CO_2eq, e nas adoções de informações relevantes para que os gestores possam decidir opções mais adequadas de gerenciamento de RS, principalmente em se tratando de restaurantes, que geram uma quantidade significativa de RSO. Visto que, segundo a PNRS, os RO são materiais impossibilitados de serem dispostos em aterro sanitário, devido seu potencial poluidor.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

Recomenda-se, ainda para trabalhos futuros: avaliação do custo do ciclo de vida dos tratamentos de RSO existentes, assim como ampliação de estudos sobre a viabilidade da planta de biodigestores e compostagem tendo em vista o potencial ambiental, econômico e social que estes tratamentos proporcionam.

Referências

ABOUDI, K.; et al. Anaerobic digestion of organic waste as a key pathway toward circular economy. Journal of Cleaner Production, v. 262, 2020.
AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.
AGUIRRE, L. A. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
AKERMAN, E.; HUMALISTO, N.; PITZEN, S. Circular economy as a pathway to sustainability transitions. Sustainability, v. 12, n. 9, 2020.
ARACIL, C.; et al. Environmental assessment of municipal solid waste incineration with energy recovery. Journal of Cleaner Production, v. 186, 2018.
BAD, V.; et al. Challenges and perspectives of anaerobic digestion of organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 101, 2019.
BANCO MUNDIAL. What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018.
BANIAS, G.; et al. Life cycle assessment of landfill emissions and management strategies. Waste Management, v. 102, 2020.
BOVEA, M. D.; POWELL, J. C. Developments in life cycle assessment applied to waste management. Waste Management, v. 26, n. 1, 2006.
BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 2018.
BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2022. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2024.
BRUHN, N.; et al. Linear economy and solid waste generation: challenges and perspectives. Waste Management, v. 155, 2023.
BUI, T. D.; et al. Sustainable solid waste management toward circular economy: challenges and opportunities. Journal of Environmental Management, v. 302, 2022.
CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. CalRecycle anaerobic digestion and composting guidance. Sacramento, 2017.
CECCHI, F.; CAVINATO, C. Smart approaches to food waste management. Waste Management, v. 78, 2019.
CHERUBINI, F.; et al. Energy and environmental performance of municipal solid waste management in Rome. Energy, v. 33, 2008.
COELHO, L. M. G.; LANGE, L. C. Carbon footprint assessment of solid waste management. Journal of Cleaner Production, v. 186, 2018.
CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE (CNS). Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 jun. 2013.
COSTA, G. R. Economia circular e impactos socioambientais na gestão de resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal, 2023.
CZEKALA, W.; et al. Logistic and economic aspects of anaerobic digestion of

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

organic waste. Renewable Energy, v. 146, 2020.
DALMORO, M.; VIEIRA, K. M. Dilemas na construção de escalas tipo Likert. Revista Gestão Organizacional, v. 6, n. 3, 2014.
DE CONTO, S. M.; et al. Caracterização gravimétrica de resíduos sólidos urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 4, 2009.
DONG, J.; et al. Greenhouse gas emissions from incineration without energy recovery. Waste Management, v. 68, 2017.
GHIDORSI, R.; et al. Environmental benefits of recycling in municipal solid waste systems. Waste Management & Research, v. 39, 2021.
GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy. Journal of Cleaner Production, v. 114, 2016.
GIEGRICH, J. Greenhouse gas emission factors for waste treatment and disposal. Heidelberg: IFEU, 2021.
HAIR, J. F.; et al. Multivariate data analysis. 8. ed. Harlow: Pearson, 2019.
HRAD, M.; et al. Landfill gas emissions and environmental impacts. Waste Management, v. 32, 2012.
IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama: IGES, 2006.
IQBAL, A.; et al. Comparative analysis of anaerobic digestion, composting and landfill. Journal of Cleaner Production, v. 211, 2019.
KAZA, S.; et al. What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018.
KISELEV, A.; et al. Environmental benefits of anaerobic digestion within circular economy. Sustainability, v. 11, 2019.
LA FUENTE JUNIOR, H. Gestão integrada de resíduos sólidos. São Paulo: Blucher, 2012.
LIU, Y.; et al. Integrated waste management systems with energy recovery. Waste Management, v. 63, 2017.
LOIZIA, P.; NEOFYTOU, N.; ZORPAS, A. Sustainable management of organic waste through anaerobic digestion. Waste Management, v. 87, 2019.
LU, W.; QU, Y.; HANANDEH, A. Global greenhouse gas emissions from waste sector. Journal of Environmental Management, v. 265, 2020.
MANDPE, A.; et al. Circular economy approaches for waste management. Resources, Conservation and Recycling, v. 176, 2022.
MANDELLI, S. M. Avaliação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos. São Paulo: CETESB, 1997.
MARGARITIS, M. Solid waste management and circular economy perspectives. Waste Management & Research, v. 36, 2018.
MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Life cycle assessment of landfill impacts. Waste Management, v. 63, 2017.
MICHELINI, G.; et al. From linear to circular economy. Journal of Cleaner Production, v. 175, 2017.
MOHAMMED, M.; et al. Impact of COVID-19 on solid waste management. Waste Management, v. 122, 2021.
PAUL, S.; et al. Source separation and efficiency of anaerobic digestion. Renewable Energy, v. 124, 2018.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 20/01/2026 - **Accepted:** 04/02/2026
Vol: 02.01
DOI: 10.61164/7e5d3286
Pages: 1-39

PLANARES – PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Proposta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF: MMA, 2020.
PLANSAB – PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos. Brasília, DF: MDR, 2019.
PUJARA, Y.; et al. Anaerobic digestion and composting as strategies for GHG reduction. Journal of Cleaner Production, v. 382, 2023.
RIPA, M.; et al. Environmental impacts of recycling systems. Journal of Cleaner Production, v. 168, 2017.
SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences and circular economy. Environmental Development, v. 17, 2016.
SILVA, J. A.; SOARES, L. P.; ROSSONI, H. A. Metodologia para caracterização de resíduos sólidos. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 26, n. 4, 2021.
SLORACH, P. C.; et al. Energy recovery from waste. Energy Policy, v. 126, 2019.
SOARES, J. F. Análise SWOT do uso de biodigestores. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal, 2020.
SPOKAS, K.; et al. Methane emissions from landfills. Waste Management, v. 26, 2006.
STANCHEV, P.; et al. Anaerobic digestion benefits within circular economy frameworks. Renewable Energy, v. 146, 2020.
STATISTICAL OFFICE BRAZIL. Energy statistics and emission factors for electricity generation in Brazil. Brasília, 2019.
TISEO, I. Organic waste treatment and greenhouse gas mitigation. Waste Management & Research, v. 38, 2020.
TRENTIN, A. W. S.; et al. Environmental performance of waste disposal systems. Journal of Cleaner Production, v. 172, 2018.
TURNER, D. A.; et al. Life cycle assessment of municipal solid waste management. Waste Management, v. 49, 2016.
VINUTO, J. A amostragem em bola de neve na pesquisa qualitativa. Temáticas, v. 22, n. 44, 2014.
VONDRA, M.; TOUS, M.; TENG, S. Y. Economic barriers of anaerobic digestion systems. Energy Reports, v. 5, 2019.
WANG, X.; et al. Recycling performance and greenhouse gas mitigation. Journal of Environmental Management, v. 308, 2022.
WINQUIST, E.; et al. Policy incentives for biogas production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 108, 2019.
XUE, Y.; et al. Government incentives and diffusion of anaerobic digestion. Energy Policy, v. 132, 2019.
YAY, A. S. Landfill emissions and climate change impacts. Waste Management, v. 39, 2015.
YILDIZ-GEYHAN, E.; et al. Recycling systems and greenhouse gas emissions. Waste Management, v. 95, 2019.