



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

DOUTORADO

**VALORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM SISTEMAS DE
BIODIGESTORES NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA**

Por

Graziela Pinto de Freitas

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa – Paraíba

Abril de 2024



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

DOUTORADO

VALORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM SISTEMAS DE BIODIGESTORES NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor.

Graziela Pinto de Freitas

Orientadora: Profa. Dra. Claudia Nobrega Coutinho

João Pessoa – Paraíba

Abril de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F866v Freitas, Graziela Pinto de.

Valoração de resíduos orgânicos em sistemas de biodigestores no contexto da bioeconomia / Graziela Pinto de Freitas. - João Pessoa, 2024.

106 f. : il.

Orientação: Claudia Nobrega Coutinho.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Lixo sólido - Restaurantes. 2. Resíduos orgânicos. 3. Biodigestor. 4. Economia circular. I. Coutinho, Claudia Nobrega. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.4.032(043)

GRAZIELA PINTO DE FREITAS

**VALORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM SISTEMAS DE
BIODIGESTORES NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA**

BANCA EXAMINADORA

Tese aprovada em 04 de abril de 2024.

Período Letivo: 2024.1



Documento assinado digitalmente
CLAUDIA COUTINHO NOBREGA
Data: 05/04/2024 11:56:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Claudia Coutinho Nóbrega– UFPB Orientador(a)



Documento assinado digitalmente
ELISANGELA MARIA RODRIGUES ROCHA
Data: 09/04/2024 11:35:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Elisangela Maria Rodrigues Rocha – UFPB Examinador(a)
Interno(a)



Documento assinado digitalmente
LARISSA GRANJEIRO LUCENA
Data: 09/04/2024 10:59:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Larissa Granjeiro Lucena – UFPB Examinador(a) Interno(a)



Documento assinado digitalmente
MARISETE DANTAS DE AQUINO
Data: 08/04/2024 07:22:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Marisete Dantas Aquino – UFC Examinador(a) Externo(a)



Documento assinado digitalmente
LUCIANA DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA
Data: 09/04/2024 09:03:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Luciana de Figueiredo Lopes Lucena – UFRN Examinador(a)
Externo(a)

João Pessoa/PB 2024

AGRADECIMENTOS

Ao longo da minha trajetória acadêmica, enfrentei diversas dificuldades e desafios, incluindo mudanças de tema da tese, transições pessoais e profissionais e até uma mudança de estado (Maranhão). Em meio a essas experiências, a perda de meu pai, logo no início do doutorado, se destacou como uma das provas mais difíceis. Recordo-me com emoção de como ele ansiava profundamente por testemunhar a realização desse sonho acadêmico. Ao refletir sobre essa jornada, sinto uma gratidão intensa pela sólida rede de amor, apoio e inspiração que me envolve. Esta pesquisa não teria se concretizado sem o carinho e encorajamento das pessoas queridas que estiveram ao meu lado, incluindo aquelas que conheci ao longo do caminho.

Agradeço primeiramente a Deus, por ter segurado minha mão e me proporcionado sabedoria para a idealização desse sonho.

À minha mãe (Maria Socorro), meu pai (Gabriel de Freitas) *in memoriam* e minha irmã (Gabriela Freitas) que sempre acreditaram em mim, e me incentivaram a seguir e nunca desistir dos meus sonhos, até mesmo aqueles em que eu não acreditava que seria capaz. Eles abraçaram essa aventura comigo e sempre estiveram disponíveis para me ajudar. Meu pai não está mais presente, mas sei que está realizado e orgulhoso dessa conquista.

À minha orientadora, Claudia Nóbrega, imensa gratidão, principalmente pela amizade e por compreender as adversidades encontradas ao longo deste processo tão intenso.

Ao professor, Gilson Athayde por ter me recebido e orientado de forma grandiosa no início do doutorado.

Aos amigos de longa data que sempre estiveram e se fizeram presentes em todas as horas, boas e ruins! Muito obrigada por me levantarem, aguentarem, animarem..., amarem e acreditarem em mim.

Aos amigos que fiz em São Luis -MA, agradeço toda força, apoio e por me acolherem tanto carinhosamente nesta cidade, em especial, Erika Pereira, Caroline Neres e Adriano Guimarães.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba (UFPB), responsável pela conclusão do meu mestrado e, agora, o doutorado. Meu reconhecimento a todos os professores.

RESUMO

O gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (GRSU) caracteriza-se como sendo um dos principais desafios enfrentados pela sociedade, com impactos significativos no âmbito ambiental, social, econômico e de saúde pública. Atualmente, já se tem várias tecnologias voltadas ao tratamento de tais resíduos, podendo-se citar como exemplo a Digestão Anaeróbia (DA) através do uso de biodigestores para produzir energia. Desta forma, objetivou-se com esta tese analisar as implicações do uso de biodigestores na no contexto da economia circular (EC), assim como quantificar as emissões de CO₂ equivalente em diferentes cenários propostos para a gestão e tratamento dos Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) em um restaurante, localizado na cidade de São Luiz-MA/Brasil, no ano de 2023. Inicialmente foi realizada a quantificação das emissões de CO₂eq da geração de RS de um restaurante, através da simulação de três cenários de modelos de gestão e tratamento de RS. Para quantificar as emissões, os resíduos do restaurante foram coletados, separados e pesados conforme sua categorização. Após a coleta das informações gravimétricas dos resíduos sólidos (RS), foi estudada a quantidade de emissões de CO₂eq emitida por diferentes modelos de gestão de tratamento e destinação de RS. Como opção de tratamento dos resíduos, estimou-se as emissões da compostagem e DA através do biodigestor, e como destinação final o aterro sanitário. A análise realizada apresentou todos os fluxos de emissões relacionadas aos resíduos, calculando as emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) das etapas do processo em Toneladas de CO₂eq. Realizou-se também um levantamento dos impactos da utilização dos biodigestores como opção de tratamento de RSO. Nesta etapa foi desenvolvido um questionário com base nos princípios da sustentabilidade e levando-se em consideração os métodos da matriz SWOT, ou seja, avaliação de pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças voltadas ao uso de biodigestores. Os questionários foram encaminhados e respondidos por especialistas na área da pesquisa. Em se tratando das emissões de CO₂eq, verificou-se que a atual rota tecnológica existente, ou seja, o aterro sanitário apresentou os maiores impactos ambientais e maiores contribuições de GEE. O tratamento biológico apresentou impactos positivos em todos os cenários analisados. Os resultados indicaram que por meio dos biodigestores ocorre a reciclagem de materiais classificados como resíduos, insumos ou matéria-prima na fabricação de novos produtos, sendo a tecnologia mencionada bastante promissora dentro do contexto das energias renováveis e da promoção da bioeconomia. O principal ponto negativo identificado foi com relação a coleta seletiva inadequada, pois 56% dos especialistas entrevistados afirmaram que a coleta seletiva nos municípios brasileiros ainda se apresenta de forma precária. Verificou-se 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 através dos biodigestores, pois o biogás produzido pelos biodigestores pode ser utilizado como fonte de energia para diversas finalidades. O estudo concluiu que os biodigestores voltados ao tratamento de RSO para produção de energia se mostraram eficiente em se tratando das emissões de CO₂, assim como no contexto da bioeconomia e, conseqüentemente, da sustentabilidade, além de propiciar a identificação dos principais pontos que deverão ter maior atenção pelos tomadores de decisão que pretendem fazer uso desta tecnologia, visto que ainda se tem poucos estudos voltados a temática estudada.

PALAVRAS-CHAVE: Restaurante; Pegada de Carbono; Economia Circular.

ABSTRACT

The management of urban solid waste (GRSU) is characterized as one of the main challenges faced by society, with significant impacts on the environmental, social and economic environment and public health. Therefore, currently there are several technologies focused on the treatment of such waste, such as Anaerobic Digestion (AD) through the use of biodigesters to produce energy. Thus, the objective of this thesis was to analyze the implications of the use of biodigesters in the bioeconomy, and quantify the emissions of CO₂eq in different scenarios of management and treatment of Organic Solid Waste (RSO). It was used the SWOT matrix methodology that is composed of the methods of evaluation of strengths, weaknesses, opportunities and threats aimed at the use of biodigesters for the treatment of CSR, the SWOT matrix was considered specialists working in the field of study. It was also performed the calculation of emissions of Greenhouse Gases (GHG) in the management of RS in a restaurant located in the city of São Luís - MA. The calculation used for gas measurement was through the creation of scenarios taking into account trends in the management of RS. The analysis presented all emissions flows related to waste, calculating the total GHG emissions of all stages of the process in Tons of CO₂eq. The results indicated that through biodigesters occurs the reuse of materials classified as waste, inputs or raw material in the manufacture of new products, and the mentioned technology is very promising within the context of renewable energies. The main weak point (negative) identified was in relation to inadequate selective collection, 56% of the experts interviewed said that selective collection in Brazilian municipalities still presents precarious. It was verified economic benefits, through carbon trading and sale of biogas and biofertilizer that are generated in the process of treatment of RS through biodigesters, already known that the biogas produced by biodigesters can be used as a source of energy for various purposes. The downside was the emergence of more attractive renewable energy sources. In the case of CO₂eq emissions, it was found that the current technological route, that is, the landfill presented the highest environmental impacts and higher GHG contributions. The biological treatment showed positive impacts in all scenarios analyzed. The study concluded that the biodigesters focused on the treatment of RO for energy production were efficient in terms of CO₂ emissions, as well as in the context of CE and consequently of sustainability, in addition to providing the identification of the main points to have greater attention by decision makers who intend to make use of technology, since there are still few studies focused on the subject studied.

KEYWORDS: Restaurant; Carbon Footprint; Circular Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metas do Planares por tipo de destinação final de Resíduos Sólidos.....	14
Figura 2. Perspectivas da biomassa com base nos recursos e nas necessidades.....	17
Figura 3. Fluxograma das etapas de geração de biogás.....	22
Figura 4. Biodigestor indiano.....	23
Figura 5. Biodigestor chinês.....	24
Figura 6. Biodigestor canadense.....	25
Figura 7. Crescimento do volume de biogás para uso energético no Brasil entre os anos de 2011 e 2021.....	28
Figura 8. Ciclo da Economia Circular.....	31
Figura 9. Fluxograma das emissões de cada etapa de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos – RS.....	42
Figura 10. Sistema produtivo da Avaliação de Ciclo de Vida de Resíduos Sólidos.....	43
Figura 11. Principais atividades que contribuem com o aumento dos gases de efeito estufa – GEE.....	46
Figura 12. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.....	51
Figura 13. Biodigestor modelo canadense utilizado no Restaurante A.....	54
Figura 14. Balança para pesagem dos resíduos.....	55
Figura 15. Gravimetria dos Resíduos Sólidos da área de estudo.....	56
Figura 16: Extrapolação dos dados.....	59
Figura 17. Cenário 01 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A.....	61
Figura 18. Cenário 02 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A.....	61
Figura 19. Cenário 03 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A.....	62
Figura 20. Composição gravimétrica.....	66
Figura 21. Emissões de CO ₂ -eq para o cenário 1.....	68
Figura 22. Débitos e créditos de CO ₂ -eq referente ao modelo de gestão do cenário 2.....	70
Figura 23. Débitos e créditos de CO ₂ -eq referente ao modelo de gestão do cenário 3.....	72
Figura 24. Débitos e créditos de CO ₂ -eq referentes aos modelos de gestão dos três cenários propostos.....	74
Figura 25. Respostas dos especialistas com relação a seção 1.....	76
Figura 26. Respostas dos especialistas com relação a seção 2.....	78
Figura 27. Respostas dos especialistas com relação a seção 3.....	80
Figura 28. Respostas dos especialistas com relação a seção 4.....	82

Figura 29. Resumo da matriz SWOT.....	87
Figura 30. Resultado comparativo entre as sessões estudadas.....	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 Hipótese.....	15
1.3 Estrutura da tese.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	17
2.2 Resíduos sólidos orgânicos.....	19
2.3 Biomassa proveniente de Resíduos Sólidos Orgânicos.....	20
2.4 Coleta seletiva no Brasil	22
2.5 Biodigestores.	24
2.6 Produção de biogás e biometano.	28
2.7 Economia Circular	30
2.8 Sustentabilidade no gerenciamento de Resíduos Sólidos no contexto da Economia Circular	34
2.9 Biodigestores associados a Economia Circular e a Bioeconomia.....	36
2.10 Modelo SWOT	40
2.11 Avaliação de Ciclo de Vida na gestão de Resíduos Sólidos.	43
2.12 Pegada de carbono.....	47
2.13 Gases do Efeito Estufa (GEE)	49
2.14 Mudanças climáticas e Gases do Efeito Estufa na gestão de resíduos sólidos.	-
3 MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1 Coleta e estimativa dos dados para quantificação das emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE).....	52
3.2 Avaliação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no manejo dos resíduos sólidos.....	58
3.3 Desenvolvimento do questionário para análise da matriz SWOT.	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.	67
4.1 Avaliação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no manejo dos resíduos sólidos.....	67
4.2 Análise da Matriz SWOT.....	76
5 CONCLUSÃO.....	89
REFERENCIAS.....	91
APÊNDICE 1.....	97

ANEXO 1.....	107
---------------------	------------

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, conseqüentemente, 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 (Michellini *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).

Na busca por um novo modelo alternativo para o desenvolvimento de práticas de gestão de RS e, conseqüentemente, 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.

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 CO₂eq emitidas ao meio ambiente?

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi quantificar e analisar as emissões de CO₂ equivalente em diferentes cenários propostos para a gestão e tratamento dos RSO em um restaurante, localizado na cidade de São Luiz-MA/Brasil, no ano de 2023, visando as implicações do uso de biodigestores no contexto da economia circular.

Para atingir esse objetivo, a pesquisa reuniu os seguintes objetivos específicos:

- a) Apontar estratégias para aprimorar a implementação e adoção dos biodigestores na EC.
- b) Estimar a quantidade de CO₂eq da geração de RS de um restaurante através de diferentes cenários de gerenciamento.
- c) Analisar as vantagens e limitações do uso de biodigestores no tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos e sua eficácia na sustentabilidade.

1.2 Hipótese

Esta tese de doutorado investigou a seguinte hipótese:

A implementação de biodigestores no processo de gestão e tratamento de RSO em restaurante de pequeno é uma atividade bioeconômica, levando a promoção da EC, assim como uma redução quantificável das emissões de CO₂eq, além de proporcionar benefícios adicionais como a produção de fertilizante natural.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, incluindo a introdução aqui mencionada como o primeiro. No segundo capítulo, é abordada uma revisão bibliográfica sobre o tema em estudo. Já no terceiro, estão descritas a metodologia utilizada para atender ao objetivo principal da pesquisa. No quarto capítulo, são apresentados os resultados e discussão acerca do que foi obtido. E por último, são apresentadas as considerações gerais, seguida das referências, apêndices e anexo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos sólidos

Resíduos sólidos (RS) caracterizam-se como sendo subprodutos provenientes das atividades humanas, que possuem qualquer processo tecnológico de aproveitamento economicamente viável, permitindo a sua utilização na fabricação de novos produtos e até mesmo na produção de energia. No entanto, quando destinados a locais inadequados, são considerados um dos principais problemas ambientais da atualidade (Santos *et al.* 2020).

No Brasil, o principal marco regulatório sobre os RS, foi a aprovação da Lei nº 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que representa um grande avanço na área, determinando a responsabilidade compartilhada da sociedade civil, iniciativa privada e poder público em relação às possíveis soluções referentes aos impactos negativos provenientes da geração de RS. A referida Lei está regulamentada pelo Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.

No artigo 3º inciso XVI da PNRS (2010), pode-se observar o conceito de RS como sendo:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Brasil, 2010)

Os RS também podem ser classificados, segundo as suas propriedades, podendo esta ser relevante no momento da escolha da estratégia de gerenciamento que mais se adeque a determinado cenário. A norma NBR 10.004 (2004), define a classificação de RS quanto a sua periculosidade, em decorrência de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podendo apresentar situação adversa na saúde pública e ao meio ambiente. Segundo NBR 10.004 de 2004 os RS podem ser enquadrados nas seguintes classes:

- CLASSE I: são os resíduos considerados perigosos, os RS que em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, podem ocasionar risco à saúde pública, incidência de doenças, e impactos negativos ao meio ambiente.

- CLASSE II A: também conhecidos como não inertes, e apresentam propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Estes resíduos podem acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente.
- CLASSE II B: são os RS, não oferecem riscos à saúde ou ao meio ambiente, pois apresentam características que quando em contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Com relação a geração de RS o Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (2023), afirma que durante o ano de 2022, gerou-se aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos no Brasil, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. O Plano mencionado aponta que as razões podem estar relacionadas às novas dinâmicas sociais, com a retomada da produção de resíduos no local onde foram gerados, com a menor utilização de *delivery* em decorrência do isolamento social ocorrido entre os anos de 2020 e 2021.

O PLANARES, instituído pelo Decreto Federal nº 11.043/2022, traz as diretrizes, metas, estratégias e ações voltadas para melhorias no processo de gestão de RS no Brasil de forma a colocar em prática as destinações adequadas dos resíduos (Figura 1).

Figura 1. Metas do Planares por tipo de destinação final de RSU

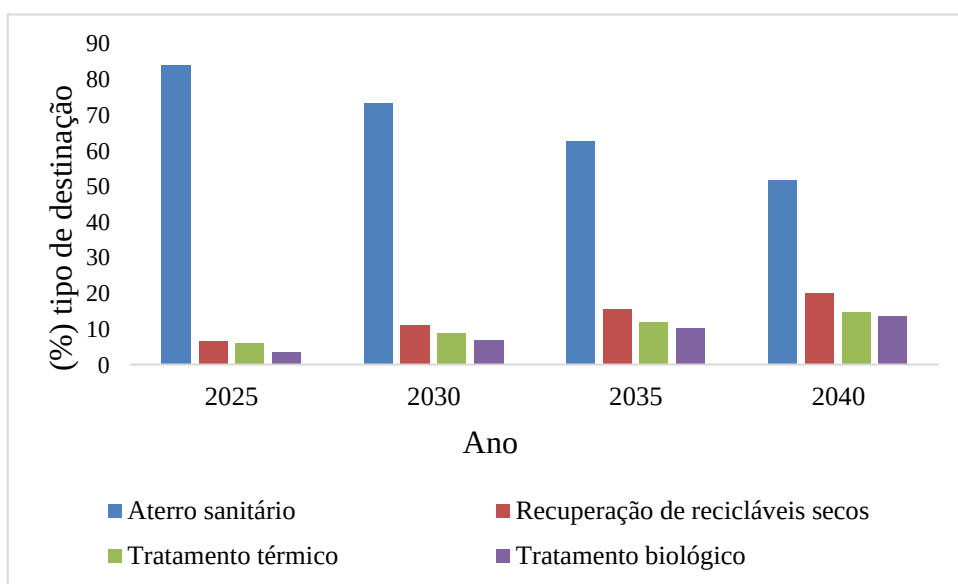


Figura 1. Metas do Planares por tipo de destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos
Fonte: PLANARES (2023)

Os RS quando não gerenciados e destinados a locais inadequados, ou seja, em desacordo com as normas ambientais, podem ser apontados como um dos principais causadores dos impactos negativos enfrentados pela sociedade, no entanto, quando tratados, apresentam vantagens econômicas com reflexo na questão sanitária, e na produção de energia com o aproveitamento do biogás (Silva *et al.*, 2020).

Essa prática diminui o volume de resíduos que são encaminhados para os aterros sanitários e, conseqüentemente, aumentam a vida útil destes, assim como reduz custo para o serviço público de limpeza urbana. Reaproveitamento de resíduos segue preceitos do *triple bottom line* do desenvolvimento sustentável, que é a busca por desempenho ambiental, social e econômico e que atuam como premissas fundamentais na instituição de políticas públicas (Costa; Melo; Beltrame, 2016).

Silva *et al.* (2020) explicam que uma das formas de minimizar impactos negativos decorrentes da produção elevada de RS é através do aproveitamento energético, proveniente do tratamento da fração orgânica dos RS. A substituição de combustíveis fósseis por RS na produção de energia, surgiu como uma alternativa de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e aumentar o uso de fontes de energias renováveis, prática que já vem sendo utilizada em vários países.

Vale destacar que o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) mostra o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) como uma solução viável do ponto de vista ambiental e econômico, contribuindo com a expansão da oferta energética de energia alternativa até 2030 (Brasil, 2010).

2.2 Resíduos sólidos orgânicos

Os resíduos sólidos orgânicos (RSO) são constituídos por restos de alimentos, podas e outros putrescíveis e representam mais de 40% da fração de RS urbanos coletados (Fernando; Lima, 2012; Brasil, 2020). Mesmo em cidades com maior grau de industrialização, o índice de geração de RSO pode atingir percentuais superiores à 57% (Zago; Barros, 2019).

O custo do sistema de coleta e destinação destes resíduos, em sua maioria, não é recuperado. Além disso, nos aterros, o RSO emite gás metano para a atmosfera, contribuindo para a emissão dos GEE. Caso estes resíduos orgânicos sejam tratados e valorizados por meio da digestão anaeróbia (DA) ou compostagem, tais emissões poderiam ser reduzidas. Vale ressaltar, que os RO podem gerar biogás e biofertilizantes, especialmente, se produzidos com material de fontes selecionadas (Abarca; Maas; Hogland, 2013; Zambon, 2018).

Devido à elevada quantidade de RSO gerados, a União Europeia definiu, algumas ações voltadas à redução da geração destes resíduos, dentre estas, disseminar as melhores práticas de gestão e tratamento dos resíduos alimentares (European Commission, 2015).

No Brasil, a PNRS, através da Lei nº 12.305/2010 previu, no art. 36, inciso V, a necessidade de implantação, pelos titulares dos serviços, “de sistemas de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articulação com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido” (Brasil, p.14, 2010). Desta forma, entende-se que aproveitamento da fração orgânica dos resíduos, assim como a implantação da coleta seletiva e da disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, faz parte das obrigações dos municípios instituída pela referida Lei. Esta Lei também responsabiliza os cidadãos e governantes sobre a prevenção e a redução na geração de RSO, manuseio, tratamento e disposição adequada.

Em se tratando do tratamento dos RSO, atualmente já se tem desenvolvido várias tecnologias voltadas a utilização de resíduos sólidos orgânicos para fontes alternativas de energia. Uma delas é a digestão anaeróbia, visto que as características do RO é quem vai informar a escolha do melhor método.

Os resíduos apresentam características variadas, a exemplo do pH, podendo este variar de 3,68 a 6,50, proporção de sólidos voláteis e sólidos totais de 0,79 a 0,97, entre outras características consideradas distintas (Zambon, 2018) a depender do tipo de RO. Porém, a maioria dos resíduos apresentam fácil biodegradabilidade, disponibilidade de nutrientes e elevado teor de umidade, o que contribui positivamente para uma eficiente Digestão Anaeróbia - DA.

2.3 Biomassa proveniente de Resíduos Sólidos Orgânicos

A biomassa representa uma das mais antigas fontes de energia proveniente de RS, logo após a energia solar. Além disso, é reconhecida como uma fonte de energia renovável devido à sua capacidade inesgotável de produzir recursos. Diversos exemplos de biomassa, como madeira, algas marinhas e resíduos animais, constituem-se de matéria orgânica que armazena energia por meio do processo de fotossíntese (Singh *et al.*, 2014).

De acordo com a EPE (2018), no contexto energético, a biomassa abrange todo recurso renovável derivado de matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal. Essa fonte de energia pode ser empregada na geração de calor para a indústria, na produção de eletricidade e pode ser convertida em diferentes formas de energia, como combustíveis sólidos,

exemplificados pelo carvão vegetal e briquetes, líquidos como etanol e biodiesel, bem como na forma gasosa, exemplificada pelo biogás proveniente da decomposição de RS (Seabra Jr, 2017).

A biomassa apresenta uma classificação em três categorias bem definidas: (1) biomassa primária, que abrange recursos diretamente resultantes do processo fotossintético e colhidos da natureza, como resíduos florestais e agrícolas; (2) biomassa secundária, composta por resíduos obtidos a partir do processamento físico, químico ou biológico dos recursos de biomassa primária; e (3) biomassa terciária, que engloba resíduos biodegradáveis originados de atividades humanas e de animais, como óleos vegetais e resíduos de embalagens degradáveis, entre outros (Singh *et al.*, 2014).

De acordo com Batidzirai *et al.* (2012), a classificação da biomassa pode ser efetuada com base nas necessidades ou no tipo de recurso, conforme mostrado na Figura 2.

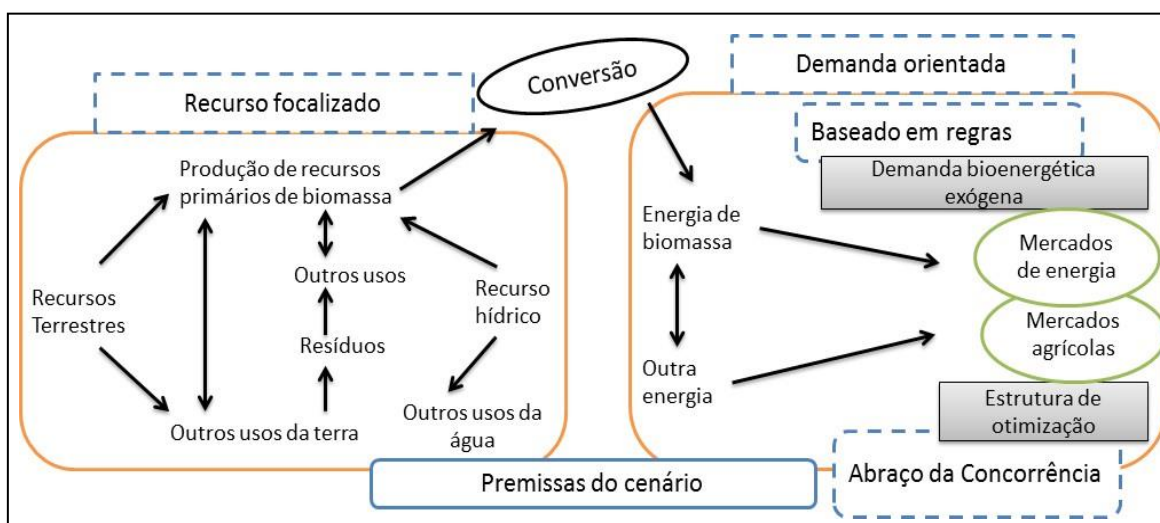


Figura 2. Perspectivas da biomassa com base nos recursos e nas necessidades
Fonte: Batidzirai *et al.* (2012)

No contexto das fontes de energia, de acordo com Wefle (2017), a energia derivada da biomassa desempenha um papel significativo, representando aproximadamente 10% do suprimento energético global. Desses recursos bioenergéticos, cerca de dois terços são gerados em nações em desenvolvimento, enquanto o terço restante provém de economias industrializadas. Long *et al.* (2013) relatam que a bioenergia, construída sobre os recursos da biomassa, emerge como uma alternativa fundamental aos combustíveis fósseis, capturando interesse generalizado ao contribuir com uma faixa estimada entre 9% e 13% do panorama global de abastecimento energético.

No Brasil, a presença da biomassa na matriz energética ainda é limitada, como indicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2022). Os empreendimentos em operação no país, responsáveis pela geração e fornecimento de energia elétrica, totalizam uma capacidade outorgada de cerca de 185,5 GW. Dentre esses, apenas 9,02% estão associados à energia gerada a partir do aproveitamento da biomassa, correspondendo a aproximadamente 16,7 GW (ANEEL, 2022).

Ainda que as grandes usinas hidrelétricas ocupem a posição central na produção de eletricidade brasileira, elas acarretam significativos impactos ambientais e sociais. Isso destaca a urgência da expansão de fontes de energia de menor impacto ambiental. A energia proveniente da biomassa é uma alternativa nesse sentido. Dependendo da tecnologia de tratamento empregada, a energia de biomassa pode apresentar custos operacionais e de construção substancialmente menores em comparação com as hidrelétricas (WWF, 2012).

Dentre as várias fontes de biomassa que, por meio de tecnologias de processamento, têm o potencial de serem aproveitadas para geração de energia, destacam-se os resíduos orgânicos. Esses resíduos possuem características distintas e, em geral, são classificados como lignocelulósicos. Eles constituem fontes abundantes de biomassa e são frequentemente gerados em grandes volumes por atividades agrícolas, florestais, municipais e agroindustriais (Santos, 2019; Paudel *et al.*, 2017).

2.4 Coleta seletiva no Brasil

De acordo com a Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, a coleta seletiva é caracterizada pela separação prévia de resíduos sólidos de acordo com sua constituição ou composição (BRASIL, 2010). A implantação da coleta seletiva, bem como o estabelecimento de metas para redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, a fim de diminuir a quantidade de resíduos destinados à disposição final, é de responsabilidade dos municípios, conforme previsto nos Planos Municipais de Gestão Integrada de RS.

A coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos, entendida como a separação e recolhimento específico de materiais nas fontes geradoras, com o objetivo de facilitar sua reutilização e garantir sua qualidade, é uma prática conhecida e realizada desde o início do século XX. As primeiras experiências organizadas desse tipo de coleta foram implementadas na Europa e nos Estados Unidos (Eigenheer; Ferreira, 2015).

Logo, segundo dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos - PLANARES (2022), a coleta seletiva ainda não é realidade em grande parte dos municípios e quando colocada em prática, não atinge todos os domicílios. Outro fator que não cumpre a premissa da coleta seletiva é a falta de segregação nos sistemas de entrega de resíduos recicláveis (secos e orgânicos), onde os resíduos ainda são recebidos misturados, diminuindo seu percentual de recuperação e aumentando o volume da disposição final (PLANARES, 2022).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), aponta que a coleta seletiva e a reciclagem são pontos primordiais no planejamento do tratamento e destinação final dos RS. Para que a gestão de RS seja eficiente, vale ressaltar que a mesma vai além do simples recolhimento diferenciado da massa de resíduo e da separação dos materiais, pois Conke e Nascimento (2018), explicam que envolve também o acondicionamento adequado e a destinação final apropriada. No contexto dos municípios brasileiros, a coleta seletiva é predominantemente realizada de forma informal ou organizada por associações e cooperativas de catadores (Klein; Dias; Jayo, 2018).

A região sul do Brasil, possui o maior número de cidades com alguma iniciativa de coleta seletiva, abrangendo cerca de 91% dos municípios. Por outro lado, a região centro-oeste apresenta a menor participação desses municípios nesse tipo de iniciativa. Outro fator de importante na coleta seletiva, é que essa atividade é desempenhada por catadores que enfrentam condições financeiras precárias, com baixa remuneração pelo trabalho realizado (Nascimento, 2021).

Existem diferentes modelos de coleta seletiva que podem variar de acordo com as características de gestão de cada município. Os três modelos mais comuns são: coleta seletiva porta a porta, coleta em pontos de entrega voluntária (PEV) e coleta informal realizada por trabalhadores autônomos. No modelo de coleta seletiva Porta a Porta, os resíduos são coletados diretamente na fonte geradora. A separação dos materiais é feita pelo próprio gerador, e os resíduos são recolhidos por veículos e equipes treinadas para essa finalidade.

Os postos de entrega voluntária (PEVs) são áreas designadas, previamente, para receber os resíduos. Nesse modelo, é responsabilidade do gerador encaminhar os materiais recicláveis para esses pontos específicos. Já, a coleta informal é realizada por catadores autônomos (que não fazem parte de cooperativas ou associações) que coletam diretamente os materiais recicláveis porta a porta. Esses trabalhadores atuam de forma autônoma, percorrendo locais como ruas, contêineres ou lixões em busca dos materiais que possam ser reciclados. Cada modelo de coleta seletiva possui suas características e desafios específicos, e a escolha do modelo a ser adotado dependerá das particularidades e recursos disponíveis em

cada localidade (Machado, 2022). Vale salientar, que o modelo dos catadores informais não deve ser adotado pelos gestores municipais, tendo em vista que esses profissionais trabalham em condições precárias.

2.5 Biodigestores

Biodigestores, também caracterizados como digestores, são equipamentos utilizados desde muitos anos, tendo como principal função a digestão de resíduos orgânicos em biogás e biofertilizante (Oliver, 2008). O biodigestor é um equipamento fechado e impermeável onde ocorre a decomposição da matéria orgânica através da digestão anaeróbica (Sganzerla, 1983). A Figura 3 mostra o princípio de funcionamento de uma usina de biogás.

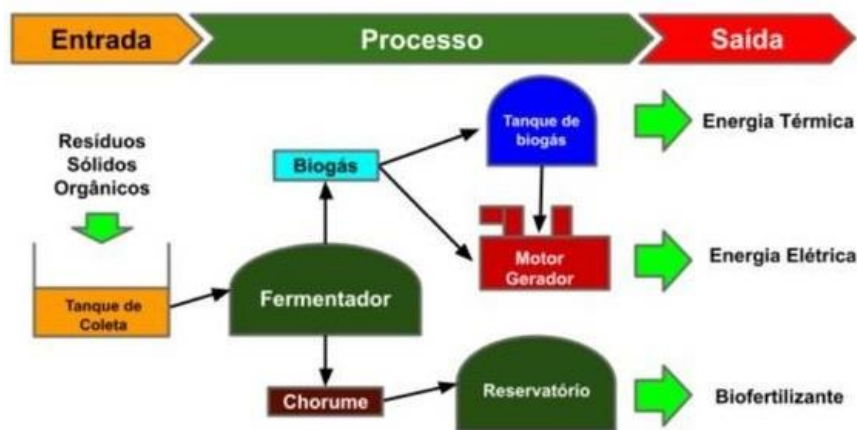


Figura 3. Fluxograma das etapas de geração de biogás
Fonte: Portal Biogás (2021)

Os biodigestores funcionam de forma anaeróbia e são constituídos por câmeras herméticas, na ausência de oxigênio, estes são abastecidos com material orgânico, onde ocorre a bioestabilização através de bactérias anaeróbicas. Durante a transformação dos compostos orgânicos complexos em compostos simples, ocorre a liberação do biogás e produção de insumos orgânicos na forma de biofertilizantes (Portal Biogás, 2021).

Nos últimos anos a busca por esses equipamentos vem crescendo bastante, visto seu baixo custo de construção, fácil operação e produção de energia de qualidade, contribuindo de forma positiva com o desenvolvimento sustentável e Economia Circular - EC. Lauer e Thrän (2017) ressaltam que em relação ao custo-benefício, as plantas de biodigestores, geram reduções de custo a longo prazo, dadas as vantagens em processos de redes de armazenamento e unidades de combinação e energia elétrica e térmica, visto que o intervalo entre a produção do gás e a sua utilização pode gerar desperdício do produto.

Em países europeus o número de biodigestores cresceu a partir do ano de 2016 nas áreas urbanas, com destaque para a Alemanha que se apresenta como o país europeu com maior capacidade de produção de biogás (Scarlat; Dallemand; Fahl, 2018). Um estudo realizado por Hansen, Mathiesen e Skov (2019) acerca da transformação na matriz energética alemã, mostra que o país será 100% renovável até o ano de 2050. Os autores sugerem que a produção de energia a partir da biomassa é viável para os setores de eletricidade, transporte e aquecimento, destacando o resíduo orgânico como elemento chave dessa cadeia.

No Brasil, os biodigestores estão concentrados em sua maioria nas áreas rurais considerando a grande atividade agrícola nacional, pois esta gera quantidades elevadas de resíduos orgânicos que servem como substrato para a produção do biogás (Santos *et al.*, 2018). O país tem uma das matrizes energéticas com mais opções de energias renováveis aplicadas no mundo, destacando-se principalmente pelo uso da hidroeletricidade, conforme explicam Silva, Neto e Seifert (2016).

Silva, Neto e Seifert (2016), afirmam que a maior parte do consumo energético da biomassa está voltado para a produção do etanol, levando o país a ocupar uma posição relevante no que tange a cadeia produtiva de combustíveis ambientalmente limpos, mas que por outro lado não aproveita outros tipos de resíduos orgânicos para outras formas de conversão em energia.

De acordo com Schmidell e Facciotti (2001), o biodigestor, pode ser categorizado com base no seu método de operação, sendo: biodigestores de fluxo contínuo, fluxo não contínuo, e biodigestores de batelada.

No sistema contínuo, a alimentação ocorre de forma constante, mantendo um fluxo estável e um volume de reação constante. Segundo Quadros (2010), é possível estabelecer um fluxo contínuo de líquidos no biodigestor, ou até mesmo utilizar múltiplos biodigestores em série. O líquido fermentado pode passar por um processo de separação de microrganismos, como sedimentação, centrifugação ou separação por membranas, garantindo a flexibilidade operacional.

Em se tratando do sistema semicontínuo, este é utilizado quando a disponibilidade de matéria orgânica – MO - é sazonal. Este sistema se diferencia do sistema descontínuo alimentado pelo fato de uma fração do líquido fermentado ser retirada, enquanto o reator é preenchido quase instantaneamente com uma vazão elevada. O líquido fermentado não retirado serve como inóculo para o meio de fermentação adicionado. Alguns autores questionam a existência do sistema semicontínuo, uma vez que em biodigestores muito

grandes, a possibilidade de preenchimento instantâneo é muito baixa, resultando em um sistema descontínuo alimentado (Sagula, 2017).

O biodigestor de batelada, é menos utilizado devido à sua baixa produtividade. No entanto, é indicado para RSO que se decompõem lentamente e têm um longo período de produção. Nesse sistema, prepara-se um meio de cultura adequado para nutrição e desenvolvimento dos microrganismos, que é colocado no biodigestor juntamente com os microrganismos responsáveis pelo processo biológico. Após o tempo estimado de fermentação, o material restante no biodigestor é removido e são realizadas as operações necessárias para a recuperação do produto (Sagula, 2017).

No sistema descontínuo, o inóculo a ser tratado no biodigestor, corresponde a uma fração de 10 a 20% do volume total, o restante é preenchido com um meio de cultura, levando-se em consideração uma vazão adequada, sem retirar o líquido fermentado, até que o volume útil do biodigestor seja preenchido. Não é obrigatório alimentar o reator com uma vazão constante, e as características dos microrganismos devem permanecer ativas no sistema. Caso contrário, o processo deve ser interrompido para reiniciar com um novo inóculo.

Os biodigestores também são classificados conforme o modelo, pois segundo Castanho e Arruda (2008), os principais modelos de biodigestores utilizados mundialmente são: indiano, chinês e o canadense.

O biodigestor indiano segue um formato semelhante ao de um cilindro vertical (Figura 4), construído com tijolos e revestido internamente com cimento impermeabilizante. Possui uma divisão interna formada por uma parede longitudinal, resultando em duas câmaras distintas. Em uma dessas câmaras, há um tubo que conecta o biodigestor à caixa de entrada do material orgânico, enquanto na outra câmara é conectado um tubo de saída para o biofertilizante. Uma característica importante desse tipo de biodigestor é a presença de uma campânula flutuante, feita de aço, que desempenha a função de um gasômetro.

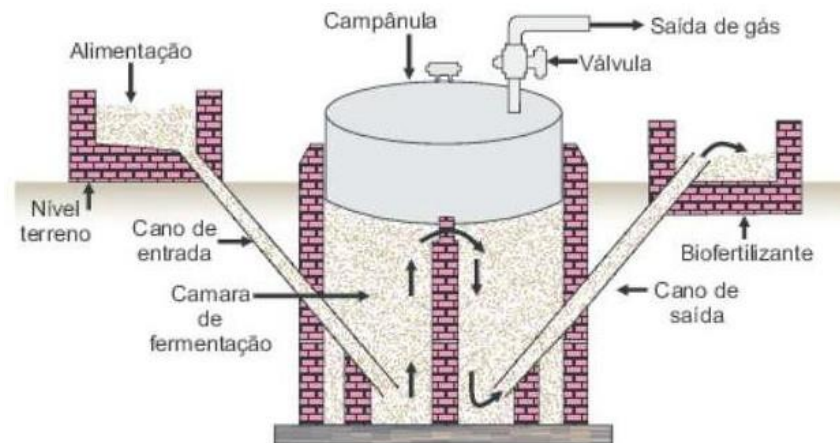


Figura 4. Biodigestor indiano
Fonte: Fonseca *et al.* (2009)

Uma das vantagens do modelo de biodigestor mencionado é a presença da campânula flutuante, que permite manter uma pressão constante na saída do biogás. Isso elimina a necessidade de ajustes constantes nos dispositivos que utilizam metano. No entanto, a desvantagem desse modelo é o custo associado à construção da campânula, que normalmente é feita de ferro. Para tornar esse modelo mais acessível no Brasil, a campânula de ferro foi substituída por uma versão de fibra de vidro. Essa substituição resulta em um preço de construção mais econômico, permitindo a disseminação mais ampla desse tipo de biodigestor no país (Sganzerla, 1983).

O biodigestor modelo chinês possui semelhanças com o indiano, porém a diferença está no fato de não possuir um gasômetro. De acordo com o Sganzerla (1983), o biodigestor chinês (Figura 5) é construído abaixo do solo, utilizando alvenaria, e seu teto tem formato de abóbada. Esse modelo apresenta um custo de construção inferior ao indiano, pois não requer a instalação de um gasômetro e utiliza materiais de menor custo (Nishimura, 2009).

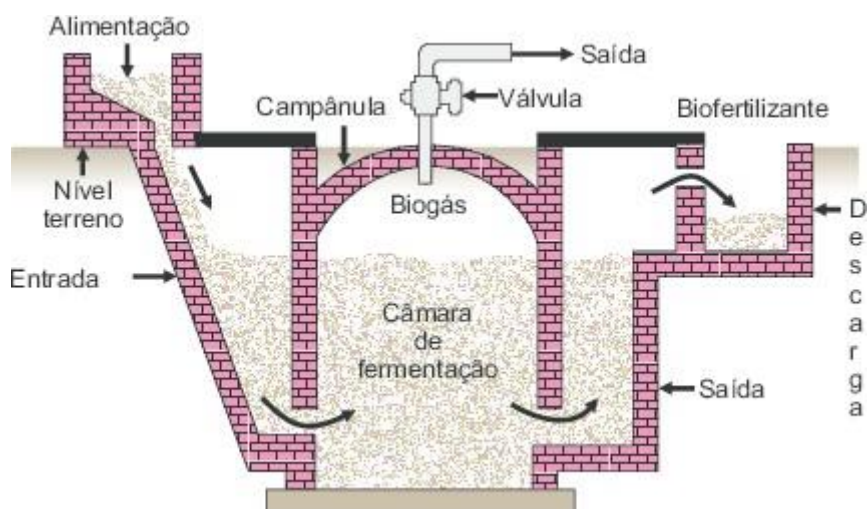


Figura 5. Biodigestor chinês
Fonte: Deganutti *et al.* (2002)

Como vantagem o modelo de biodigestor chinês, geralmente construído em alvenaria, apresenta menor custo de construção, uma vez que não requer um gasômetro de chapa de aço. No entanto, é importante observar que pode ocorrer vazamento se o biodigestor não for devidamente vedado e impermeabilizado. Além disso, esses biodigestores não são indicados para construções de grande porte, uma vez que uma parcela do gás pode ser liberada para a atmosfera.

O funcionamento desse tipo de biodigestor ocorre sob elevada pressão, que pode variar de acordo com a produção e o consumo do biogás. Portanto, é necessário incluir uma câmara de regulagem que permita trabalhar com baixa pressão. A impermeabilização das paredes internas e externas é destacada como uma medida importante para evitar a infiltração de água pluvial ou do lençol freático.

A profundidade do biodigestor é proporcional ao seu diâmetro, ou seja, quanto menor for a profundidade, maior deve ser o diâmetro do biodigestor. Essa relação deve ser considerada durante o processo de dimensionamento e construção do biodigestor.

A Figura 6 mostra o biodigestor modelo canadense, descrito por Granzotto *et al.* (2021), possui uma base retangular construída em alvenaria. Uma característica importante desse modelo é a presença de um gasômetro feito de manta flexível de policloreto de vinila (PVC), que é fixado sobre uma valeta de água que circunda a base do biodigestor. A cobertura do biodigestor é feita com uma geomembrana sintética de polietileno de alta densidade (PEAD), que é ancorada ao redor de todo o perímetro. Essa configuração permite a coleta do biogás gerado durante o processo de digestão anaeróbica.

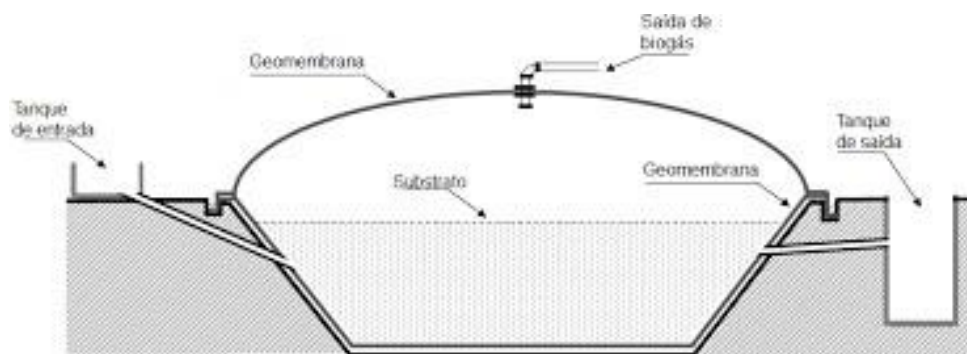


Figura 6. Biodigestor canadense

Fonte: Granzotto *et al.* (2021)

Esse modelo de biodigestor pode ser utilizado tanto em pequenas quanto em grandes propriedades. Embora o biogás gerado apresente pouca pressão, por questões de segurança, é recomendado instalá-lo a uma distância mínima de 10 metros de outras edificações (Calza *et al.*, 2015).

Durante o processo de produção do biogás, que pode durar de 40 a 60 dias, dependendo do tamanho do biodigestor, a cúpula do biodigestor infla devido à acumulação do biogás. Por esse motivo, é necessário que o material utilizado para a cúpula seja flexível, permitindo sua expansão conforme o acúmulo de biogás. É importante ressaltar que a largura do biodigestor deve ser maior do que a profundidade da vala em que está localizado, para garantir a estabilidade e o adequado funcionamento do sistema (Karlsson *et al.*, 2014). Com o avanço dos estudos sobre a digestão anaeróbica, foram desenvolvidos diversos tipos de biodigestores. Sant'Anna Junior (2013) apresentam uma variedade deles, incluindo:

- Reator LA (Lagoa Anaeróbica): trata-se de uma lagoa onde ocorre o processo de digestão anaeróbica.
- Reator FA (Filtro Anaeróbico): consiste em um filtro onde o material orgânico passa por camadas filtrantes anaeróbicas.
- Reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket): também conhecido como RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente), é um reator de fluxo ascendente com biomassa suspensa.
- Reatores híbridos: são combinações de diferentes tipos de reatores, como UASB + FA, que oferecem vantagens em termos de eficiência e tratamento.
- Reator compartimentado: apresenta compartimentos separados para diferentes estágios do processo de digestão anaeróbica.

- Reator EGSB (Expanded Granular Sludge Bed): também chamado de Reator Anaeróbico de Manta Granular Expandida, utiliza um leito granular para a digestão anaeróbica.
- Reator RBS (Reator Batelada Sequencial): opera em modo de batelada sequencial, onde diferentes etapas do processo ocorrem sequencialmente.
- Reator tipo LF (Leito Fluidizado): utiliza um leito de partículas fluidizadas para melhorar o contato entre o material orgânico e os microrganismos.
- Reator Anaeróbico com Membrana (RAM): combina a digestão anaeróbica com a utilização de membranas para a separação do biogás e efluente.

Esses diferentes tipos de biodigestores oferecem opções adaptáveis para diferentes condições e necessidades de tratamento de resíduos orgânicos. A escolha adequada do modelo de biodigestor a ser implantado requer a consideração de vários aspectos importantes. É necessário levar em conta a finalidade do biodigestor, as condições climáticas da região onde será instalado, o espaço físico disponível e o tipo de substrato que será utilizado para abastecê-lo (Neves, 2010).

Para avaliar o local de instalação, é necessário considerar as características do solo, a facilidade de obtenção dos insumos necessários, o preparo e armazenamento da biomassa, a facilidade de remoção e utilização do biofertilizante, além da distância de utilização do biogás. Idealmente, os locais mais adequados são aqueles com clima quente e baixa incidência de chuvas, proporcionando melhores condições para o processo de biodigestão (Winrock, 2008; Cortez, 2022).

Para realizar uma escolha assertiva do modelo de biodigestor, é recomendado consultar diretrizes e recomendações de instituições especializadas, como o Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais (ICLEI) e o Winrock International, que fornecem orientações sobre a seleção e implantação de biodigestores de acordo com as características específicas de cada localidade (Neves, 2010).

2.6 Produção de biogás e biometano

A tecnologia da digestão anaeróbia surge como uma perspectiva promissora na geração de energia renovável, sendo amplamente empregada no tratamento de uma variedade de resíduos, como resíduos agrícolas, industriais, orgânicos provenientes da coleta de resíduos sólidos urbanos, resíduos alimentares e esterco de animais. A Europa se destaca como uma líder na produção de biogás. Em 2015, o continente produziu 63,3 TWh de eletricidade a partir do biogás, equivalente ao consumo anual de energia de cerca de 14,6 milhões de famílias

(Shrestha *et al.* 2016; Pereira *et al.* 2016). No ano de 2019, a Europa manteve sua liderança na geração de biogás, contribuindo com 72% da produção global. Em termos de energia gerada a partir de biomassa globalmente, o biogás representou 13% dos 655 TWh totais (WBA, 2021).

De acordo com a World Biogas Association - WBA (2019), estima-se que existam aproximadamente 132.000 digestores de diversos portes operando em todo o mundo. A China se destaca com um total de 110.448 sistemas de biogás em funcionamento, sendo que 6.972 deles são de grande escala. Na Europa, há 17.783 usinas com uma capacidade instalada combinada de 10,5 GW. A Alemanha lidera o mercado europeu com 10.971 instalações, seguida pela Itália (1.655), França (742), Suíça (632) e Reino Unido (613). Nos Estados Unidos, operam 2.200 digestores anaeróbios, com uma capacidade instalada total de 977 MW.

Apesar de ter uma significativa parcela de energia renovável em sua matriz energética, o Brasil ainda está distante dos números registrados por nações europeias. Em relação à produção de biogás, no ano de 2016, o país contava com 165 usinas em operação, gerando cerca de 2,2 milhões de metros cúbicos por dia (Nm^3/dia), equivalente a aproximadamente 5.219 GWh anualmente. Notavelmente, a maioria do biogás era proveniente de aterros sanitários (IEA, 2017).

Segundo Mariani (2018), um estudo que diagnosticou a situação e propôs soluções para o biogás, no Brasil, identificou que a maior parte das plantas cadastradas até 2015 estava concentrada nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. As instalações de maior porte estavam particularmente presentes nos estados do Paraná e São Paulo.

Conforme informações do Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás (2022), o país conta com 811 plantas de biogás registradas, produzindo 2,82 bilhões de metros cúbicos por dia. Desse total, 755 usinas estão em operação, concentradas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

No que se refere ao volume de biogás usado para fins energéticos, houve um aumento de 10%, entre os anos de 2020 e 2021, conforme destacado na Figura 7, com um total de 2,3 bilhões de metros cúbicos em 2021.

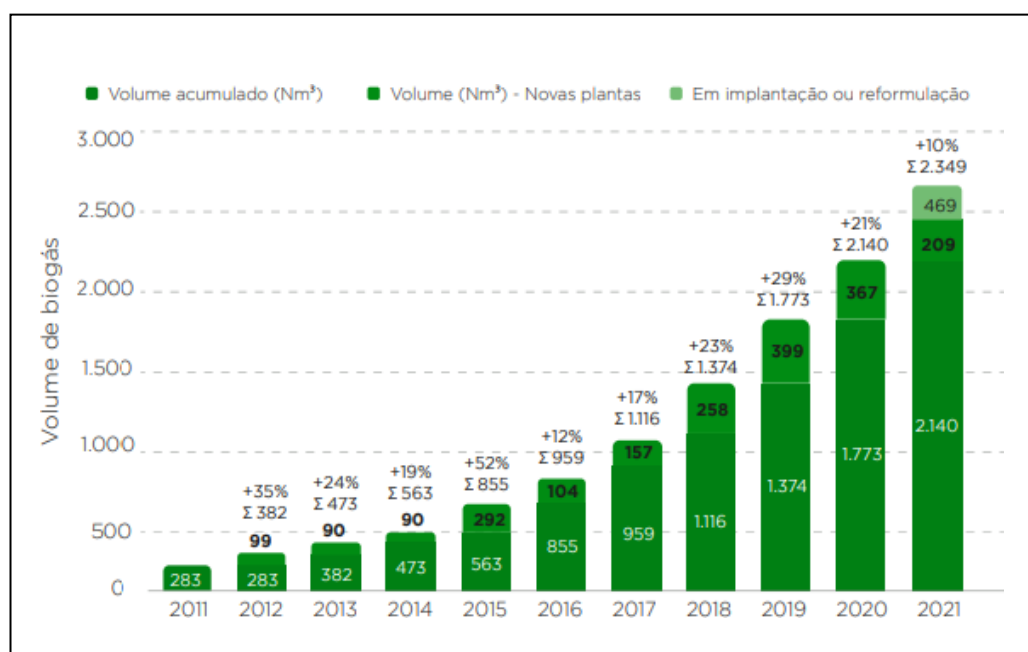


Figura 7. Crescimento do volume de biogás para uso energético no Brasil entre os anos de 2011 e 2021

Fonte: Biogás, (2022)

Devido às mudanças regulatórias, fica evidente que o aproveitamento do biogás no Brasil tem demonstrado novos indicadores. Destacam-se, entre esses, as diretrizes estabelecidas pela Resolução nº 685/2017 da Agência Nacional do Petróleo (ANP), bem como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Além disso, merece atenção o compromisso assumido pelo Brasil no Acordo de Paris durante a COP21, que se refere à redução de até 43% das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2030.

3.7 Economia Circular

A partir da Revolução Industrial a sociedade começou a se desenvolver de forma acelerada, porém esse crescimento foi realizado sem planejamento, ou seja, sem levar em consideração os impactos ambientais negativos que eram gerados sobre os recursos naturais. Segundo Bocken *et al.* (2017), foi a partir do século XX que as indústrias começaram a ter um olhar mais amplo para as questões do desenvolvimento sustentável.

Desta forma, surgiram-se os primeiros estudos e conceitos da EC dentro das indústrias, com foco no desenvolvimento econômico acoplado as questões ambientais. As indústrias começaram a perceber a importância do crescimento econômico de forma igualitária entre economia, sociedade e meio ambiente (Murray *et al.*, 2017).

Macarthur Foundation (2020) relata que no decorrer das pesquisas realizadas envolvendo o conceito de EC, existem vários pensamentos que retomam a ideia de crescimento acoplado a proteção ambiental, podendo-se citar: a Economia de Performance, Design Regenerativo, *Cradle to Cradle*, Ecologia Industrial, Biomimética e a *Blue Economy*. Por meio do pensamento do ciclo fechado de materiais e os princípios da Ecologia Industrial, o termo EC foi mencionado pela primeira vez no ano de 1990 pelos economistas David Pearce e Kerry Turner, os autores descrevem a economia e o meio ambiente como sendo um ciclo fechado (Andersen, 2007).

No ano de 1996, a Alemanha deu início a estudos voltados ao fechamento dos ciclos, por meio do “The Closed Substance Cycle and Waste Management Act”, que em 2012 passou a ser conhecida como “Circular Economy Act”, cuja tradução seria: “Ato para a Economia Circular” (Dornack, 2017).

Em 2014, foi publicado pela Comissão Europeia o primeiro relatório que abordou de forma detalhada a EC, o documento intitulado: Para uma Economia Circular: programa para acabar com os resíduos na Europa, enfatizou atividades ligadas à gestão e gerenciamento de resíduos, com foco na reutilização e reciclagem (Comissão Europeia, 2014). No ano de 2015, a comissão citada anteriormente, publicou o segundo relatório voltado para a EC, este tinha por objetivo “Fechar o ciclo”.

No segundo relatório pode-se perceber medidas mais detalhadas que abrangem a EC, onde foi deixado de lado o conceito de economia linear (produzir, consumir, descartar) para dar destaque ao processo de produção, consumo, gestão de resíduos, matérias-primas secundárias e reutilização dos recursos hídricos, definindo também o monitoramento dos avanços em relação a EC (Comissão Europeia, 2015).

O conceito de EC oferece estratégias para solucionar problemas ambientais, de forma a recuperar danos e reduzir ao máximo o desperdício de resíduos que podem ser utilizados como fonte de matéria prima para outros produtos. Conforme pode-se observar no Quadro 1, a EC é definida de forma micro, que abrange o modelo de produção e consumo, sendo está uma ferramenta para o desenvolvimento sustentável.

Quadro 1. Níveis da Economia Circular

Nível da EC	Campo de atuação	Objetivo	Maneira de execução
Micro	Empresa ou setor (independente)	Produção mais limpa	Redução de resíduos
Meso	Interações entre empresas ou setores diferentes	Indústria ecológica	Subproduto de um setor torna-se recurso bruto para outro
Macro	Sociedade como um todo	Integração dos incentivos à EC	Produção e consumo interligados

Fonte: Adaptado de Sauvé; Bernard; Sloan (2016) e Cortez (2022).

O principal objetivo da EC é substituir o termo “fim de vida”, dando ênfase no processo de redução, reutilização, reciclagem e recuperação, todos atuando de forma macro, meso e micro, visando obter o desenvolvimento sustentável voltado para a qualidade ambiental, econômica, social e cultural (Kirchherr *et al.*, 2017).

Como pode-se perceber a EC está alinhada aos objetivos ambientais e econômicos voltados a transformação dos produtos, desta forma Ghisellini, Cialani e Ulgiati (2016), explicam que a EC foi criada com base nos princípios dos 3R's (Redução, Reutilização e Reciclagem), que consiste em ações que visam à redução da geração de resíduos, seja por meio da minimização na fonte ou por meio da redução do desperdício. Os princípios dos 3R's são:

- Redução: busca melhor eficiência produtiva, também caracterizada como ecoeficiência. A redução busca a redução da entrada de energia e matérias primas no sistema produtivo. Incentivando o prolongando a vida útil dos produtos.
- Reutilização: caracteriza-se como sendo produtos que não sejam considerados como rejeito e podem ser utilizados em um novo ciclo aumentando a eficiência geral dos recursos e criando formas de uso.
- Reciclagem: refere-se a “qualquer operação de recuperação pela qual os resíduos são reprocessados em produtos, materiais ou substâncias para seus fins originais ou outros” (Directiva Europeia, 2008).

A EC é um sistema de reestruturação, realizado de forma que a minimizar tanto a entrada de recursos, quanto os desperdícios, ambos pela desaceleração, fechamento e estreitamento de loops de material e energia, este cenário proporciona uma nova perspectiva para a gestão dos resíduos e recursos, (Geissdoerfer *et al.*, 2018).

No entanto, para que as premissas da EC sejam colocadas em prática de forma correta, faz-se necessário o fornecimento de incentivos econômicos para garantir que produtos pós consumo sejam reintegrados no processo produtivo (Morseletto, 2020).

A EC pode ser composta por nutrientes biológicos, que são os recursos renováveis e nutrientes técnicos, caracterizados pelos recursos finitos, como pode ser observado na Figura 8. Dentro dos recursos renováveis, pode-se citar, a produção do biogás por meio da digestão anaeróbica (Ellen Macarthur Foundation, 2020).

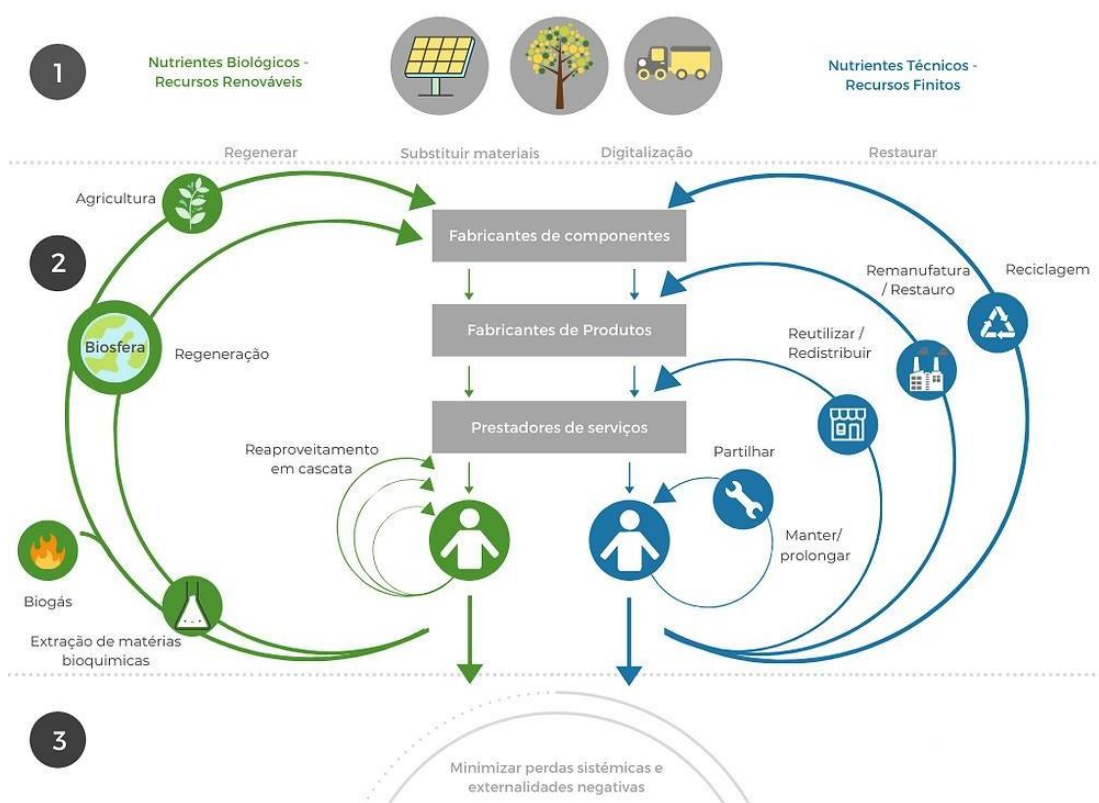


Figura 8. Ciclo da Economia Circular
Fonte: Ellen Macarthur Foundation (2020)

Como pode-se perceber a EC apresenta vários benefícios sociais, a exemplo da geração de empregos, oportunidade de acesso a bens e serviços, principalmente em países onde não há apoio governamental ou leis que implementem tais práticas, desta forma, cabe aos proprietários e acionistas de empresas desenvolverem as atividades voltadas ao fechamento do ciclo de produtos e bens materiais (Jabbour *et al.*, 2020).

Existem cinco entraves considerados como sendo principais dentro dos aspectos da EC: a) financeiro, através do baixo custo de materiais virgens; b) estrutural, devido às

dificuldades de comunicação na cadeia de abastecimento; c) operacional, relacionado a falta de capacidade operacional para adotar a EC; d) Atitudinal, pois muitas pessoas tendem a ter dificuldade em compreender a EC, não percebendo sua importância e magnitude de impactos positivos; e) Tecnológico, devido à dificuldade de acoplar a EC ao design do produto, ou até mesmo falta de tecnologia para rastrear resíduos e emissões do produto (Ritzén; Sandstrom, 2017).

Já para Jabbour *et al.* (2020), um dos principais entraves para a expansão e implementação da EC são os fatores técnicos, relacionados a necessidade inovações tecnológicas com custos mais reduzidos de tais tecnologias. Outra barreira apontada pelos autores está relacionada ao nível organizacional, devido à falta de comunicação entre departamentos e, conseqüentemente, da atuação de forma direta de cada um dentro da empresa.

Segundo Buchmann-Duck e Beazley (2020), a EC defende a economia dos serviços ecossistêmicos, a exemplo da bioeconomia, energias renováveis, ciclo de vida dos produtos, logo, cada um tem seus conflitos voltados a proteção da biodiversidade, porém se não forem planejados de forma adequada, podem levar o surgimento de impactos negativos.

2.7 Sustentabilidade no gerenciamento de Resíduos Sólidos no contexto da Economia Circular

Cosenza, Andrade e Assunção (2020) afirmaram que o atual modelo econômico de gerenciamento de RS opera de maneira linear, caracterizado pela extração, produção, consumo e descarte de resíduos. Esse padrão. O modelo mencionado apresenta como resposta uma utilização excessiva dos recursos naturais, resultando na geração indiscriminada de resíduos. Como consequência, observa-se um cenário de escassez e agravamento da degradação ambiental, especialmente diante do crescimento populacional global e da limitação de recursos para satisfazer as crescentes demandas de consumo.

A introdução da sustentabilidade, conforme definido no Relatório de Brundtland (1987), propõe atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades, foi o principal marco para os estudos voltados ao modelo linear. Esse paradigma passou a ser objeto de críticas, levando as políticas públicas a incorporarem diretrizes que buscam uma maior harmonia entre as atividades humanas e o meio ambiente. O objetivo é preservar os recursos naturais e promover o bem-estar humano de maneira mais equitativa do ponto de vista financeiro.

Conforme destacado por Castro *et al.* (2015), a gestão dos resíduos sólidos emerge como uma condição crucial para alcançar a sustentabilidade urbana global. A relevância desse tema no setor foi ressaltada pela publicação da Agenda 21, documento resultante da ECO-92, que salientou como padrões insustentáveis de produção e consumo comprometem a qualidade ambiental e contribuem para o agravamento das desigualdades, representando um desafio ao desenvolvimento sustentável (Born, 2006).

Em se tratando da legislação brasileira, a gestão de RSU é de responsabilidade do município, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988, que determina, em seu art. 30º, que estes devem legislar sobre assuntos de interesse local, especialmente no que se refere à organização dos serviços públicos. Entretanto, cidades localizadas em países em desenvolvimento, como as brasileiras, muitas vezes enfrentam desafios na implementação eficaz da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e na busca pela sustentabilidade de seus sistemas (Mannarino *et al.*, 2016). Um exemplo disso é a proibição de lixões, prazo que foi estendido devido à dificuldade de diversos municípios em cumprir as metas estabelecidas.

Fuss *et al.* (2018) identificam fatores que contribuem para essa problemática, incluindo orçamentos públicos insuficientes que direcionam políticas de baixo custo e soluções não sustentáveis. Além disso, interesses políticos, comerciais e econômicos discrepantes frequentemente resultam em soluções de curto prazo, ditadas pela duração dos períodos legislativos. Como resultado, uma parcela limitada dos resíduos sólidos é reciclada, e, no caso dos resíduos orgânicos, a compostagem é uma prática ainda pouco difundida.

Na União Europeia, existe uma regra chamada Diretiva 2008/98/CE, idealizou a ideia de que os países membros repensassem a maneira como gerenciam os resíduos. Essa regra visa proteger o meio ambiente e a saúde humana, buscando prevenir ou reduzir a produção de lixo e seus impactos negativos. Além disso, destaca a importância de usar técnicas adequadas para gerenciar, valorizar e reciclar o lixo, a fim de aliviar a pressão sobre os recursos naturais. A diretiva também introduziu uma hierarquia de resíduos, dando prioridade à prevenção, reutilização e reciclagem, conceitos amplamente adotados em todo o mundo. No Brasil, essa hierarquia foi incluída na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), seguindo os princípios do desenvolvimento sustentável.

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) propôs a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que inclui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com 169 metas abrangendo diversas áreas. A gestão de resíduos sólidos está diretamente relacionada aos ODS 6 (Saneamento), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 12 (Consumo e Produção Sustentáveis). Por exemplo, o ODS 12 destaca a importância de

reduzir significativamente a quantidade de lixo gerado por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso até 2030.

Diante deste cenário, foi possível tornar a gestão de resíduos mais sustentável, promovendo o conceito de economia circular (EC). Esse termo significa transformar a maneira linear de usar recursos em um modelo que favorece a recirculação desses recursos ao longo do ciclo de vida de produtos, processos ou serviços. Isso visa reduzir o desperdício e promover o reuso, reciclagem e recuperação de materiais e energia, diminuindo assim a pressão sobre os recursos naturais.

Segundo Andrade Junior *et al.* (2017), a ideia de EC dos RS possibilita que sejam iniciados novos ciclos, sendo utilizados como insumos em outros processos. Isso tem o potencial de reduzir a necessidade de extrair novas matérias-primas, economizar energia e minimizar a disposição de resíduos. A EC, ao promover a otimização e reutilização de recursos, contribui para a diminuição de perdas financeiras, fortalecendo assim a dimensão econômica da sustentabilidade.

Enquanto a EC busca uma economia sustentável de forma a contribuir positivamente com o meio ambiente, ou seja, com o uso adequado dos recursos naturais, o desenvolvimento sustentável almeja um equilíbrio entre as dimensões social, econômica e ambiental (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016). Vale destacar a importância de notar que, embora a EC seja vista como um meio para atingir a sustentabilidade, nem todos os sistemas que incorporam fluxos circulares são automaticamente sustentáveis. Isso ocorre porque alguns desses sistemas podem focar principalmente na preservação ambiental, deixando de lado as perspectivas dos outros dois aspectos da sustentabilidade, que são o econômico e o social.

2.8 Biodigestores associados a Economia Circular e a Bioeconomia

A bioeconomia caracteriza-se como sendo uma abordagem econômica que faz uso de recursos biológicos de forma sustentável, com objetivo de produzir alimentos, materiais e até mesmo energia, como é o caso do tratamento de RSO através do uso de biodigestores. Esta tem como embasamento teórico que os recursos biológicos podem ser gerenciados de maneira eficiente e ambientalmente correto para atender às necessidades humanas (Barba; Santos, 2020).

A bioeconomia incentiva uma atividade que possa beneficiar o meio social, ambiental e econômico. É através da bioeconomia que se desenvolvem biocombustíveis, alimentos seguros e com maior rendimento na produção agrícola.

Segundo Carus e Dammer (2018), a EC e a bioeconomia são conceitos complementares, porém com dimensões distintas, mas ambas visam substituir o carbono fóssil por fontes renováveis. A bioeconomia concentra-se na utilização de biomassa, enquanto a EC promove o uso de materiais reciclados e a eficiência dos recursos nos processos. Ao adotar e implementar essas práticas, é possível reduzir o uso adicional de carbono fóssil em produtos ou emissões durante a fabricação e extração, enquanto a economia circular busca minimizar a perda de valor em materiais e produtos, além de preservar os recursos pelo maior tempo possível.

O uso de biodigestores dentro da perspectiva da EC, juntamente a bioeconomia, apoia-se no conceito de desenvolvimento sustentável, abrangendo impactos positivos no pilar social, econômico e ambiental. Um exemplo citado por Zhao *et al.* (2016), está no modelo de utilização de biodigestores no campo agrícola, que prioriza a utilização do biogás, este cenário pode trazer economia de energia, reduções de carbono, diminuindo assim o uso de energia derivada de combustíveis fósseis, assim como o resíduo orgânico que antes iria ser descartado, pode voltar ao sistema produtivo. Esses autores sugerem a adoção de biodigestores como uma das formas de introduzir a EC nos processos produtivos, uma vez que os biodigestores atuam com sintonia com o reaproveitamento dos resíduos e, conseqüentemente, com as diretrizes do desenvolvimento sustentável (Zhao *et al.*, 2016).

O gerenciamento de resíduos sólidos dentro do processo de EC está além das práticas de reutilização e reciclagem, saindo de sistema linear, passando a fazer parte de um elo entre o fim e o início de um ciclo, pois a DA dos resíduos orgânicos fazendo uso de biodigestor é uma forma estratégica de implementar a EC dentro do processo de gerenciamento e aproveitamento energético dos RS (Blomsma; Brennan, 2017; Diamantis *et al.*, 2021).

Segundo Hidalgo, Marroquín e Corona (2019), a DA de resíduos orgânicos caracteriza-se como sendo um processo que atua de forma direta as diretrizes da EC, pois a mesma apresenta-se como sendo uma solução viável tanto para o tratamento de resíduos, quando para a produção de energia de forma sustentável.

O processo de DA de resíduos orgânicos acoplado a EC, tende a promover a redução dos GEE, contribuindo com a geração de benefícios no âmbito ambiental, social e econômico. O modelo de EC, assim como o uso de biodigestores no tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento energético, tende a promover redução das emissões de GEE, contribuindo positivamente com o comércio de carbono, visto que as empresas que adotarem tecnologias de baixo carbono, ou seja, emitindo menos carbono do que o determinado pelo governo,

podem vender o excesso por meio do comércio de carbono (Xue *et al.* 2019; Liu; Wan; Fu, 2018; Xia; Li; Zhu, 2020).

Xue *et al.* (2019), relatam que o modelo EC também impacta positivamente na redução do aquecimento global, aumento da produção de biogás e, conseqüentemente, promove o desenvolvimento sustentável, pois atua diretamente na substituição de combustíveis fósseis e, a substituição dos fertilizantes tradicionais pelo biofertilizante.

Diante deste cenário, pode-se afirmar que os gestores e pesquisadores devem acoplar a EC, ao tratamento de RSO com uso de biodigestores, incentivando o uso de energia renovável e contribuindo com as diretrizes do desenvolvimento sustentável. Visto que, o desenvolvimento de subsídios para implementação de biodigestores deve sempre levar em consideração o bem-estar social, o desenvolvimento econômico e a redução de danos ambientais.

A EC acoplada ao uso de biodigestores no tratamento de RO pode representar também uma resposta para a melhoria das atividades atuais de gestão de RS no mundo, uma vez que levam em consideração o princípio da valorização e reciclagem dos resíduos para dinamizar as economias em desenvolvimento (Feronnato *et al.*, 2019).

Em se tratando das desvantagens da construção de biodigestores e produção de biogás, pode-se citar a queima do mesmo, o gás metano, que é um dos principais componentes do biogás, esses processos também resultam em emissões de carbono devido à liberação do dióxido de carbono (Feronnato *et al.* 2019). A Tabela 1 mostra as desvantagens e as descrições de biodigestores.

Tabela 1. Desvantagens e descrições dos biodigestores

Desvantagens	Descrição	Autores
Altos custos associados ao transporte	O transporte dos dejetos até o biodigestor ou das terras onde o biofertilizante será utilizado pode resultar em altos custos, especialmente quando existe uma grande distância entre esses pontos.	Rada <i>et al.</i> (2019); Czekala <i>et al.</i> (2020)
Potencial energético do setor	Desconhecimento do potencial energético que pode ser obtido com o uso do biogás.	Winqvist <i>et al.</i> (2019)
Coleta seletiva	Os dejetos devem ser separados corretamente, para não interferir na eficiência do biodigestor. A falta de conhecimento da população sobre as vantagens dos biodigestores, bem como a necessidade de uma separação adequada dos dejetos.	Winqvist <i>et al.</i> (2019)
Contaminação do solo e água	Se o biodigestor não for construído em um local adequado ou não for feito de maneira apropriada, existe o risco de contaminação pelos resíduos contidos dentro	Rauseo <i>et al.</i> (2019)

	do biodigestor ou durante o armazenamento dos mesmos.	
A viabilidade econômica de pequenas plantas ou pequenos produtores pode ser desafiadora	A geração de biogás pode ser desafiadora quando a quantidade de dejetos disponíveis para o abastecimento é pequena. O processo de digestão anaeróbica, que é responsável pela produção do biogás, requer uma quantidade adequada de matéria orgânica para que ocorra uma fermentação eficiente e a produção de biogás seja viável. Se a quantidade de dejetos for insuficiente, a produção de biogás pode ser limitada ou até mesmo inviável.	Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2019)
Falta de subsídios do Governo	A falta de apoio financeiro por parte dos governos pode representar grandes desafios para a construção de biodigestores e a utilização do biogás. Sem um arcabouço legal sólido e incentivos financeiros adequados, os produtores e empreendedores podem encontrar dificuldades em investir nessa tecnologia sustentável.	Winquist <i>et al.</i> (2019);
Falhas técnicas/vazament O	Pode ocorrer uma baixa eficiência energética se houver vazamentos durante o processo ou se o biodigestor não for abastecido corretamente. Os vazamentos podem resultar na perda de biogás, diminuindo a quantidade de energia aproveitável.	Slorach <i>et al.</i> (2019)
Geração de odor	Se os dejetos não forem armazenados corretamente, é possível ocorrer mau odor nas proximidades da área de armazenamento. A decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos pode resultar na liberação de gases odoríferos, como o gás sulfídrico e o metano.	Rada <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Rada *et al.* (2019); Czekala *et al.* (2020); Winquist *et al.* (2019); Rauseo *et al.* (2019); Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2019); Winquist *et al.* (2019); Slorach *et al.* (2019); Rada *et al.* (2019).

Vondra, Touš e Teng (2019) relatam que para que o processo de biodigestão atenda as expectativas de uma EC, as vantagens mencionadas devem ser neutralizadas. Logo, mesmo alguns autores afirmando que existem fatores negativos relacionados ao biodigestor e a EC, é importante ressaltar que a pegada de carbono geral do modelo circular é menor quando comparada ao modelo tradicional. Isso ocorre porque a biodigestão do substrato reduz a carga orgânica e elimina patógenos, o que possibilita a utilização do biofertilizante no solo, promovendo um ciclo mais sustentável do produto (Xue *et al.*, 2019).

É importante ressaltar que o biofertilizante possui duas frações distintas: uma fração líquida, que é rica em nitrogênio, e uma fração sólida, que é rica em fósforo. Essa composição nutricional diversificada do biofertilizante oferece vantagens significativas para a agricultura. A fração líquida, rica em nitrogênio, pode ser facilmente absorvida pelas plantas, promovendo

um crescimento saudável e estimulando a produção de biomassa. Já a fração sólida, rica em fósforo, desempenha um papel fundamental na nutrição das plantas, fornecendo o elemento essencial para o desenvolvimento das raízes e a formação de flores e frutos. Portanto, a utilização do biofertilizante proporciona uma fonte eficiente e balanceada de nutrientes para as culturas, contribuindo para a sustentabilidade e o sucesso da agricultura (Akerman; Humalisto; Pitzen, 2020; Czekala *et al.*, 2020).

A EC destaca a importância de transformar resíduos em recursos, e existem diversas opções de insumos que podem ser utilizados para abastecer um biodigestor. Um exemplo seria o aproveitamento dos restos de alimentos. Esses resíduos orgânicos, como cascas de frutas, legumes ou sobras de refeições, possuem um alto teor de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás através da biodigestão (Ellen Macarthur Foundation, 2020). Ao utilizar esses resíduos como alimentação para o biodigestor, não só evita o desperdício, mas também obtém energia renovável na forma de biogás e produz biofertilizante de alta qualidade. A análise cuidadosa dessas possibilidades de insumos é fundamental para impulsionar a disseminação do uso de biodigestores, permitindo fechar o ciclo dos resíduos orgânicos de forma mais sustentável e eficiente (Maciel-Silva *et al.*, 2021).

Com relação as vantagens da utilização de biodigestores acoplado a EC, autores como Winqvist *et al.* (2019); Spagnolo *et al.* (2020) e Islam *et al.* (2021), relatam que a principal está relacionada à reciclagem dos resíduos, onde pode-se notar o fechamento do ciclo de um produto, no qual ocorre a transformação de um resíduo em matéria-prima. O cenário mencionado contribui com a sustentabilidade e a geração de energia limpa por meio do biogás. Esta atividade é uma prática que permite reciclar os nutrientes presentes nos resíduos e reduzir significativamente a emissão dos gases de efeito estufa.

2.9 Modelo SWOT

Um dos instrumentos bastante utilizados no processo de tomada de decisão e, conseqüentemente, gestão de negócios é a Matriz SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats). A mesma tem como base a utilização de todas as informações disponíveis a serem avaliadas sobre sua realidade, funcionando como uma ferramenta bastante precisa no julgamento da aplicação de futuras ações em relação ao posicionamento de estratégias de desenvolvimento (Bjorn, 2008).

Bjorn (2008), relata que a análise SWOT, reflete uma abordagem integrada, com foco na empresa acoplada com suas variáveis ambientais. O objetivo da análise mencionada é o

confronto de pontos positivos internos da empresa e suas fraquezas, bem como as oportunidades de negócios externos associadas aos riscos para gerar possíveis ações estratégicas.

A denominação do termo SWOT é formada pelas palavras Strengths (pontos fortes); Weaknesses (pontos fracos); Opportunities (oportunidades); e Threats (ameaças), que definem a análise como avaliação das forças e fraquezas, oportunidades e ameaças que após estudadas proporcionam uma decisão estratégica.

Os pontos fortes caracterizam-se como sendo capacidades, características da empresa que contribuem de forma positiva para seu crescimento e desenvolvimento, onde estes são decorrentes de estratégias bem-sucedidas a longo prazo. Dentre os pontos fortes, pode-se citar a gestão dos custos, as qualidades que contribuem para a sua aceitação no mercado, capacidade em superar a concorrência de mercado, popularidade, inovações e outros (Maceron Filho; Araujo; Quintairos, 2014).

Em se tratando dos pontos fracos, estes fazem referência as desvantagens da empresa ou produto quando comparada a seus concorrentes, deixando transparecer falhas, reduzindo os valores e qualidades, limitando ou comprometendo a sua sustentabilidade (Fine, 2011).

É importante tomar conhecimento dos pontos fracos e fortes, pois estes trazem uma auto-reflexão em relação ao produto, preparando-o para situações externa, ou seja, melhorar as oportunidades, criar defesas para as ameaças, trabalhar o momento presente e focar o futuro.

As oportunidades são aspectos externos positivos que propiciam a possibilidades de atuar em ações de marketing que venham a trazer benefícios a empresa, tornando-a bem-sucedida em relação a concorrência. Dentre os vários pontos positivos das oportunidades destacam-se o desenvolvimento de mercado, da tecnologia e informação, novos nichos a serem explorados, desenvolvimento de novas táticas, parcerias e conhecimentos via absorção dos pontos fortes da concorrência pelos constantes embates ou aproximações de reconhecimento (Maceron Filho; Araujo; Quintairos, 2014).

Maceron Filho; Araujo; Quintairos, (2014) explicam que as ameaças são aspectos fora de controle da empresa, características do ambiente externo que podem ter impactos negativos sobre as diversas áreas de atuação da empresa, tais como: efeitos decorrentes de mudanças políticas, do ambiente econômico, variações climáticas, novas tecnologias, mudanças de legislação, formação de novas parcerias entre os concorrentes, redução da demanda de mercado etc.

Como pode-se perceber, o objetivo da análise SWOT é fundamentar o método como um instrumento interno de análise, para processar informações internas e externas do negócio

como um todo, capaz de acrescentar valor significativo para o desenvolvimento estratégico. O trabalho no conjunto das informações processadas via análise SWOT priorizará as oportunidades e ameaças, bem como identificará as forças e fraquezas, auxiliando a direção da organização nas tomadas de decisões (Bjorn, 2008).

Em um estudo realizado por Czekala *et al.* (2020); Ferella *et al.* (2019); Tampio *et al.* (2019) e Cucchiella e D'Adamo e Gastaldi (2019); relacionou-se o método SWOT com o tratamento e gestão de RS, podendo perceber alguns facilitadores, também denominados de pontos fortes, a exemplo recuperação de energia dos resíduos, redução de descarte em aterro sanitário, redução de CO₂ pelos caminhões de coleta e transporte, redução dos GEE, interligação do biodigestor com o sistema de gestão da empresa, eliminação do risco ambiental de acidentes com o transporte de resíduos, aproveitamento energético, economia financeira, substituição do combustível fóssil, fechamento do ciclo do produto, sustentabilidade.

Em se tratando das fraquezas e pontos negativos relacionados ao tratamento de RSO voltado ao biodigestor, Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2019); Winqvist *et al.* (2019) e Xue *et al.* (2019), relataram a falta de incentivo público, compostagem demonstra-se ser mais atraente, necessidade de manutenção periódica, previsibilidade dos resíduos para abastecimento, possibilidade de geração de mau cheiro, falta de coleta seletiva adequada.

Segundo Abdel-Basset, Mohamed e Smarandache (2018), ao criar a Matriz SWOT, é importante estudar de forma acoplada as oportunidades com forças assim como as ameaças e fragilidades. Isso ajuda a desenvolver um plano estratégico que reduza e controle os aspectos negativos, ao mesmo tempo em que aproveita ao máximo as potencialidades. Para ter sucesso, um plano estratégico precisa se concentrar nas áreas fortes e oportunidades, lidar da melhor forma possível com as fraquezas e minimizar as ameaças.

Diante do exposto, alguns fatores apresentados na matriz SWOT desencadearam novas abordagens de estudo, com foco no uso de biodigestores, tratamento de RSO e EC. Logo, de acordo com Abdel-Basset, Mohamed e Smarandache (2018), pode-se destacar:

- Forças: reciclagem de matéria prima; fechamento de ciclo; substituição do combustível fóssil.
- Oportunidades: comércio de carbono; marketing ambiental; produção e consumo dos insumos próximos; geração de renda extra; melhoria da qualidade de vida; maior apoio a economia circular.
- Fraquezas: burocracia interna; dificuldade de comercialização do digestado; alto custo de manutenção e de armazenamento dos insumos.

- Ameaças: surgimento de novas tecnologias; falta de gestão da empresa; compostagem mostrar-se mais atraente.

Outra ferramenta que vem recebendo destaque com relação a tomada de decisões dentro do processo de desenvolvimento de técnicas de tratamento de RS é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV, recebe destaque por ser uma técnica de apoio à tomada de decisão sobre o modelo a ser adotado no gerenciamento de resíduos podendo ser utilizada acoplada a análise SWOT.

2.10 Avaliação de Ciclo de Vida na gestão de Resíduos Sólidos

O atual cenário de crescimento econômico juntamente com a geração de RS desencadeou um controle mais rigoroso do cumprimento da legislação, assim como a conscientização ambiental. Desta forma, torna-se necessário a busca por novas tecnologias que possam auxiliar no correto tratamento e destinação final dos resíduos.

Essa ferramenta, por considerar todo o ciclo de vida do sistema de gerenciamento, desde a geração até a disposição final, pode auxiliar aos tomadores de decisões e organizações governamentais no planejamento estratégico e na definição de processos de tratamento para a questão dos RSU (Mersoni; Reichert, 2017).

A ACV dentro da perspectiva do gerenciamento de resíduos RS tem sido afirmada pelo crescente número de estudos científicos aplicando essa abordagem ao redor do mundo nos últimos tempos, pois se trata de uma metodologia que permite acoplar os fluxos de entrada (matérias-primas, recursos e energia) e saída (emissões atmosféricas, emissões líquidas e resíduos sólidos) a cada fase do ciclo de vida. Como consequência, pode-se avaliar os impactos ambientais associados as emissões relacionadas a um produto ou processo (Iqbal *et al.*, 2020).

O gerenciamento inadequado dos RS gera impactos negativos ao meio ambiente, assim, ao se considerar que os RS gerados por um determinado empreendimento são gerenciados de forma devidamente adequada, é possível afirmar que este gerenciamento tem potencial de afetar as alterações das emissões em maior ou menor escala a depender das alternativas de gestão adotadas. A Figura 9 apresenta, as emissões de CO₂ do processo de gerenciamento de RS em cada etapa do sistema de coleta, tratamento e disposição final.

A Environmental Protection Agency - EPA (2017), relata que os ganhos potenciais relacionados à redução de emissão de GEE com a aplicação das tecnologias de tratamento de RS.

- Reciclagem: Está relacionada a redução de exploração de matéria prima na fonte, assim como preservar os recursos naturais. A reciclagem proporciona redução de energia gasta para desenvolver novos produtos, ou seja, destinar novamente à indústria como insumo, ocasionando redução significativa de emissão de GEE.
- Compostagem: Utilizada no tratamento de RO, onde a matéria orgânica é decomposta dando origem a um substrato. Também conhecido como biofertilizante, que pode ser utilizado para melhoramento da qualidade do solo, resultando em menor quantidade necessária de fertilizantes sintéticos, e, também diminui a erosão do solo e reduz o uso de herbicidas. Com relação a redução das emissões de GEE, a compostagem aponta menor emissão nas demais etapas de utilização do composto em solo e na redução do uso de fertilizantes e agrotóxicos.
- Digestão anaeróbica (DA): A DA permite o reaproveitamento energético através da captação e transformação do biogás proveniente do processo de decomposição dos RO em meios controlados de temperatura, pressão e ausência de oxigênio. Esse processo se dá com a utilização de biodigestores.
- Incineração: a transformação de resíduos em energia térmica, acarreta a redução dos GEE, visto que, do ponto de vista energético, caso o resíduo seja encaminhado para o aterro sanitário, pode-se ocasionar o desperdício da geração de energia oriunda do processo de queima do mesmo, de forma que no aterro os resíduos entram no processo de decomposição gerando emissão de GEE e outros impactos. Vale ressaltar que quando os resíduos são aterrados, encerram o ciclo de consumo, onde poderiam ser recuperados energeticamente, além de gerar impactos negativos com a geração de efluentes, a exemplo do chorume.

Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América, já vem estudando o processo de reciclagem desde o ano de 1994, esta percebeu a importância da redução na fonte e da reciclagem de RS no processo de amenizar as emissões dos GEE. Portanto, a Agência mencionada, desenvolveu metas em seu Plano de Ação de Mudanças Climáticas (Climate Change Action Plan) voltadas para tal redução (EPA, 2019).

A EPA também elaborou a Waste Reduction Model (WARM), com o objetivo de contribuir com a tomada de decisões por parte dos gestores de RS e, consequentemente, contribuir com as reduções de emissões de GEE, nos sistemas de gestão de RS. O WARM é uma ferramenta de cálculo que quantifica os impactos ambientais com base em várias

tecnologias de tratamento, a exemplo, pode-se citar redução na origem, reciclagem, digestão anaeróbia, incineração, compostagem e aterro sanitário (EPA, 2019).

Em se tratando da ACV, vale destacar Iqbal *et al.* (2020) e Khandelwal *et al.* (2019) realizaram um levantamento dos principais impactos que predominam em pesquisas de ACV voltadas aos RS, sendo: aquecimento global, acidificação, eutrofização, potencial de toxicidade humana, depreciação da camada de ozônio e formação de oxidantes fotoquímicos caracterizados como sendo os principais impactos.

A ACV é aplicada no setor de RS tem sido utilizada em estudos de melhorias dos sistemas de gerenciamento de resíduos existentes; comparação de desempenho e desenvolvimento de novas tecnologias; formulação de políticas e direcionamentos estratégicos; e uso em relatório de impactos ambientais. No Brasil, foi possível observar alguns estudos que aplicaram ACV a RSU simulando diferentes cenários, a exemplo pode-se citar Costa (2023); Oliveira *et al.* (2022), Paes *et al.* (2020); Lima *et al.* (2019); Ibáñez-Forés *et al.* (2018); Liikanen *et al.* (2018); Coelho e Lange (2018); Saraiva *et al.* (2017); Mersoni e Reichert (2017), entre outros.

Oliveira *et al.* (2022), Paes *et al.* (2020), Coelho e Lange (2018) e Mersoni e Reichert (2017), estudaram a ACV voltada a diferentes opções de cenários de manejo de RSU em municípios brasileiros. Os resultados indicaram reduções significativas nos impactos ambientais em cenários onde se tinha maiores taxas de aproveitamento dos RS através da reciclagem. Ibáñez-Forés *et al.* (2018) analisaram o impacto ambiental voltado as atividades de coleta seletiva, entre os anos de 2005 e 2015, na cidade de João Pessoa, onde foi possível observar que ao aumentar a recolha de resíduos através da coleta seletiva proporcionou uma redução de impactos ambientais negativos.

Costa (2023) analisou a sustentabilidade da rota tecnológica de resíduos sólidos urbanos, de origem domiciliar, de João Pessoa/Paraíba – Brasil, sob a perspectiva do ciclo de vida e da economia circular, para o ano 2018, considerando as dimensões ambiental, econômica e social. Foi utilizada a metodologia de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) que é composta pelos métodos de Avaliação do ciclo de vida ambiental (ACV), Custo do Ciclo de Vida (CCV) e Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACV-S). A autora supracitada concluiu que a ampliação dos princípios da economia circular, como reciclagem e compostagem, contribuiu fortemente para promover a sustentabilidade do sistema ao fomentar a recuperação de matéria-prima, reduzir emissões e custos, bem como a possibilidade de melhorar a renda dos trabalhadores e suas condições de vida. O estudo concluiu que a ASCV se mostrou eficiente na avaliação conjunta dos três pilares da

sustentabilidade através da mensuração de impactos ambientais, econômicos e sociais do setor além de propiciar a identificação dos principais pontos a terem maior atenção pelos tomadores de decisão.

Ao se tratar do processo de DA Liikanen *et al.* (2018) e Lima *et al.* (2019) desenvolveram um estudo na cidade de São Paulo e Campo Grande, respectivamente, estes afirmaram que os impactos ambientais negativos dos RSU seriam reduzidos caso os RSO fossem tratados pelo método de DA separados por fonte e Tratamento Mecânico Biológico (TMB).

Em todos os estudos levantados, pode-se perceber que a ACV se apresentou como uma ferramenta de suma eficácia nas análises conduzidas para embasar decisões. Isso ocorre devido à quantidade significativa de informações acessíveis, as quais podem ser empregadas para orientar estratégias de decisões, especialmente no que tange o manejo de RS menos prejudiciais e mais alinhados aos aspectos ambientais.

2.10.1 Pegada de carbono

A Pegada de Carbono (PC) é definida como a mensuração das emissões de GEE que são liberadas direta e indiretamente por uma atividade, processo ou produto, incluindo todos os bens e serviços associados, provenientes de indivíduos, populações, empresas, instituições públicas, cidades, estados e/ou países (Wiedmann; Barrett, 2011). Peters (2010) reforça essa visão ao descrever a PC de uma unidade funcional, seja uma organização, cidade, produto, serviço ou processo, como o impacto climático, quantificado por uma métrica específica, que engloba todas as fontes de emissão e os sumidouros, tanto na fase de produção quanto na de consumo, levando em conta os limites espaciais e temporais determinados. É importante notar que as fontes de emissão incluem as unidades físicas ou processos que emitem GEE para a atmosfera. Wu (2019) enfatiza que a PC quantifica as emissões de GEE ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

O conceito de Pegada de Carbono (PC) pode incluir apenas as emissões de dióxido de carbono ou também outros gases de efeito estufa (GEE). Geralmente, a PC é medida em toneladas de Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂eq), uma unidade que reflete o potencial de aquecimento global de um GEE, mostrando como ele contribui para o aquecimento global e mudanças climáticas, geralmente considerando um período de 100 anos. Embora ainda não exista uma definição padrão, a PC é reconhecida como um indicador ambiental útil para

auxiliar na tomada de decisões e no planejamento, execução e acompanhamento de políticas e ações para reduzir e controlar as emissões de GEE (Veiga, 2017).

Uma estratégia eficaz de gestão das emissões de gases de efeito estufa (GEE) envolve monitorar e reduzir essas emissões, avaliar e gerenciar riscos relacionados ao clima, identificar oportunidades de negócios ligadas à sustentabilidade e comunicar os resultados de forma clara e transparente. Para isso, é essencial que a organização entenda claramente e reconheça o perfil das suas emissões de GEE (Waycarbon, 2020).

A Pegada de Carbono pode ser calculada usando diferentes métodos, geralmente divididos em PC de Produtos (PCP) e PC Organizacional (PCO). Para produtos, a PC mede as emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção e distribuição, até o uso final e descarte. Métodos destacados para calcular a PCP incluem a PAS 2050 e a ISO 14.067, que fornecem princípios, requisitos e orientações baseados nas normas de avaliação do ciclo de vida, especificamente as ISO 14.040 e ISO 14.044.

Em se tratando da geração de RS de um restaurante, pode-se citar a Pegada de Carbono Organizacional (PCO), que foca nas emissões de uma organização, com o objetivo de avaliar todos os seus processos de produção e atividades, a fim de evidenciar o seu impacto sobre a mudança climática num determinado período, a partir dos GEE emitidos direta ou indiretamente por ela. Isso inclui considerações sobre a geração de RS e como eles contribuem para as emissões totais.

À medida que mais consumidores consideram a responsabilidade ambiental de empreendimentos ao tomar decisões de compra, a medição da PC permite que estas atividades desenvolvam planos de ação para mitigar seus impactos ambientais, incluindo a gestão de resíduos, ao mesmo tempo que oferece vantagens competitivas em relação a outras empresas (Harangozo; Szigeti, 2017). Lash e Wellington (2007) afirmam que, ao buscar novas oportunidades de lucro e gerenciar a exposição aos riscos das mudanças climáticas, as empresas que efetivamente mitigam seus impactos, incluindo a gestão de resíduos, podem obter uma vantagem competitiva em um futuro com restrições de carbono. Kiliç *et al.* (2018) também reforçam que a avaliação das emissões de carbono é essencial para a produção sustentável, especialmente para empresas que buscam competir em novos mercados verdes internacionais.

A ISO 14.064, que é uma das principais referências na medição de emissões de GEE, está organizada em três partes e foi adaptada para o Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A primeira parte, ABNT NBR ISO 14064-1, fornece diretrizes

para que as organizações possam medir e reportar suas emissões e absorções de GEE. A segunda parte, ABNT NBR ISO 14064-2, trata das especificações para projetos que visam a redução das emissões ou o aumento das absorções de GEE, incluindo o monitoramento e a elaboração de relatórios. A terceira parte, ABNT NBR ISO 14064-3, foca nas orientações para a verificação e validação dos dados de GEE reportados pelas organizações. Estas normas ajudam as empresas a gerenciar de forma responsável suas contribuições aos gases de efeito estufa.

2.11 Gases do Efeito Estufa (GEE)

O efeito estufa embora seja um processo natural, que garante temperaturas propícias a vida na terra, está sendo impactado negativamente pela ação antrópica, ocasionando situações adversas principalmente na temperatura global. Este cenário é decorrente do aumento das concentrações de gases, denominados GEE. Como consequência da concentração dos gases mencionados, tem-se o aumento da temperatura da terra, fenômeno conhecido como aquecimento global (IPCC, 2019). Na Figura 11, pode-se observar as principais atividades antrópicas que contribuem com este cenário, sendo estas: uso de energia, processos industriais, mudanças no uso da terra, tratamento de resíduos e agropecuária.

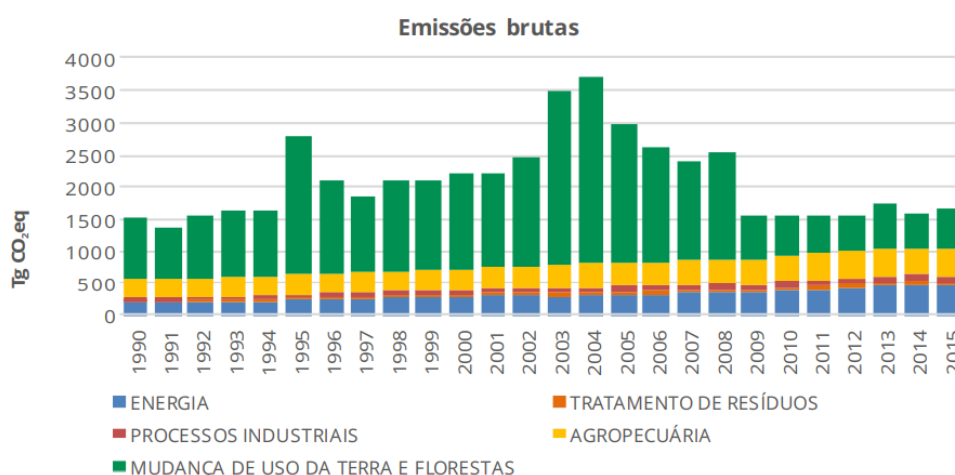


Figura 11. Principais atividades que contribuem com o aumento dos gases de efeito estufa - GEE

Fonte: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações - MCTIC, (2017)

Em 2017, o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), desenvolvido pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC), apontou os valores

obtidos para emissões de todos os GEE não controlados pelo Protocolo de Montreal como CO₂, CH₄, N₂O, CF₄, C₂F₆, HFCs, SF₆, CO e NO_x (MCTIC,2019).

Cada um dos gases mencionados possui características, vias de formação e potencial de impacto distintos, visto que o carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), ocorrem de forma natural na natureza. O CO₂ é um gás de suma importante na atmosfera, liberado por processos naturais, a exemplo de espiração e erupções vulcânicas. Já em se tratando das atividades antrópicas, o CO₂ é liberado através do desmatamento, e queima de combustíveis fósseis (NASA, 2016). Considerando o potencial de aquecimento global através dos GEE, o metano é cerca de 25 vezes mais nocivo em equivalência com o quando comparado ao CO₂ (UOM, 2020).

Com relação N₂O este apresenta-se como sendo um poderoso GEE e o seu potencial de aquecimento global de 298 vezes maior do que o dióxido de carbono (Hu *et al.*, 2012). O Quadro 2 apresenta o potencial de aquecimento de alguns GEE relacionados à ação antrópica segundo a University of Michigan (2020).

Quadro 2. Potencial de aquecimento dos principais GEE

Gases do Efeito Estufa (GEE)	Potencial de aquecimento (em tonCO ₂ eq)
Dioxido de carbono	1,0
Metano	25,0
Oxido nitroso	298,0
Hexafluoreto de enxofre	22,8
Hidrofluorocarbono-23	14,8
Hidrofluorocarbono-32	675,0
Perfluorometano	7,3
Perfluoroetano	12,2

Fonte: University of Michigan (2020).

Ao longo dos últimos anos, tem ocorrido um aumento sistemático das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, que está principalmente relacionado à atividade humana, especialmente após a Revolução Industrial. A descoberta de novas tecnologias e fontes de energia levou a um aumento significativo do efeito estufa, resultando em um aumento de aproximadamente 40% na concentração de dióxido de carbono na atmosfera, de acordo com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2013.

Como consequência dessas mudanças, observa-se uma série de efeitos associados às mudanças climáticas, com impactos em ecossistemas naturais em escala global, conforme registrado pela divisão de mudanças climáticas globais da NASA. Estes efeitos incluem o

aumento da temperatura média global, o degelo das calotas polares, o aumento do nível do mar, o aumento da temperatura e acidificação dos oceanos, bem como um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, conforme destacado no relatório da NASA de 2016.

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2019, a opção de tratamento mais comum para os RSU é o aterro sanitário, que representa a destinação da maior parte dos resíduos municipais em nível nacional. Cerca de 97% das emissões de GEE associadas aos aterros sanitários são provenientes da geração de metano durante a decomposição dos resíduos e da queima de combustível, especialmente o diesel utilizado pelos equipamentos pesados operados no local (Iqbal *et al.*, 2019).

As emissões de metano, originadas da degradação biológica do carbono presente nos RSU durante o processo de decomposição no aterro sanitário, representam a principal fonte de emissão de GEE nessa alternativa de tratamento. Em contraste, a incineração dos resíduos com geração de energia resulta em uma significativa redução nas emissões de GEE, devido à diminuição das emissões de metano e também pela recuperação energética proporcionada por essa abordagem (Liu *et al.*, 2017). Isso ocorre, principalmente, devido à alta fração orgânica presente nos RSU, que pode ser aproveitada como fonte de energia durante o processo de incineração.

2.12 Mudanças climáticas e Gases do Efeito Estufa na gestão de resíduos sólidos

Assim como o aumento da geração de RS representam um desafio relacionado a impactos ambientais negativos, as mudanças climáticas também emergem como uma preocupação crucial para a humanidade. Estas mudanças podem ser desencadeadas por uma variedade de fatores, como o aumento da temperatura global e a ocorrência de precipitação extrema em curtos períodos (Meireles, 2023).

De acordo com Meireles (2023), a problemática dos RS está intrinsecamente ligada às mudanças climáticas, motivando discussões cada vez mais urgentes sobre estratégias de mitigação. Para enfrentar e reduzir os impactos das mudanças climáticas em prol da sustentabilidade, é crucial adotar uma economia mais sustentável, caracterizada por práticas de produção e uma matriz energética mais limpa. Opções como biocombustíveis, melhorias na eficiência energética e a implementação de infraestruturas verdes estão se tornando cada vez mais viáveis e desempenham um papel fundamental no combate às mudanças climáticas (IPCC, 2023).

O Objetivo 13 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), enfatiza a necessidade urgente de adotar medidas para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Cada país deve capacitar-se para adaptar-se aos riscos climáticos em evolução, como uma medida essencial para promover a resiliência e a sustentabilidade (IPEA, 2023).

Dessa forma, a gestão ambiental dos RS está diretamente ligada ao alcance das metas estabelecidas pelo ODS 13, visto que quando os resíduos são destinados a ambientes inadequados contribuem para o aumento da geração de gases (Meireles, 2023).

De acordo com o Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura média da superfície global aumentou cinco vezes mais nos últimos cinco anos do que durante o período de 1850-1900. Esse aumento tem afetado mais intensamente as superfícies terrestres do que os oceanos, principalmente devido às emissões de gases de efeito estufa resultantes das atividades humanas (IPCC, 2023).

Ao examinar o impacto da gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) nessa problemática, a recomendação dos países membros do IPCC, como é o caso do Brasil, é suspender a destinação de resíduos biodegradáveis para aterros e adotar práticas de recuperação de biogás e alternativas mais limpas para sua gestão (Teixeira, 2014).

Essa recomendação é fundamentada na compreensão de que a decomposição de resíduos orgânicos é uma das principais fontes de gás metano, contribuindo significativamente para o aumento do efeito estufa e, consequentemente, para as mudanças climáticas (Lima, 2009).

A reciclagem emerge como um instrumento crucial no combate às mudanças climáticas, pois todo o processo de recuperação desses materiais auxilia na redução do consumo de recursos naturais e, consequentemente, na diminuição das emissões de gases de efeito estufa (Meireles, 2023).

De acordo com a Quarta Comunicação Nacional do Brasil à UNFCCC, no setor de resíduos, a destinação final ainda é o principal fator contribuinte para as mudanças climáticas, aumentando o nível de emissões ao longo do ano (Brasil, 2020). Portanto, é crucial buscar novas alternativas que tornem a disposição final dos resíduos mais eficiente e sustentável no contexto das mudanças climáticas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas metodológicas utilizadas ao longo da pesquisa. Esta, 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 CO₂ 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 12)

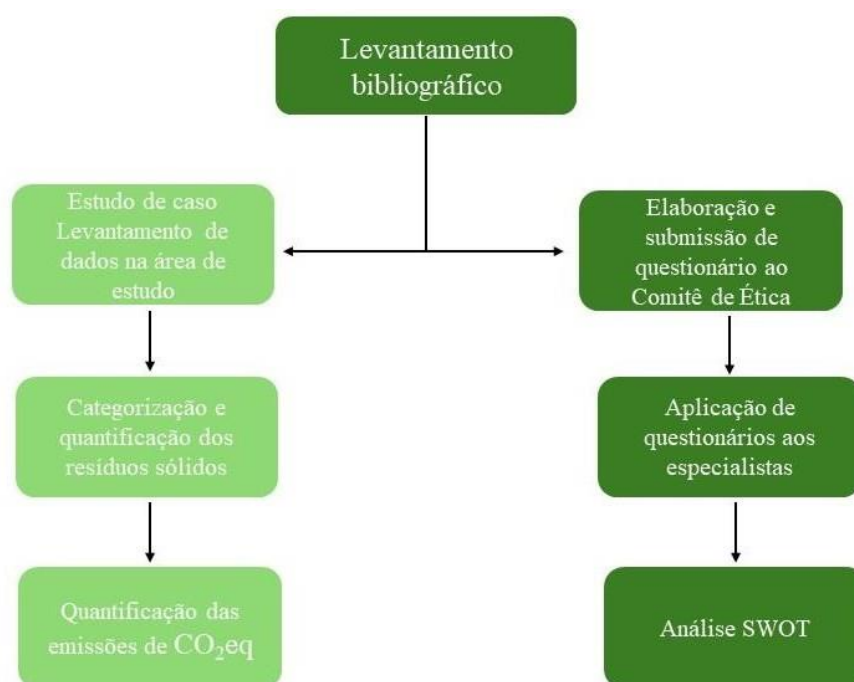


Figura 12. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa
Fonte: Autora (2024)

3.1 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 Luis – 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 13.



Figura 13. Biodigestor modelo canadense utilizado no Restaurante A
Fonte: Autora (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, conseqüentemente, 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 14).



Figura 14. Balança para pesagem dos resíduos
Fonte: Autora (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. Incluía 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 15).



Figura 15. Gravimetria dos Resíduos Sólidos da área de estudo
Fonte: Autora (2023)

Os RS foram categorizados segundo Mandelli (1997) e De Conto et al. (2009), como apresentado no Quadro 3.

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.
---------	--

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 CO₂-eq, 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:

$$y(k) = -a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - a_3y(k-3) - a_4y(k-4) - a_5y(k-5) - a_6y(k-6) - a_7y(k-7)$$

Equação (1)

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 demonstre 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):

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

Onde:

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

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 16.

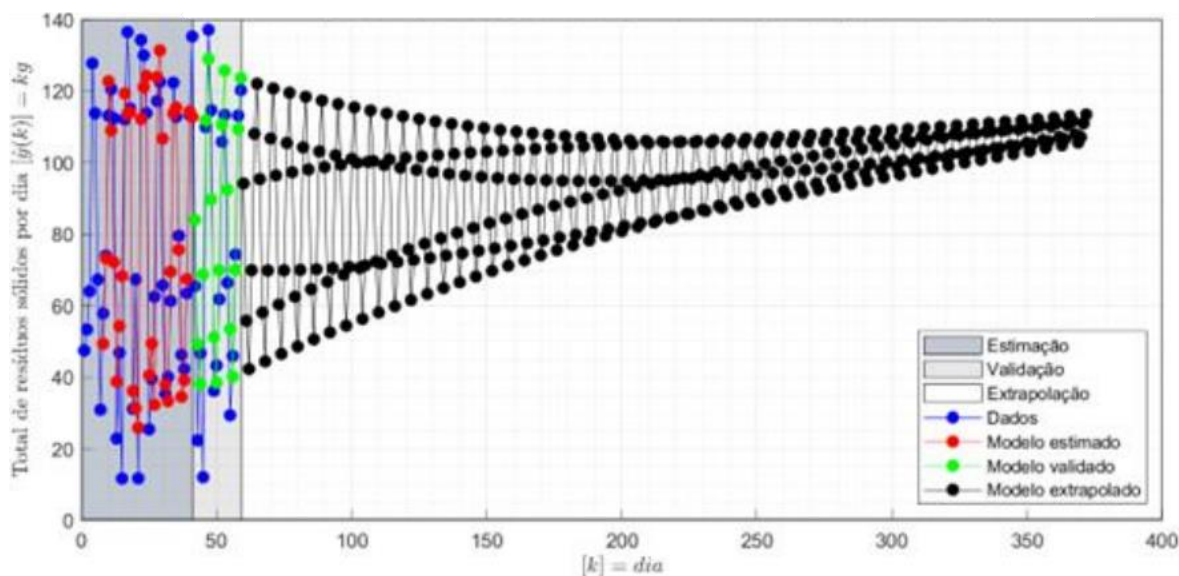


Figura 16: Extrapolação dos dados
Fonte: Autora (2023)

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 CO₂ equivalente por tonelada de resíduo), incluem as emissões acumuladas que essa quantidade de resíduos gerará durante a sua degradação.

3.2 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 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 Luis - 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 17).

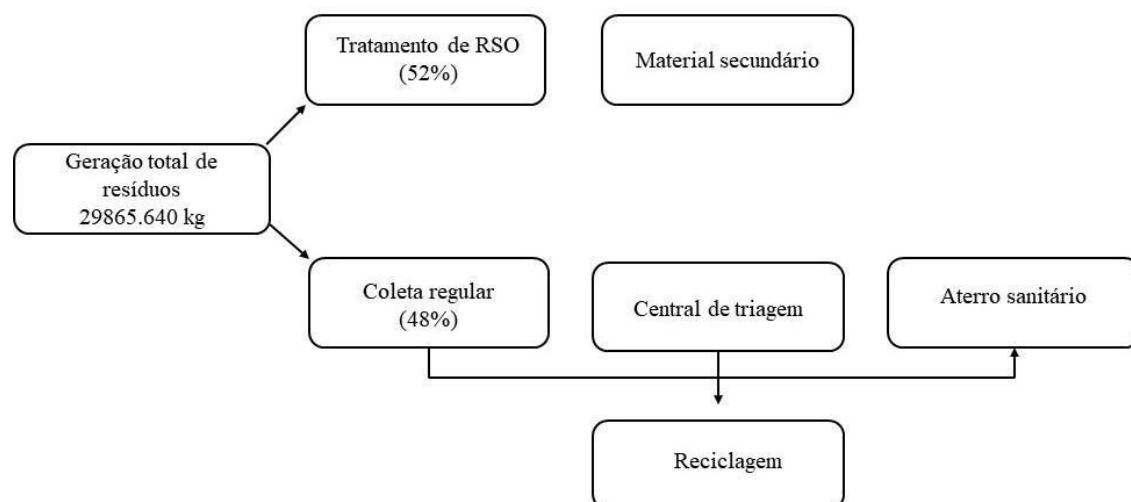


Figura 17. Cenário 01 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A.
Fonte: autora (2023).

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 18).

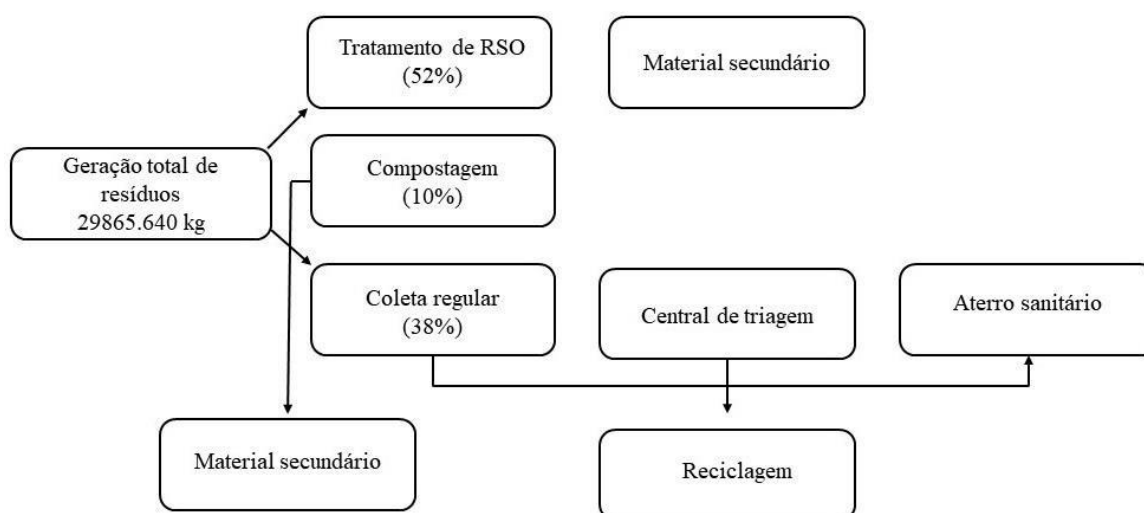


Figura 18. Cenário 02 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A.
Fonte: autora (2023).

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 19).

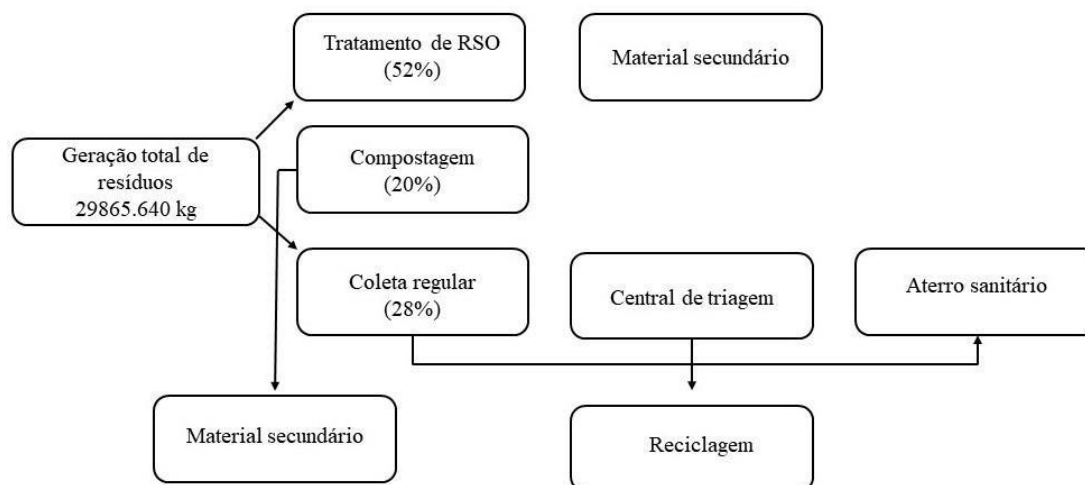


Figura19. Cenário 03 utilizado para caracterizar a gestão de resíduos do restaurante A
Fonte: autora (2023)

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 2 observa-se a composição dos resíduos em termos percentuais de umidade e foram propostos seguindo as considerações do IPCC (2006).

Tabela 2: 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%
Metais 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 calorífico 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 4 apresenta quais tipos de resíduos foram considerados com baixo e alto teor de água.

Quadro 4: 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 5). 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 6)

Quadro 5: 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 6: Resíduos e seus respectivos poder calorífico

Tipo de resíduo	Poder calorífico (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 93gCO₂eq/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, 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 7, os dados mencionados refletem a situação brasileira.

Quadro 7. Fatores de emissão de Gases Efeito Estufa

kg CO ₂ eq/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	-

Fonte: Giegrich (2021)

3.3 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* (APÊNDICE 1). 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 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 nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde (CNS) e suas complementares, que requer a 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.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

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

Para análise dos dados referentes as emissões de CO₂eq 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.

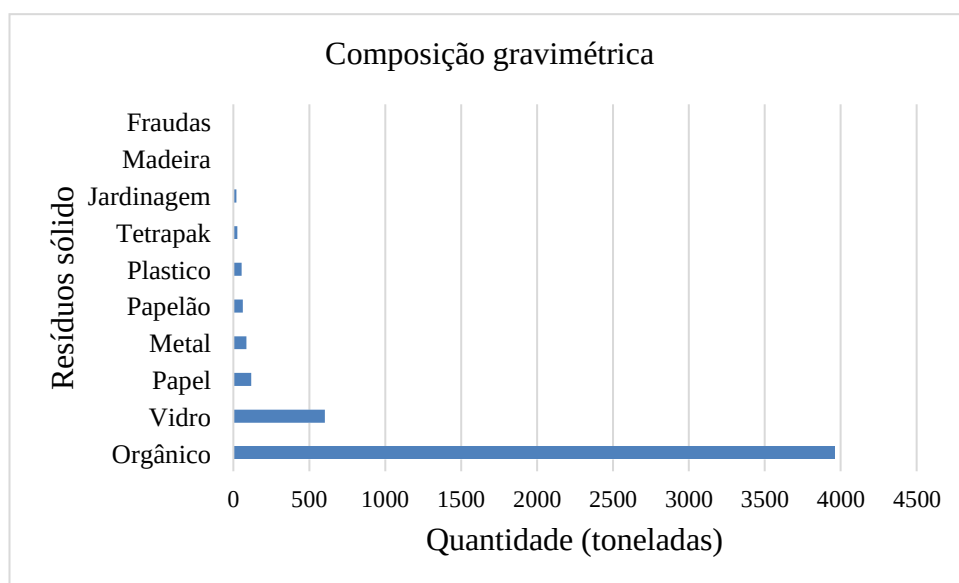


Figura 20. Composição gravimétrica
Fonte: Autora (2023)

Diante deste cenário, vale ressaltar dois aspectos principais a serem analisados: o teor de carbono e poder calorífico, 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 4).

Tabela 4. 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

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, conseqüentemente, contribuindo as mudanças climáticas.

Na Tabela 5 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 5. 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 27, observa-se os valores de emissões de CO₂eq 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.

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" (Figura 21), 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.

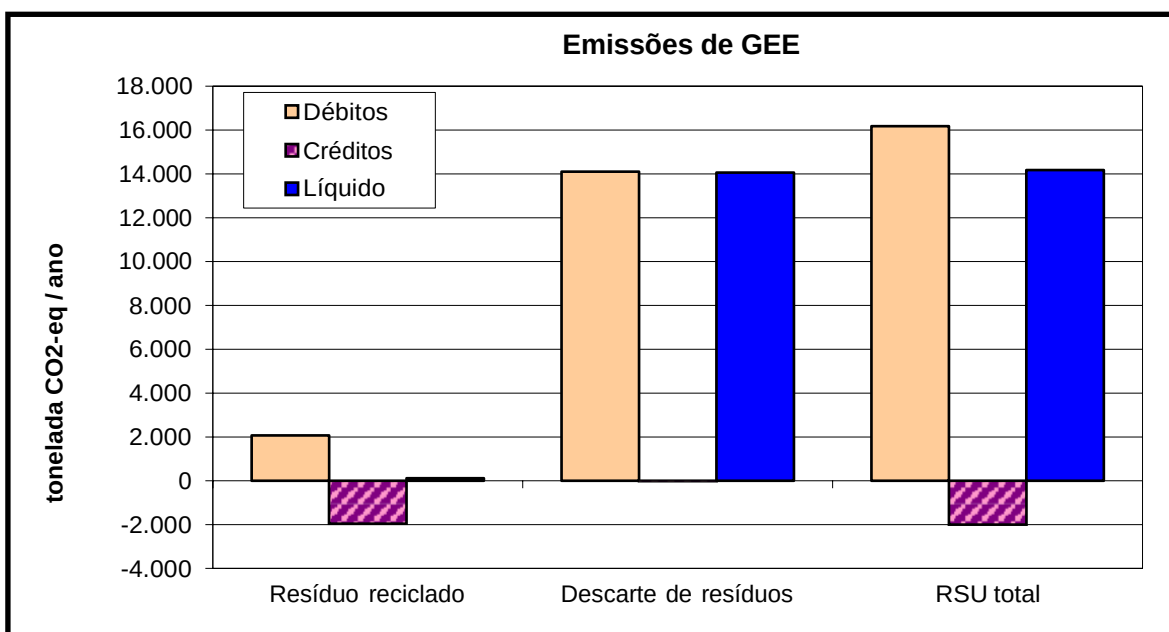


Figura 21. Emissões de CO₂-eq para o cenário 1
Fonte: Autora (2023)

Como pode-se perceber, a quantidade de débito foi maior (14.099 toneladas CO₂-eq/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 6), o que significa elevadas taxas de geração de GEE com o modelo de gestão atual.

Tabela 6. 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: Autora (2023)

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 al. (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 7), ou seja, uma redução na emissão de poluentes.

Tabela 7. Poder calorífico 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: Autora (2023)

Pujara *et al.*, (2023) e Tiseo (2020) avaliaram a DA e a compostagem como técnica de tratamento dos RSO, estes verificaram resultados satisfatórios 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 CO₂.

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 22.

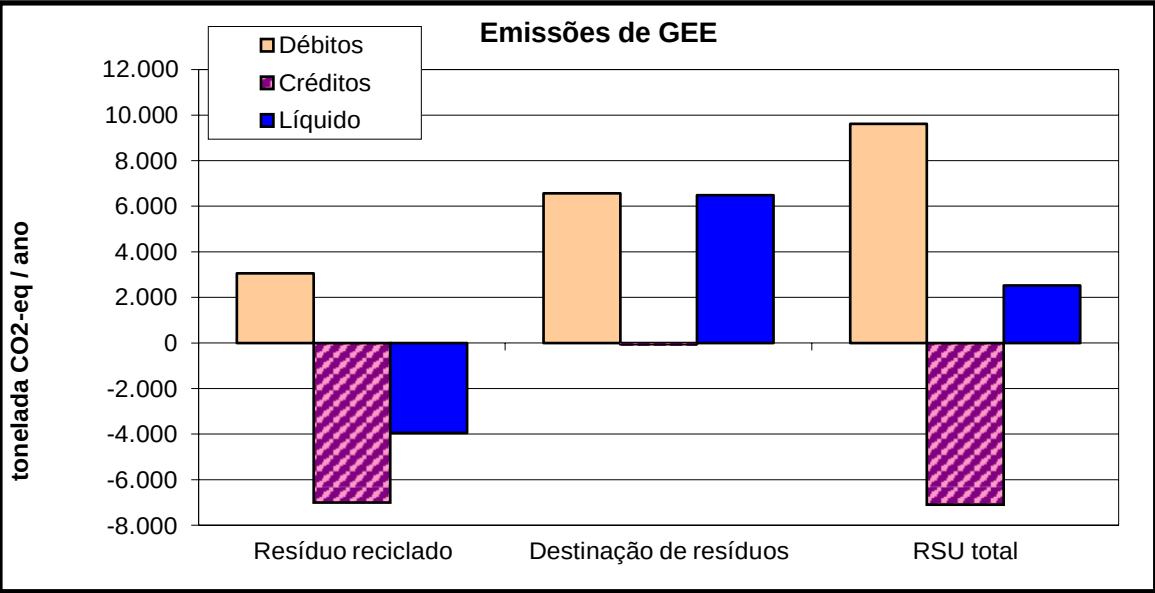


Figura 22. Débitos e créditos de CO₂-eq referente ao modelo de gestão do cenário 2
Fonte: Autora (2023)

Ao analisar a Figura 28, percebeu-se que houve uma redução da quantidade de débitos ao comparar com o cenário 1, visto que no cenário 2 foi possível aumentar a quantidade de RSO tratado biologicamente. Essa diferença também pode ser verificada na literatura, a partir dos dados apresentados por Lou (2009), em que as emissões resultantes do aterro sanitário foram 7 vezes maiores que as tratamento biológico. O fator de emissão apresentado para o aterramento foi de 1.287 kg TCO_{2eq}, o que corresponde a um aterro sanitário padrão. Já quando se realizou o tratamento biológico dos RSO, Lou (2009) apresentou o valor de 183 TCO_{2eq} por kg de resíduo.

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 8 apresenta a relação entre créditos e débitos para o cenário em estudo.

Tabela 8. 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, 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 CO₂-eq. 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 9, observa-se o poder calorífico referente a simulação do cenário 3.

Tabela 9. Poder calorífico 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: Autora (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 23).

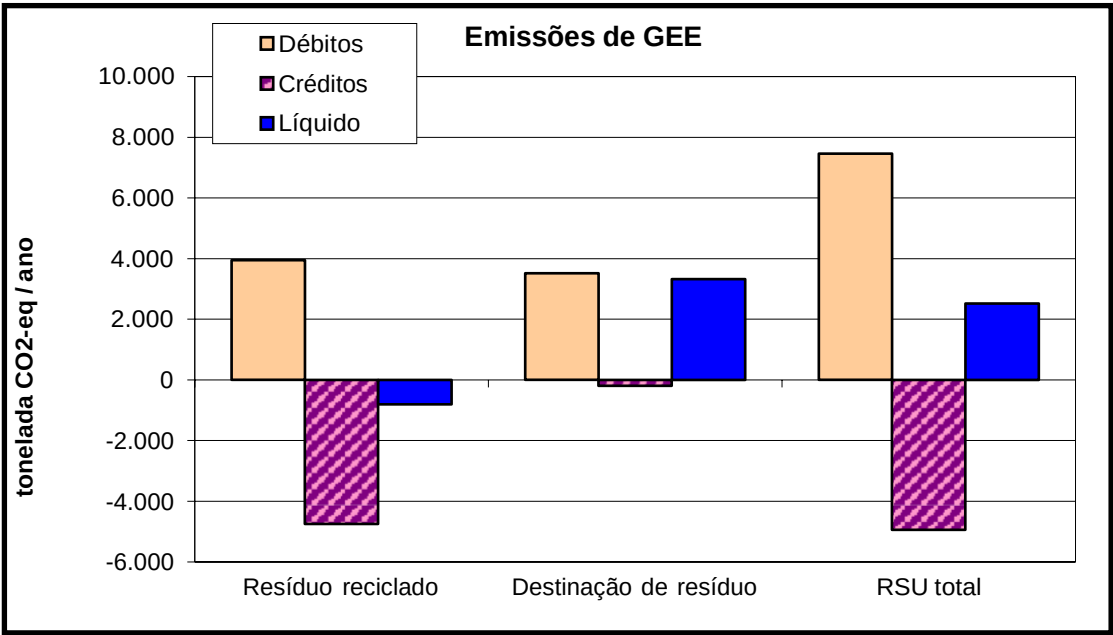


Figura 23. Débitos e créditos de CO2-eq referente ao modelo de gestão do cenário 3
 Fonte: Autora (2023)

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 10)

Tabela 10. 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: Autora (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 CO₂-eq, 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 CO₂-eq, 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

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 24).

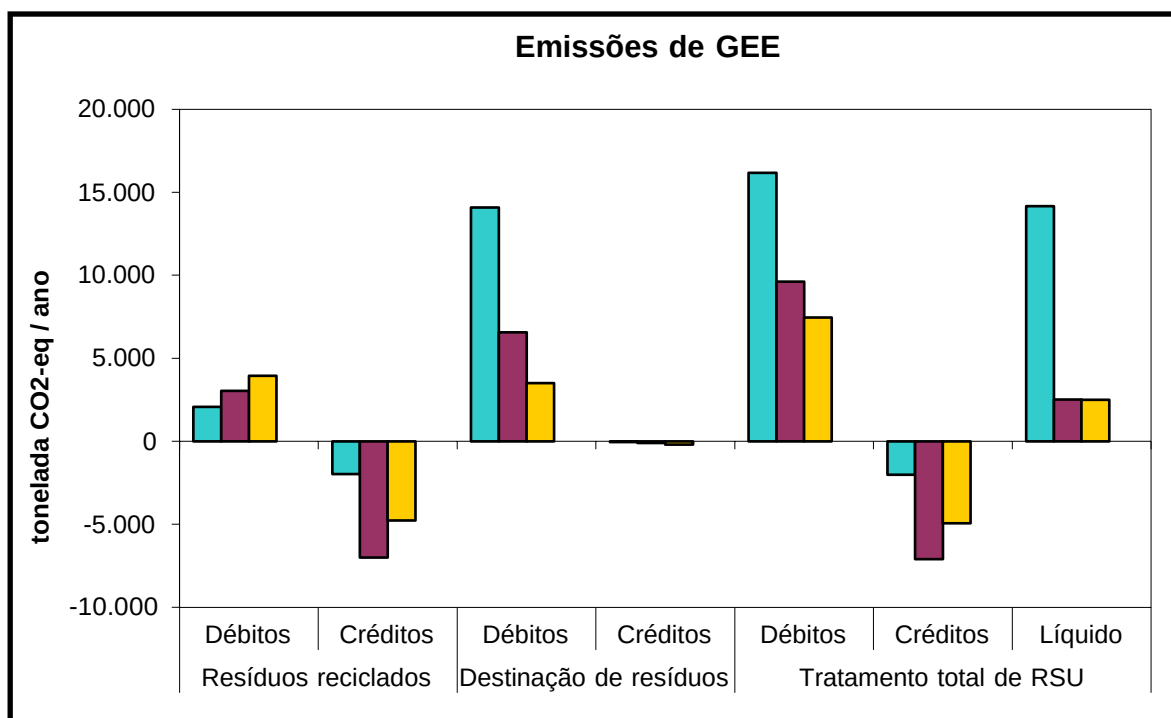


Figura 24. Débitos e créditos de CO₂-eq referentes aos modelos de gestão dos três cenários propostos
Fonte: Autora (2023)

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 CO₂.

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 CO₂, além do CH₄, 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 11.

Tabela 11. Débitos e Créditos de CO₂-eq 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
	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 (CH₄) e o sulfeto de hidrogênio (H₂S).

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 CO₂ e CH₄ 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).

4.2 Análise da Matriz SWOT

A seguir pode-se observar os resultados dos questionários aplicados aos especialistas. A Figura 25 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.

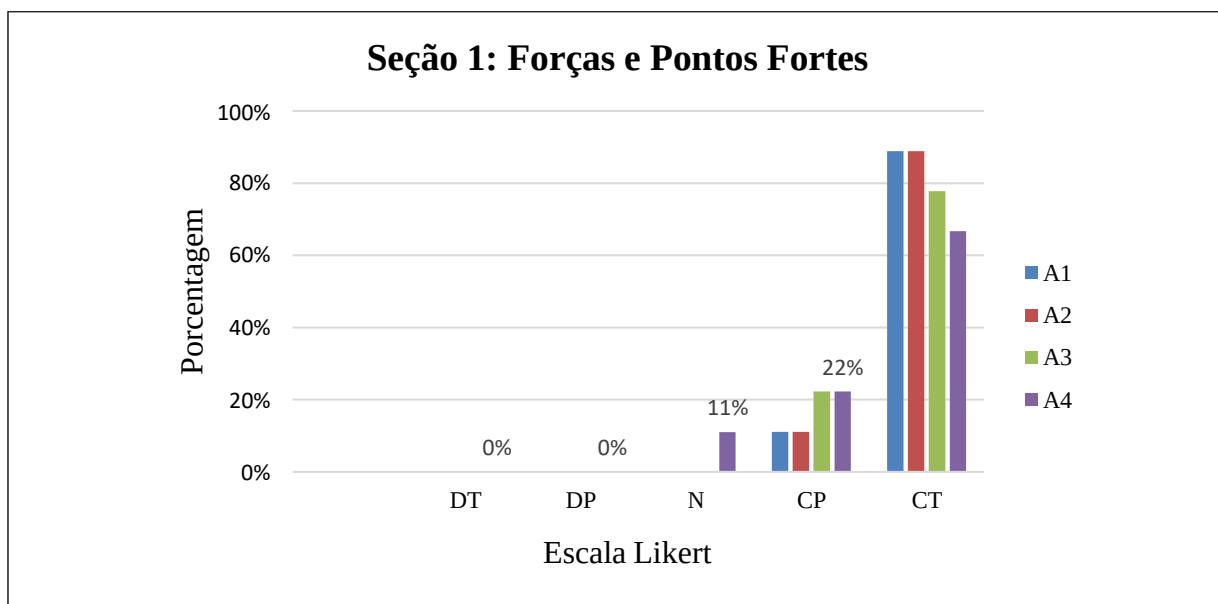
Os termos A1, A2, A3 e A4 referem-se, respectivamente, as seguintes afirmativas do questionário:

(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.



*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.

Figura 25. Respostas dos especialistas com relação a seção 1 (Forças e Pontos Fortes)

Fonte: Autora (2023).

Conforme observado na Figura 20, oitenta e nove por cento (89%) dos participantes concordaram totalmente que por meio dos biodigestores ocorre a reutilização de materiais classificados como resíduos, insumos ou matéria-prima na fabricação de novos produtos, assim como com a produção de energia renovável, ocorrendo os princípios da EC. Segundo Cecchi e Cavinato (2019), os RO quando tratados nos biodigestores, apresentam-se como um tipo de tecnologia bastante promissora dentro do contexto das energias renováveis, de forma que os RO deixam de ser um passivo ambiental.

A terceira afirmativa fez referência aos benefícios econômicos da utilização dos biodigestores, de forma que 78% afirmaram concordar totalmente e 22% concordaram

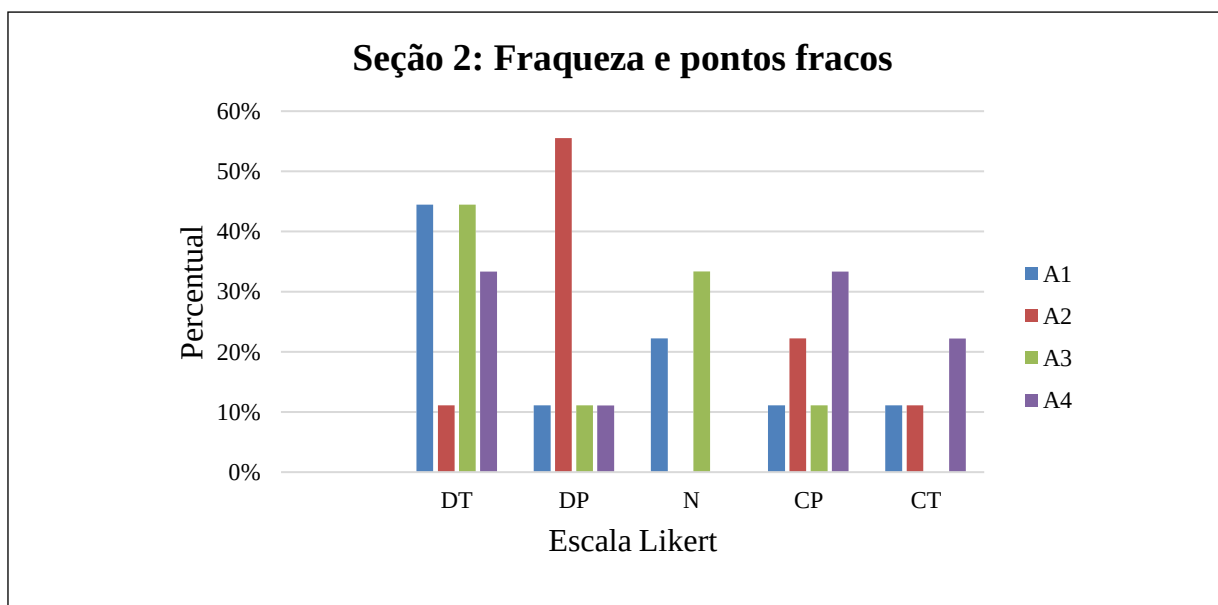
parcialmente, os benefícios estão relacionados a venda do biogás e biofertilizante, assim como redução de gastos com energia.

Na quarta afirmativa dentro da seção Forças e Pontos Fortes, foi mencionado que a adoção de biodigestores para a produção de biogás e biofertilizantes contribui para que a empresa opere dentro de um paradigma da EC e do desenvolvimento sustentável, principalmente em se tratando do contexto das energias renováveis que é um dos principais pilares no uso de biodigestores, como foi identificado no estudo realizado por Loizia, Neofytou e Zorpas (2019); Cucchiella, D'Adamo e Gastaldi (2019).

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 26 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.



*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.

Figura 26. Respostas dos especialistas com relação a seção 2 (Fraquezas e Pontos Fracos)
Fonte: Autora (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 financeiras são os principais fatores que interferem 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 Winqvist *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 por cento (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 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, conseqüentemente, 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.

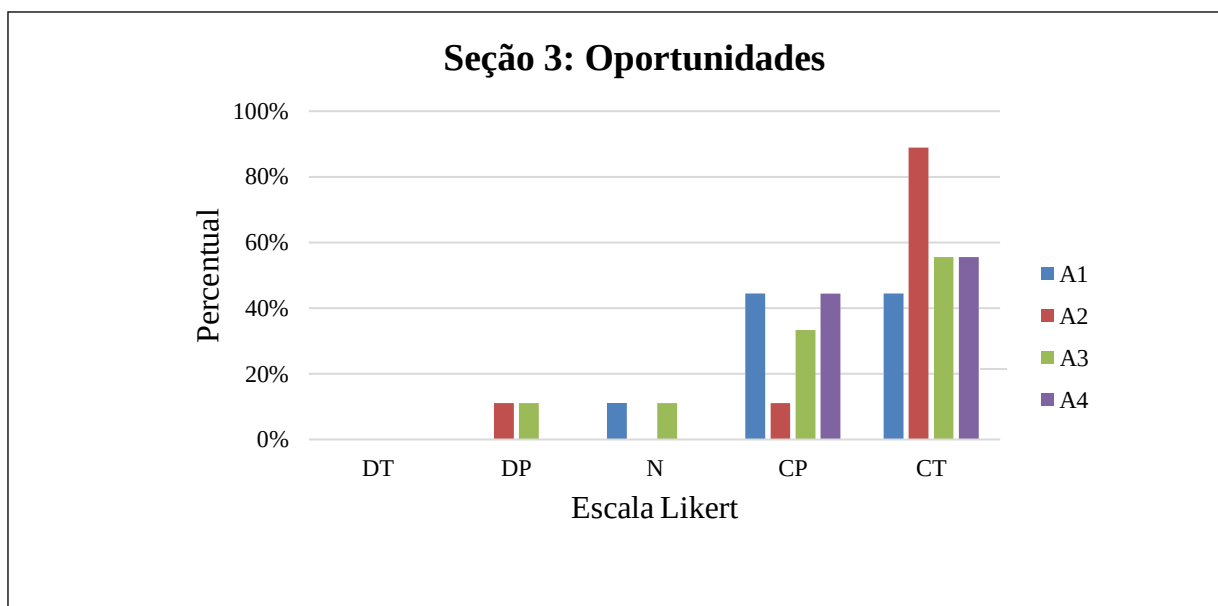
Além do elevado custo, Loizia, Neofytou e Zorpas (2019); Paul *et al.* (2018); Cecchi e Cavinato (2019); Abad *et al.* (2019), abordaram que os RSO devem ser separados corretamente, para não interferir na eficiência do biodigestor, o que na maioria das vezes não ocorre por parte do gerador de resíduo.

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 27 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.



*A1: Afirmitiva 1; A2: Afirmitiva 2; A3: Afirmitiva 3; A4: Afirmitiva 4

*DT: Discordo Totalmente; DP: Discordo Parcialmente; N: Neutro; CP: Concordo Parcialmente; CT: Concordo Totalmente.

Figura 27. Respostas dos especialistas com relação a seção 3
Fonte: Autora (2023)

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 por cento (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.

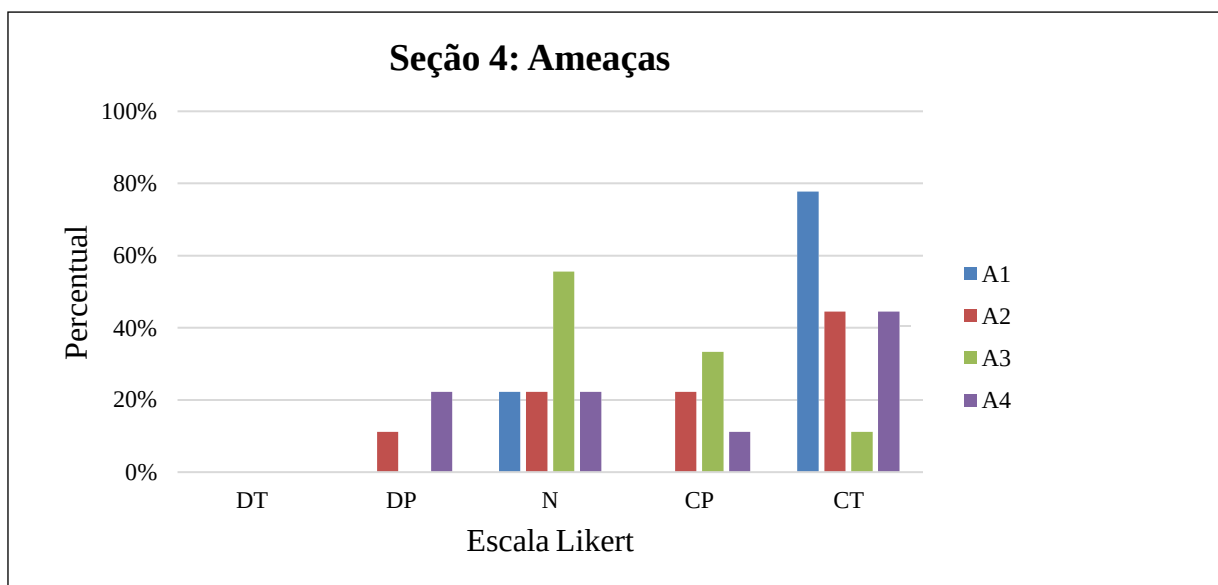
Produto de valor agregado através do biofertilizante.

- 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 por cento (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 28 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.



*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.

Figura 28. Respostas dos especialistas com relação a seção 4

Fonte: Autora (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 3, 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 3. Estatística descritiva das afirmativas do questionário e o *Alpha de Cronbach* das quatro dimensões analisadas

SWOT	Afirmativas	Desvio				
		Média	Padrão	Variância	Assimetria	Curtose
FORÇAS ($\alpha=0,97$)	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 ($\alpha=0,78$)	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 ($\alpha=0,82$)	Atendimento a uma classe de consumidores cada vez mais consciente das questões ambientais.	4,3	0,7	0,08	-0,6	-0,28

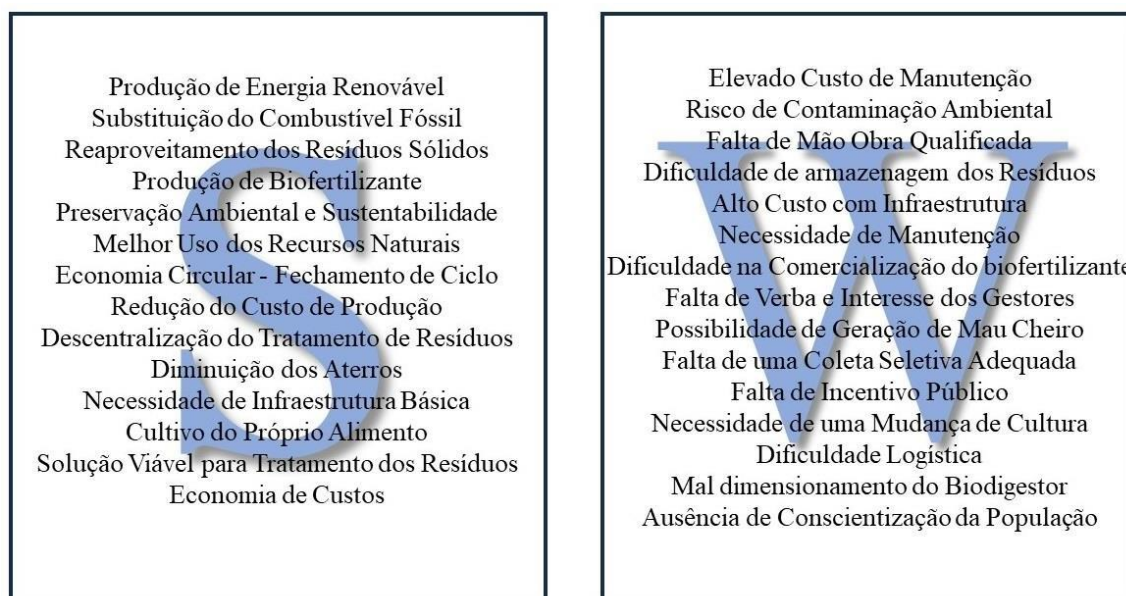
AMEAÇAS ($\alpha = 0,76$)	Benefícios econômico por meio do comércio de carbono e da venda do biogás e do biofertilizante.	4,7	0,44	0,17	-1,6	-0,73
	Sistema produtivo vantajoso, devido à alta diversificação dos insumos, matéria-prima em abundância, com baixo custo de mercado.	4,1	1,05	0,01	-1,09	0,61
	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
	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 em geral, sobre os benefícios do uso de biodigestores.	4,1	1,16	1,36	-0,87	-0,8
	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: Autora (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 (Figura 29), 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.



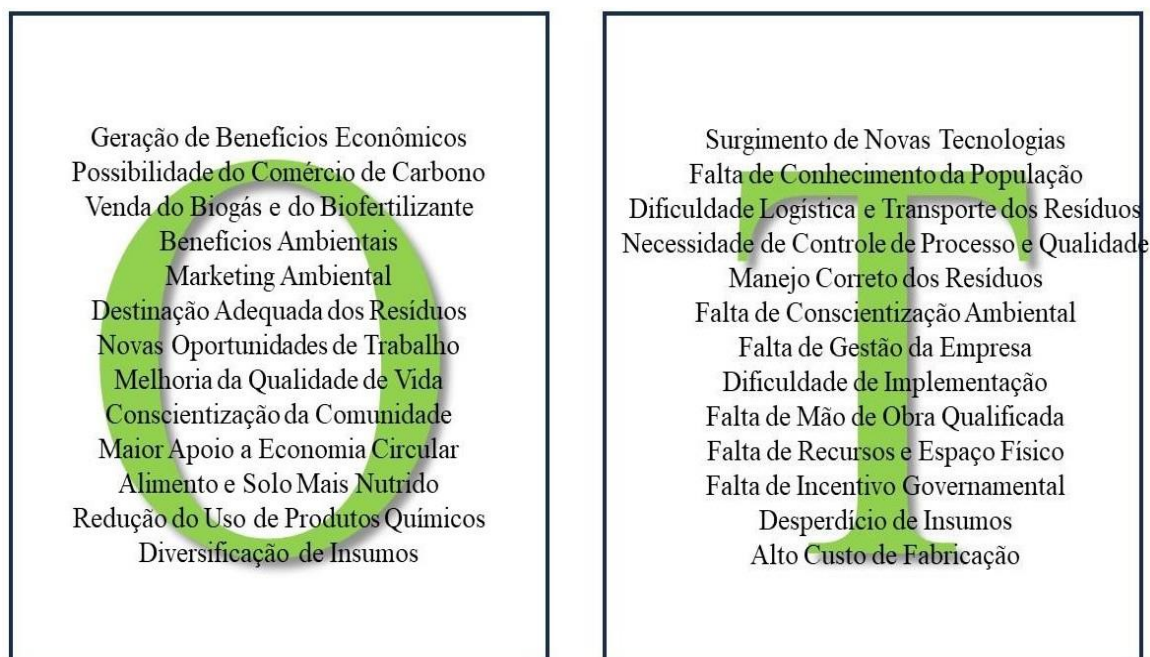


Figura 29. Resumo da matriz SWOT

Fonte: Autora (2023)

Na Figura 30, observa-se por meio de gráfico de tipo radar o resultado comparativo entre cada sessão (forças, fraquezas, ameaças e oportunidades).

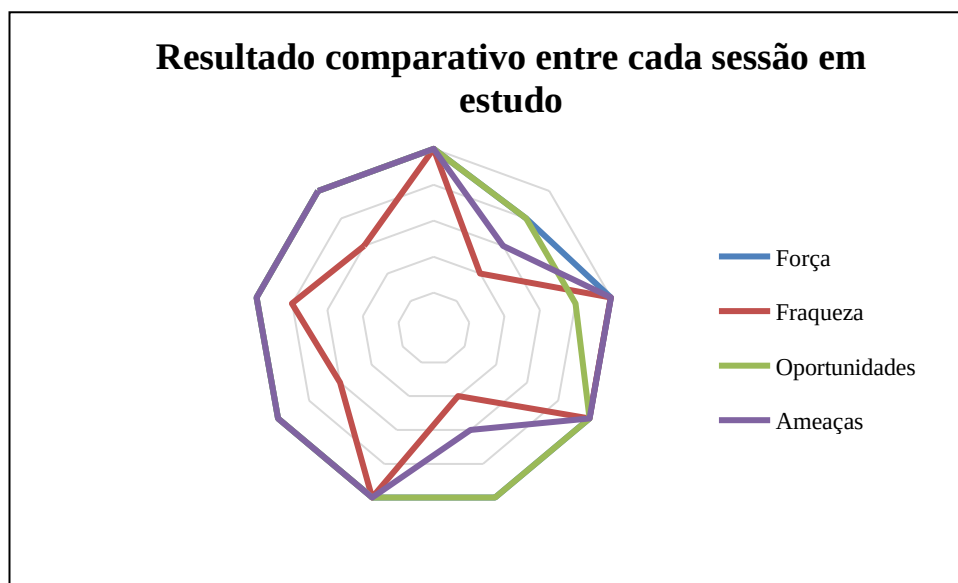


Figura 30. Resultado comparativo entre as sessões estudadas

Fonte: Autora (2023)

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.

5 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 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 CO₂eq. 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 CO₂eq. 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 CO₂eq, 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.

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.

REFERENCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). Solo: Análise granulométrica. NBR 7181: método de ensaio. Rio de Janeiro.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (2019) Panorama Resíduos Sólidos no Brasil. Acesso em 22 de dezembro de 2020, disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. (2023) Panorama Resíduos Sólidos no Brasil. Acesso em 22 de dezembro de 2023, disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>.

ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. (1988). Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In: Congresso Brasileiro de Geologia, v.2, p.753-760.

ANDERSEN, Mikael Skou. An introductory note on the environmental economics of the circular economy. Sustainability science, v. 2, n. 1, p. 133-140, 2007.

BJORN, Anja. The Swot Analysis. Seminar paper – Berlin, 2008 – Amazon Kindle Edition.
BLOMSMA, Fenna; BRENNAN, Geraldine. The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity. Journal of Industrial Ecology, v. 21, n. 3, p. 603-614, 2017.

BOCKEN, N.; OLIVETTI, E.; CULLEN, J.; POTTING, J.; LIFSET, R. Taking the circularity to the next level: a special issue on the circular economy. Journal of Industrial Ecology, v. 21, n. 3, p. 476-482, 2017.

BOGOVIC, N.; GRDIC, Z. Transitioning to a Green Economy—Possible Effects on the

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010.

BRASIL. Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Acesso em 30 de novembro de 2020, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm.

BRASIL. Ministério das Cidades. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos - 2015. Brasil: Ministério das Cidades. Acesso em: 30 de novembro de 2020, disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França. [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

BRASIL. Proposta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Qualidade Ambiental. 2020.

BRASIL. Proposta do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente -

Secretaria de Qualidade Ambiental. 2020.

BUCHMANN-DUCK, J.; BEAZLEY, K. An urgent call for circular economy advocates to acknowledge its limitations in conserving biodiversity. *Science of the Total Environment*, v. 727, p. 138602, 2020.

CONKE, L. S.; NASCIMENTO, E. P. A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras: uma avaliação metodológica. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 10, n. 1, 2018.

CORTEZ, S. C. O uso de biodigestores no contexto da economia circular: uma análise de barreiras e facilitadores. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). São Paulo. 2022.

COSTA, A. R. S.; MELO, A. M.; BELTRAME. Viabilidade da compostagem na gestão integrada de resíduos sólidos urbano: estudo de caso em Paulista – PE. In: El-Deir, Soraya Giovanetti; Pinheiro, Sara Maria Gomes; Aguiar, Wagner José de. (Orgs.). *Resíduos sólidos: práticas para uma gestão sustentável*. 1ª ed. Recife: EDURFPE, 2016. p. 364-374.
Croatian Economy. Sustainability, v. 12, n. 22, p. 9342, 2020.

DALMORO, M.; VIEIRA, K. M. Dilemas na construção de escalas Tipo Likert: o número de itens e a disposição influenciam nos resultados? *Revista Gestão Organizacional*, v. 6, n. 3, 28 jul. 2014.

DALMORO, M.; VIEIRA, K. M. Dilemas na construção de escalas Tipo Likert: o número de itens e a disposição influenciam nos resultados? *Revista Gestão Organizacional*, v. 6, n. 3, 28 jul. 2014.

DIRECTIVE, E. C. 98/EC of the European Parliament and of the Council, on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*, n. 312, p. 3-30, 2008.
DORNACK, Christina. Waste policy for source separation in Germany. In: *Source Separation and Recycling*. Springer, Cham, 2017. p. 3-10.

EIGENHEER; E. M.; FERREIRA, J. A. Três décadas de coleta seletiva em São Francisco (Niterói/RJ): lições e perspectivas. *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 20, n. 4, 2015.

Ellen MacArthur Foundation, 2020. Disponível em:
https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy/introduction/overview?gclid=CjwKCAiA4KaRBhBdEiwAZi1zzmOV4cBEL3rkW4AWXg3PJeI_yBFR-0C5EQ6OUzSO-c0MCGLCMS_eVhoC6WgQAvD_BwE. Acesso em: 02 fev 2023.

EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano de Nacional de Energia 2030. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>. Acesso em: 08 de dezembro de 2020, disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>.

EUROPEAN COMMISSION. (2015). Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. Acesso em 15 de novembro de 2020, disponível em: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/communication-from-the-commission-to-1>.

FERNANDO, A.; LIMA, S. C. (2012). Caracterização dos resíduos sólidos urbanos do município de Maxixe/Moçambique. *Caminhos de Geografia*, v. 13, n. 42, 335-345.

FINE, Laurence G. *The SWOT Analysis*. Kick It. LLC, 2011 – USA - Amazon Kindle Edition.

GEISSDOERFER, M.; MORIOKA, S.; CARVALHO, M.; EVANS, S. Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of cleaner production*, v. 190, p. 712-721, 2018.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GRANZOTTO, F.; AITA, B. D. D. SILVEIRA, A. F. D.; MAYER, S. B. Utilização de biodigestor anaeróbio no tratamento de resíduos orgânicos de um restaurante universitário. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 5, 2021.

HANSEN, K., MATHIESEN, B. V., SKOV, I. R. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 102, 1-13. 2019.

HARANGOZO, G.; SZIGETI, C. Corporate carbon footprint analysis in practice – With a special focus on validity and reliability issues. *Journal of Cleaner Production*, v. 167, 2017.

HANSEN, K., MATHIESEN, B. V., SKOV, I. R. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 102, 1-13. 2019.

IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: HOUESUNG L, CALVIN K, et al. (Eds). 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Acesso em: 18 abr 2024.

JABBOUR, C.; SEURING, S.; JABBOUR, A.; JUGEND, D.; FIORINI, P.; LATAN, H.; IZEPP, W. Stakeholders, innovative business models for the circular economy and sustainable performance of firms in an emerging economy facing institutional voids. *Journal of environmental management*, v. 264, p. 110416, 2020.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: Na analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.

KLEIN, F. B.; DIAS, S. F. L. G.; JAYO, M. Gestão de resíduos sólidos urbanos nos municípios da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: uma análise sobre o uso de TIC no acesso à informação governamental.

KILIÇ, E. Corporate carbon footprint for country Climate Change mitigation: A case study of a tannery in Turkey. *Science of the Total Environment*, v. 635, 2018.

LASH, J.; WELLINGTON, F. Competitive advantage on a warming planet. *Harvard Business Review*, v. 85, n. 3, 2007.

LAUER, M.; THRÄN, D. Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system?. *Energy Policy*, 109:324-336. 2017.

LAUER, M.; THRÄN, D. Biogas plants and surplus generation: Cost driver or reducer in the future German electricity system?. *Energy Policy*, 109:324-336. 2017.

LIMA, D.G.G.A. de A. A gestão dos resíduos sólidos urbanos e sua relação com as mudanças climáticas. *Anais. V Encontro Nacional e III Encontro Latino Americano sobre edificações e comunidades sustentáveis*. Recife, 2009.

Maceron Filho, O.; Araujo, E. A. S.; Quintairos, P. C. R. A análise SWOT e sua relevância para o planejamento estratégico.

MEIRELES, J.F. O Planejamento Urbano na Gestão de Resíduos Sólidos e Mudanças Climáticas. *Universidade Federal do Paraná*, v. 17 n. 38 (2023): *Emergência Climática sob o Olhar das Ciências Ambientais*, 2023.

MICHELINI, G.; MORAES, R.; CUNHA, R.; COSTA, J.; OMETTO, A. From linear to circular economy: PSS conducting the transition. *Procedia CIRP*, v. 64, n. 1, p. 2-6, 2017.

MOHAMMED, T.; MUSTAPHA, K.; GODSELL, J.; ADAMU, Z.; BABATUNDE, K.; AKINTADE, D.; ACQUAYE, A.; FUJII, H.; NDIAYE, M.; YAMOA, F.; KOH, S. A critical review of the impacts of COVID-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, p. 105169, 2020.

MORSELETT, Piero. Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 153, p. 104553, 2020.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *Journal of business ethics*, v. 140, n. 3, p. 369-380, 2017.

OLIVER, A.; SOUZA, A.; QUADROS, D.; VALLADARES, R. Manual de Treinamento em Biodigestão. Instituto de Estudos Del Hambre. 2008. Disponível em: <http://docplayer.com.br/3948560-Manual-de-%20treinamento-embiodigestao.html>. Acesso em: 25 jan 2023.

PORTAL DO BIOGÁS. Incentivos legais para a construção de biodigestores no Brasil. Disponível em: <https://www.portaldobiogas.com/incentivos-legais-para-construcao-debiodigestoresbrasil/#:~:text=A%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Res%C3%ADduos,de%20res%C3%ADduos%20s%C3%B3lidos%20org%C3%A2nicos%20urbanos>. Acesso em: 25 jan 2023.

PETERS, G. P. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 2, n. 4, 2010.

RITZÉN, S.; SANDSTRÖM, G. Barriers to the Circular Economy—integration of perspectives and domains. *Procedia Cirp*, v. 64, p. 7-12, 2017.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B., BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.

Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources. Conservation and Recycling*, 131: 54-63. 2018.

SANTOS, I. F. S.; VIEIRA, N. D. B.; NÓBREGA, L. G. B., BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources. Conservation and Recycling*, 131: 54-63. 2018.

SANTOS, K. L., PANIZZON, J., CENCI, M. M., GRABOWSKI, G., JAHNO, V. D. (2020). Food losses and waste: reflections on the current brazilian scenario. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 23, n. 13.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, v. 17, p. 48-56, 2016.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, v. 17, p. 48-56, 2016.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable energy*, 129:457- 472. 2018.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J. F.; FAHL, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable energy*, 129:457- 472. 2018.

SGANZERLA, Edílio. Biodigestor: uma solução. *Agropecuária*, 1983.

SILVA, D. D. S.; RODRIGUES, J. B.; ERICEIRA, M. P.; SILVA, A. C. Análise da disposição irregular de resíduos sólidos urbanos; estudo de caso em área de disposição inadequada no bairro COHAB em São Luís-MA. In: SANTANA, R. F.; ARAGÃO JÚNIOR, W. R.; EL-DEIR, S. G. (Org.). 1ª ed. Resíduos sólidos: desenvolvimento e sustentabilidade. Recife: EDUFRPE, 2020, p. 407-414.

SILVA, R. C.; NETO, I. D. M.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 59: 328-341. 2016.

SILVA, R. C.; NETO, I. D. M.; SEIFERT, S. S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable. Energy Reviews*, 59: 328-341. 2016.

STANCHEV, P.; VASILAKI, V.; EGAS, D.; COLON, J.; PONSÁ, S.; KATSOU, E. Multilevel environmental assessment of the anaerobic treatment of dairy processing effluents in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, p. 121139, 2020.

TEIXEIRA, M G C. Impasses Na Constituição De Mecanismo De Mudança Climática: A Experiência De Uma Empresa Brasileira De Geração De Energia Elétrica Proveniente Do Lixo. *o&s - Salvador*, v.17 - n.55, p. 665-688 - Outubro/Dezembro – 2010. www.revistaoes.ufba.br.

VEIGA, B. M. S. Pegada de carbono empresarial – uma aplicação do método MC3 à Domingos da Silva Teixeira SA. 2017. 98 f. Universidade do Minho, 2017.

WIEDMANN, T. Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis. *Ecological Economics*, v. 70, n. 11, 2011.

WU, R. The carbon footprint of the Chinese health-care system: an environmentally extended input–output and structural path analysis study. *The Lancet Planetary Health*, v. 3, n. 10, 2019.

WAYCARBON. Noções Básicas de Gestão das Mudanças Climáticas para Empresas.

Disponível em:

<<https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F5818%2F1472235380eBook++Noções+Básicas+de+Gestão+das+Mudanças+Climáticas+Para+Empresas.pdf>> . Acesso em: 6 de maio de 2024.

ZAGO, V. C. O.; BARROS, R. T. V. (2019). Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 2, 219-228.

ZAHAN, Z.; MAAZUZA, Z. OTHMAN. Effect of pre-treatment on sequential anaerobic co-digestion of chicken litter with agricultural and food wastes under semi-solid conditions and comparison with wet anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 281 p. 286 – 295, 2019.

ZAMBON, M.; LUNA, M. M. M. (2018). Resíduos orgânicos urbanos: um olhar sobre Florianópolis, Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo.

ZHAO, G.; SHUANG, J.; LAN, J.; TING, Z.; FANG, M. Research and application of circular economy mode based on biogas energy as a significant technique. *Kezaisheng Nengyuan/Renewable Energy Resources*, v. 34, n. 10, p. 1574-1580, 2016.

APÊNDICE 1

QUESTIONÁRIO

A EC se desenvolve como sendo uma alternativa à economia atual, que se caracteriza como um modelo linear, pois busca acoplar o crescimento econômico com a preservação ambiental, através do fechamento ou redução do ciclo de materiais. Dessa forma, a EC busca mitigar os problemas ambientais e reduzir a geração de resíduos.

Nesse contexto, os biodigestores desempenham um papel fundamental na EC, uma vez que permitem a degradação ambientalmente adequada dos resíduos orgânicos. Por meio dos biodigestores, os RO são processados de maneira eficiente, resultando na produção de biofertilizante e biogás, podendo ser utilizados na agricultura sustentável e o biogás como fonte de energia renovável.

Os biodigestores são uma tecnologia que contribui para a transição da economia linear para a EC, promovendo a sustentabilidade ao mesmo tempo em que valoriza os recursos disponíveis e reduz os impactos negativos ao meio ambiente.

Levando-se em consideração este cenário, o questionário abaixo foi desenvolvido com o objetivo de analisar como os biodigestores podem contribuir com a sustentabilidade de um determinado ambiente. Nas seções a seguir, estão descritas quatro questões que devem ser respondidas utilizando uma escala Likert de 1 a 5 pontos, visto os pontos mencionados indicam:

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

A quinta e última questão de cada seção será de resposta aberta, permitindo que você expresse sua opinião de forma participativa. Por favor, prossiga respondendo às questões conforme as instruções.

A identificação dos participantes, bem como o nome da empresa não serão divulgados. Os dados coletados serão utilizados exclusivamente para fins da presente pesquisa.

Identificação	
Nome da empresa	
Nome	
Cargo/função	

Analise as afirmações abaixo sobre os pontos fortes que facilitam o uso de biodigestores para apoiar a Economia Circular, e indique o seu grau de concordância utilizando a escala Likert de 1 a 5.

Forças e pontos fortes	Grau de concordância
1. Utilização de materiais considerados resíduos, como insumos/matéria-prima para novos produtos.	
2. Geração de energia renovável por meio da produção do biogás	
3. Maior lucratividade da empresa, com a utilização e venda do biogás e do biofertilizante.	
4. Atuação da empresa dentro de um desenvolvimento sustentável, um processo produtivo no qual respeite as limitações do meio ambiente e não polua.	
5. Em sua opinião qual(is) força(s) relacionam o uso de Biodigestores e a Economia Circular?	

Fraqueza e pontos fracos	Grau de concordância
6. Alto custo com transporte e armazenagem dos insumos utilizados para abastecimento do biodigestor e do produto final: o biofertilizante e o biogás	
7. Alto custo com infraestrutura para construção e manutenção periódica do biodigestor e da rede de distribuição do biogás.	
8. Possibilidade de contaminação do solo, água e ar.	
9. Coleta seletiva inadequada	
10. Em sua opinião qual(is) fraqueza(s), ou dificuldades internas, que a empresa possui na relação entre o uso de Biodigestores e a Economia Circular?	

Oportunidades	Grau de concordância
11. Atendimento a uma classe de consumidores cada vez mais consciente das questões ambientais.	
12. Benefícios econômico por meio do comércio de carbono e da venda do biogás e do biofertilizante.	
13. Sistema produtivo vantajoso, devido à alta diversificação dos insumos, matéria-prima em abundância, com baixo custo de mercado.	
14. Obtenção de benefícios ambientais (redução dos gases do efeito estufa) e sociais (melhor qualidade de vida para a população).	

15. Qual a principal, ou as principais, oportunidades externas à empresa que relacionam o uso de Biodigestores e a Economia Circular?

Ameaças	Grau de concordância
16. 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.	
17. Falta de conhecimento e conscientização da população em geral, sobre os benefícios do uso de biodigestores.	
18. Surgimento de fontes de energias renováveis mais atraentes.	
19. Possibilidade de declínio na produção dos insumos. Seja por exemplos como: problemas com transporte; diminuição da pecuária; utilização dos dejetos para outra finalidade.	
20. Qual a principal, ou as principais, ameaças externas à empresa e que relacionam o uso de Biodigestores e a Economia Circular?	

ANEXO 1



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: VALORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS EM SISTEMAS DE BIODIGESTORES NO CONTEXTO DA BIOECONOMIA CIRCULAR

Pesquisador: Graziela Pinto de Freitas

Área Temática:

Versão: 2

CAAE: 70538023.8.0000.5183

Instituição Proponente: Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 6.299.392

Apresentação do Projeto:

DADOS PRELIMINARES: projeto original, 2 versão. Trata-se de uma parte de um projeto de tese de doutorado.

INFORMAÇÕES SOBRE O PROJETO: O século XXI é marcado por um crescimento econômico acelerado, em decorrência do elevado consumismo da população, logo nem sempre esse crescimento ocorre de forma estruturada, pois não são levados em consideração os impactos ambientais, sociais e econômicos de determinada atividade (BOGOVIC; GRDIC, 2020). No ano de 2020 a economia foi impactada pela 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, pois a população - mudou seus hábitos e de certa forma aumentou o consumo de produtos que geram resíduos (MOHAMMED et al., 2021). Diante deste cenário, Mohammed et al., (2021) apontam 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

Endereço: Rua Tabeião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

ambiental das futuras gerações. A utilização exagerada dos recursos naturais e, conseqüentemente, 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). 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). Desta forma, objetiva-se com esta tese analisar as implicações do uso de biodigestores na EC e quantificar as emissões de CO₂ equivalente em diferentes cenários de gestão e tratamento dos RSO.

Desenho do estudo:

Será realizada a análise SWOT. Através do embasamento desenvolvido na revisão bibliográfica, elaborou-se o questionário utilizando-se a ferramenta Google Forms. Após a elaboração do questionário, o mesmo foi submetido ao processo de avaliações para possíveis alterações de acordo com os profissionais da área, sendo estes acadêmicos de mestrado, doutorado e professores. Os acadêmicos escolhidos para validação do questionário são pesquisadores que trabalham com biodigestores e EC. Optou-se por essa validação para se ter um embasamento mais detalhado, desta forma, as pessoas submetidas aos questionamentos podem compreendê-lo da melhor forma. Após essa etapa o questionário será atualizado segundo as sugestões dos pesquisadores.

Após a etapa de correção dos questionários, irá iniciar o processo de seleção das empresas que possam responder ao mesmo. Optou-se por essa miscigenação de empresas que trabalham com biodigestores, por compreender que dessa maneira ocorra uma concepção mais detalhada das vantagens e desvantagens do uso de biodigestores. Pois entende-se que as pessoas que utilizam desse tipo de tecnologia sejam mais propícias a argumentarem sobre o assunto.

O questionário será elaborado conforme a análise SWOT, levando-se em consideração os principais impactos (positivos e negativos) do uso de biodigestores. Este será dividido em quatro seções:

Endereço: Rua Tabelião Stanislau Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

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 serão elaboradas de forma que cada seção irá apresentar quatro afirmativas que serão respondidas de acordo com uma escala Likert, com variação de 1 a 5 (DALMORO; VIEIRA, 2014) e, uma pergunta discursiva, com o objetivo de apontar as particularidades de cada tipo de biodigestor. No geral serão aplicadas 20 questões, sendo 16 afirmativas e 4 discursivas.

Tamanho da Amostra no Brasil: 20

Vigência do estudo: sete/23 a março/24.

Objetivo da Pesquisa:

OBJETIVO GERAL:

Analisar as implicações do uso de biodigestores na EC, e quantificar as emissões de CO₂ equivalente em diferentes cenários de gestão e tratamento dos RSO.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Analisar os impactos decorrentes da utilização de biodigestores na EC.
- Identificar a influência dos impactos para a sustentabilidade.
- Elaborar uma análise SWOT com empresas que utilizam biodigestores.
- Construir cenários de emissões dos gases de efeito estufa – GEE - com base na gestão de RS e utilização de biodigestores.
- Identificar as emissões de CO₂ equivalente para cada cenário

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

Os riscos estão voltados ao constrangimento relacionado a alguma pergunta que a pessoa não se sinta a vontade para responder, caso isso ocorra, a mesma pode parar com a continuação do

Endereço: Rua Tabeião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

questionário, sem nenhum prejuízo a mesma.

Benefícios:

Contribuição com a pesquisa para o desenvolvimento de uma métrica capaz de auxiliar gestores públicos e comunidade acadêmica na identificação de falhas do processo de gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos; possui potencial de estimular o desenvolvimento de novas pesquisas no campo de estudo.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

A presente versão trata de respostas às pendências no protocolo de pesquisa, apontadas em parecer consubstanciado nº: 6.185.739

PENDÊNCIA (01) O cronograma deve ser detalhado em meses

RESPOSTA: Foi realizada a modificação do cronograma.

AVALIAÇÃO: PENDÊNCIA RESOLVIDA

PENDÊNCIA (02) Na declaração de infraestrutura consta um documento de defesa de pós-graduação. Assim, precisa ser anexado documento correto.

RESPOSTA: O documento em questão é a ATA de defesa do projeto de tese. Segue em anexo.

AVALIAÇÃO: PENDÊNCIA RESOLVIDA

PENDÊNCIA (3) É preciso detalhar os benefícios do projeto.

RESPOSTA: Benefícios foram detalhados.

AVALIAÇÃO: PENDÊNCIA RESOLVIDA

PENDÊNCIA (4) O TCLE é necessário para realização dessa pesquisa, uma vez que parte do seu método envolve a aplicação de um questionário direcionado aos pesquisadores.

RESPOSTA: TCLE está anexado.

AVALIAÇÃO: PENDÊNCIA RESOLVIDA

Endereço: Rua Tabeião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Todos os documentos de inclusão obrigatória no protocolo de pesquisa foram apresentados, conforme recomendações contidas na Resolução 466/2012, do CNS/MS.

Recomendações:

A pesquisadora responsável e demais colaboradores deverão MANTER A METODOLOGIA PROPOSTA E APROVADA PELO CEP-HULW.

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Considerando que o estudo apresenta viabilidade ética e metodológica e encontra-se em consonância com as diretrizes da Resolução 466/2012, do CNS, MS, somos favoráveis ao desenvolvimento da investigação.

Considerações Finais a critério do CEP:

Ratificamos o parecer de APROVAÇÃO do protocolo de pesquisa, emitido pelo Colegiado do CEP/HULW, em reunião ordinária realizada em 05 de setembro de 2023.

OBSERVAÇÕES IMPORTANTES PARA O(S) PESQUISADOR(ES):

. O participante da pesquisa e/ou seu responsável legal deverá receber uma via do TCLE na íntegra, com assinatura do pesquisador responsável e do participante e/ou responsável legal. Se o TCLE contiver mais de uma folha, todas devem ser rubricadas e com aposição de assinatura na última folha. O pesquisador deverá manter em sua guarda uma via do TCLE assinado pelo participante por cinco anos.

. O pesquisador deverá desenvolver a pesquisa conforme delineamento aprovado no protocolo de pesquisa e só descontinuar o estudo somente após análise das razões da descontinuidade, pelo CEP que o aprovou, aguardando seu parecer, exceto quando perceber risco ou dano não previsto ao sujeito participante ou quando constatar a superioridade de regime oferecido a um dos grupos da pesquisa que requeiram ação imediata.

Lembramos que é de responsabilidade do pesquisador assegurar que o local onde a pesquisa será realizada ofereça condições plenas de funcionamento garantindo assim a segurança e o bem-estar dos participantes da pesquisa e de quaisquer outros envolvidos.

Eventuais modificações ao protocolo devem ser apresentadas por meio de EMENDA ao CEP/HULW de forma clara e sucinta, identificando a parte do protocolo a ser modificada e suas justificativas.

O pesquisador deverá apresentar o Relatório PARCIAL E/OU FINAL ao CEP/HULW, por meio de NOTIFICAÇÃO online via Plataforma Brasil, para APRECIÇÃO e OBTENÇÃO da Certidão Definitiva

Endereço: Rua Tabelião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

por este CEP. Informamos que qualquer alteração no projeto, dificuldades, assim como os eventos adversos deverão ser comunicados a este Comitê de Ética em Pesquisa através do Pesquisador responsável uma vez que, após aprovação da pesquisa o CEP-HULW torna-se corresponsável.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BASICAS_DO_PROJETO_2155144.pdf	03/08/2023 16:22:26		Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLEREENVIADO.pdf	03/08/2023 16:21:00	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Outros	CartaRESPOSTA.pdf	03/08/2023 16:16:33	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	DocumentoDefesa.pdf	03/08/2023 15:50:50	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Cronograma	CronogramaDETALHADO.pdf	03/08/2023 15:46:29	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	TeseComite.pdf	11/06/2023 14:08:08	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Outros	TermoCompromisso.pdf	11/06/2023 14:02:13	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Outros	InstrumentoColeta.pdf	11/06/2023 14:01:23	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Outros	Financeiro.pdf	11/06/2023 14:00:41	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Outros	Anuencia.pdf	11/06/2023 13:59:45	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Orçamento	ORCAMENTO.pdf	11/06/2023 13:57:52	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE.pdf	11/06/2023 13:57:26	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Declaração de Instituição e Infraestrutura	Declaracao.pdf	11/06/2023 13:54:07	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
Cronograma	CRONOGRAMA.pdf	11/06/2023 13:48:59	Graziela Pinto de Freitas	Aceito

Endereço: Rua Tabelião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br



UFPB - HOSPITAL
UNIVERSITÁRIO LAURO
WANDERLEY DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA
PARAÍBA



Continuação do Parecer: 6.299.392

Folha de Rosto	FolhaDeRosto.pdf	11/06/2023 13:48:19	Graziela Pinto de Freitas	Aceito
----------------	------------------	------------------------	------------------------------	--------

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

JOAO PESSOA, 13 de Setembro de 2023

Assinado por:

LUCIANA PIMENTEL FERNANDES DE MELO
(Coordenador(a))

Endereço: Rua Tabeião Stanislaw Eloy, 585, 2º andar Castelo Branco

Bairro: Cidade Universitária

CEP: 58.050-585

UF: PB

Município: JOAO PESSOA

Telefone: (83)3206-0704

E-mail: cep.hulw@ebserh.gov.br