UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA

CLARA FEITOZA SOUZA

ORIENTADOR: FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA

COORIENTADORA: ENEIDA CAMPOS FELIPE DE BRITES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS NO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA

CLARA FEITOZA SOUZA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

Prof. PhD Francisco Javier Contreras Pineda (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)

_____

Prof. Me. Eneida Campos Felipe De Brites (IFB)
(COORIENTADORA)

_____

Prof. Dr. Cláudio Henrique De Almeida Feitosa Pereira (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

Prof. Dr. Paulo Celso Dos Reis Gomes (EPR/UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 21 DE JULHO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

FEITOZA, CLARA SOUZA

Análise de alternativas tecnológicas para redução de impactos ambientais dos resíduos orgânicos no restaurante universitário de Brasília.

xiii, 94 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2023)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. ACV
2. Resíduos Sólidos Orgânicos
3. Tratamentos Biológicos
4. GEE

I. ENC/FT/UnB
II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Feitoza, C.S. (2023). *Análise de alternativas tecnológicas para redução de impactos ambientais dos resíduos orgânicos no restaurante universitário de Brasília.* Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Clara Feitoza Souza

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Análise de alternativas tecnológica para redução de impactos ambientais dos resíduos orgânicos no restaurante universitário de Brasília.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

CLARA FEITOZA SOUZA

clarfeitoza@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as bençãos que tive, minha saúde, família, amigos, educação e oportunidades, por guiar meus passos, me proteger e iluminar, sua presença em minha vida é uma constante de força e conforto.

Aos meus pais (painho e mainha), Cláudio e Suzana, às minhas irmãs, Luiza e Vitória, por todo amor e bons momentos que me proporcionaram em toda minha vida, amo vocês.

Aos meus avós, Vovô Toinho, Vovó Zete e Mac, minha eterna gratidão por ter avós tão amorosos e dedicados em minha vida, levarei sempre seus ensinamentos.

Aos meus tios, meus primos e em especial à Tia Sandra, Tio João por me acolherem e à Tio Galego por não me deixar desistir, obrigada por estarem ao meu lado e me apoiarem durante minha vida.

Ao meu namorado e companheiro, João Lucas, por todos os momentos de parceria em que foi brisa calma em meio aos meus furacões e agitação inspiradora nas minhas desmotivações, te amo.

Á minha psicóloga e meu psiquiatra pelo apoio inestimável e cuidado dedicados ao longo dessa jornada, expresso minha profunda gratidão.

Aos meus orientadores, Prof. Francisco Contreras e Profa. Eneida de Brites, pelas orientações e apoio mesmo em meio a toda correria, não seria possível realizar esse trabalho sem vocês.

Ao meu primeiro professor de física, Marcos Kanso, por ter me introduzido a esse mundo das exatas, sua influência foi fundamental.

À todos os meus professores da UnB, por terem contribuído significativamente para minha formação acadêmica.

Às Universidade de Brasília e Universidade Federal de Pernambuco, por terem me proporcionado uma educação de alta qualidade e terem me permitido crescer como profissional, sou grata por todos os recursos, oportunidades e experiências que me foram oferecidas durante minha jornada acadêmica.

RESUMO

O consumo exacerbado e o descarte precoce de produtos levam a maior degradação ambiental, extraindo matéria-prima do meio ambiente, contribuindo para o esgotamento de recursos, e emitindo quantidades elevadas de Gases do Efeito Estufa que contribui para o aquecimento global. Os aterros sanitários contribuem em larga escala para as emissões de gás metano globalmente, devido a quantidade de resíduos orgânicos que são destinados a eles. Tecnologias para tratamento de resíduos orgânicos como a compostagem e a digestão anaeróbica, que estão previstas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, têm sido amplamente aplicadas principalmente para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Diante disso o trabalho analisa 3 cenários para o tratamento final dos resíduos sólidos orgânicos gerados no Restaurante Universitário do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Utilizando a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida e os dados da biblioteca do Ecoinvent, os resultados encontrados revelam que a compostagem, onde foi constatado um valor evitado de emissão de aproximadamente -38,91 kg de CO_2eq e de uso de recursos de -224,43, tem uma maior contribuição em comparação a digestão anaeróbica, que chegou a evitar -58,05 kg de CO_2eq e -434,22 MJ de uso de recursos, devido a geração de eletricidade.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida, resíduos sólido orgânicos, aquecimento global, depleção de recursos.

ABSTRACT

Excessive consumption and premature disposal of products lead to more significant environmental degradation, extracting raw materials from the environment, contributing to resource depletion, and emitting significant amounts of Greenhouse Gases that contribute to global warming. Landfills largely contribute to methane emissions worldwide due to the substantial amount of organic waste directed to them. Technologies for treating organic waste, such as composting and anaerobic digestion, as outlined in the National Solid Waste Plan, have been widely implemented primarily to reduce greenhouse gas emissions. The study examines three scenarios for the final treatment of organic solid waste generated at the University Restaurant on the Darcy Ribeiro Campus of the University of Brasília. Using Life Cycle Assessment methodology and data from the Ecoinvent database, the obtained results reveal that composting, with an observed avoided emission value of approximately -38.91 kg CO2eq and resource use of -224.43, has a greater contribution compared to anaerobic digestion, which resulted in an avoidance of -58.05 kg CO2eq and -434.22 MJ of resource use, due to electricity generation.

Keywords: life cycle assessment, organic solid waste, global warming, resource depletion.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 4

2.1. OBJETIVO GERAL 4

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5

3.1. HISTÓRICO AMBIENTAL NO MUNDO 5

3.1.1. Mudança climática, gases do efeito estufa e resíduos sólidos 7

3.1.2. Depleção de recursos e resíduos sólidos 9

3.1.3. Economia circular 10

3.2. ASPECTOS LEGAIS ACERCA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 12

3.2.1. Definição de resíduos sólidos e resíduos sólidos orgânicos 17

3.2.2. Gerenciamento de resíduos sólidos no Distrito Federal 18

3.3. PRINCIPAIS TRATAMENTOS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS 25

3.3.1. Aterro Sanitário 29

3.3.2. Compostagem 31

3.3.3. Biodigestão 32

3.4. ANÁLISE DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DO CICLO DE VIDA 36

3.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA 37

3.5.1. Definição de objetivo e escopo 38

3.5.2. Análise de inventário 42

3.5.3. Avaliação de impactos 42

3.5.4. Interpretação de resultados 43

3.5.5. Softwares, base de dados e inventário 43

4. METODOLOGIA 45

4.1. APLICAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA 47

4.2. DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA 51

4.2.1. Transporte através de veículos 51

4.2.2. Energia elétrica 52

4.2.3. Aterro Sanitário 53

4.2.4. Compostagem 54

4.2.5. Digestão Anaeróbica 55

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 60

5.1. CARACTERIZAÇÃO 60

5.1.1. Caracterização do gerenciamento de resíduos no RU 60

5.1.2. Análise quantitativa e qualitativa 62

5.1.3. Caracterização da composteira da UNB 63

5.2. INVENTÁRIO DO ESTUDO 64

5.2.1. Cenário 1 - atual 65

5.2.2. Cenário 2 - compostagem 68

5.2.3. Cenário 3 – digestão anaeróbica 70

5.3. REALIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA 72

6. CONCLUSÃO 81

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 83

APÊNDICE A – RESULTADOS ACV CORRESPONDENTE A TODAS AS CATEGORIAS DE IMPACTOS DO MÉTODO CML-IA BASELINE PARA CADA CENÁRIO 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Gráfico comparativo entre emissões de CO_2 e aumento de temperatura no oceano. 8
Figura 2. Gráfico de emissões de CO_2 por país. 9
Figura 3. Funcionamento da economia circular. 11
Figura 4. Prioridade na geração de resíduos sólidos. 20
Figura 5. Plataforma de metanização do campus Pampulha da UFMG. 36
Figura 6. Estrutura da avaliação do ciclo de vida. 38
Figura 7. Fluxograma para sistema de produto em um ACV. 39
Figura 8. Fluxograma de conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto. 40
Figura 9. Elementos da fase de Avaliação de Impactos. 43
Figura 10. Fluxograma metodológico da pesquisa. 45
Figura 11. Fluxograma e limites do sistema no cenário 1. 49
Figura 12. Fluxograma e limites do sistema no cenário 2. 50
Figura 13. Fluxograma e limites do sistema no cenário 3. 50
Figura 14. Planta de Plataforma de Metanização pMethar. 58
Figura 15. Caminho dos resíduos orgânicos do portão ao berço. 61
Figura 16. Localização da composteira da UnB. 64
Figura 17. Emissões equivalentes em cada etapa do cenário. 75
Figura 18. Gráfico do potencial de aquecimento global em função de 1 t de resíduos sólidos orgânicos. 76
Figura 19. Gráfico da depleção de recursos em função de 1 t de resíduos sólidos orgânicos. 76
Figura 20. Definição das entradas e saídas no cenário 1 - aterramento. 93
Figura 21. Definição das entradas e saídas no cenário 1 - eletricidade, diesel e transporte. 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Histórico de acontecimentos ambientais ao longo dos anos. 5
Tabela 2. Definição de cada ODS. 7
Tabela 3. Documentos legais e normativos de abrangência nacional relacionados aos resíduos sólidos 13
Tabela 4. Documentos legais e normativos de abrangência distrital relacionados aos resíduos sólidos. 20
Tabela 5. GEE citados em cada estudo. 26
Tabela 6. Aumento de pesquisas relacionando ACV e gerenciamento de resíduos a nível mundial. 37
Tabela 7. Aumento de pesquisas relacionando ACV e gerenciamento de resíduos a nível nacional. 37
Tabela 8. Unidades funcionais e categorias de impactos utilizadas em pesquisas. . 40
Tabela 9. Pesquisa e método utilizado nos anos de 2021-2022. 44
Tabela 10. Categorias AICV e suas unidades. 47
Tabela 11. Caracterização dos rendimentos de produção de metano em função do uso de diferentes substratos. 56
Tabela 12. Horário de coleta dos resíduos. 60
Tabela 13. Atividades e resíduos gerados por região. 61
Tabela 14. Geração de RSO do Restaurante Universitário. 62
Tabela 15. Quantidade de Sólidos Voláteis e Totais no resíduo orgânico. 63
Tabela 16. Valores do inventário do estudo. 65
Tabela 17. Dimensionamento de transporte de RSO para o aterro. 66
Tabela 18. Indicadores do Aterro Sanitário de Brasília. 66
Tabela 19. Valores dos parâmetros de emissões no aterro. 67
Tabela 20. Emissões do cenário atual. 67
Tabela 21. Dimensionamento de transporte de RSO para a composteira. 68
Tabela 22. Emissões anuais totais do cenário 2 - compostagem. 69
Tabela 23. Emissões totais do cenário 3 – digestão anaeróbica. 71
Tabela 24. Valores das entradas e saídas no processo de tratamento e disposição final em aterro sanitário. 72
Tabela 25. Valores das entradas e saídas no processo de compostagem. 72

Tabela 26. Valores das entradas e saídas no processo de digestão anaeróbica. 73
Tabela 27. Nome e descrição das variantes. 74
Tabela 28. Resultados AICV para cada cenário. 74
Tabela 29. Impacto de aquecimento global e depleção de recursos abióticos por tipo de tratamento - Estudos anteriores. 77
Tabela 30. Comparação dos valores de emissões anuais por cenários em t de CO_2eq baseados nas fontes dados da Ecoinvent e artigos /publicações. 78
Tabela 31. Valores de emissões anuais evitadas por cenários em t de CO_2eq 78

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 51
Equação 2 51
Equação 3 52
Equação 4 52
Equação 5 52
Equação 6 53
Equação 7 53
Equação 8 54
Equação 9 54
Equação 10 57

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
A.I.A.	Avaliação de Impacto Ambiental
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
ASB	Aterro Sanitário de Brasília
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
CO_2eq	Dióxido de carbono equivalente
FOD	*Fisrt Order Decay*
GEE	Gases do Efeito Estufa
HSAD	*High Solid Anaerobic Digestion*
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IRR	Índice de Recuperação de Resíduos
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MMA	Ministério do meio Ambiente
N_2O	Protóxido de nitrogênio
NEPA	*National Environmental Policy Act*
ONGs	Organizações Não Governamentais
PDGIRS	Plano Distrital de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
Planares	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RU	Restaurante Universitário
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa
SLU	Sistema de Limpeza Urbana
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UnB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima
WAD	*Wet Anaerobic Digestion*

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço industrial, crescimento demográfico e maior poder aquisitivo da população, os impactos ambientais encontram-se cada vez mais relevantes sendo necessário buscar alternativas para reduzi-los. Entre um dos grandes agentes dos impactos ambientais está a geração de resíduos sólidos, cujo gerenciamento ainda enfrenta dificuldades com a disposição incorreta em muitos lugares do país e a falta de alternativas mais eficientes que consigam retornar o resíduo ao seu ciclo produtivo.

A geração de resíduos sólidos contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH4), que são responsáveis pelo aquecimento global. O correto gerenciamento desses resíduos, por meio de tecnologias menos agressivas ao meio ambiente pode contribuir para a diminuição dos impactos ambientais causados pela geração e para a sustentabilidade do planeta.

O gerenciamento de resíduo sólidos é um conjunto de procedimentos que inclui o planejamento, a implementação e a gestão dos resíduos para proporcionar coleta, armazenamento, tratamento, transporte e destinação adequada. Para que o gerenciamento seja efetivo entre outras atividades é preciso fazer um levantamento sobre a composição gravimétrica, assim podendo aprimorar o planejamento para a melhor solução de destinação.

A composição gravimétrica consiste na categorização dos tipos de materiais coletados. No Brasil, os orgânicos, sobras e perdas de alimentos, madeiras e outros resíduos verdes, são os principais componentes dos resíduos sólidos urbanos, sendo cerca de 45,3% de acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2020 produzido pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2020).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) em 2021 foram produzidos 65,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos, ou seja, aproximadamente 32,8 milhões de toneladas apenas de orgânicos e de acordo com o Panorama da ABRELPE de 2022 têm-se uma fração orgânica de aproximadamente 37,06 milhões de toneladas (ABRELPE, 2022; MDR, 2021). Apenas 32% dos municípios brasileiros constatados na pesquisa possuíam coleta seletiva, e desse total de resíduos produzidos somente 1,75 milhões de toneladas foram coletados para as unidades de triagem e apenas 1,12 milhões de toneladas foram recuperados.

O Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), instrumento instituído na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e de

responsabilidade do Ministério do Meio Ambiente (MMA), define que a destinação ambientalmente adequada dos resíduos inclui a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação energética ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, como a destinação final em aterro sanitário. O SINIR verificou que no ano de 2019, último ano com dados no sistema, 1.807 municípios ainda estariam destinando seus resíduos de forma inadequada e 28% da quantidade total de resíduos sólidos urbanos estariam indo para lixões, atribuindo ainda um Índice de Recuperação de Resíduos (IRR) igual a 1,65 % (SINIR, 2019).

Sendo assim faz-se necessário buscar tecnologias e opções para reaproveitamento dos resíduos sólidos, como é o caso da reciclagem, que trazem benefícios não só para o meio ambiente como também para o indivíduo que as utiliza. Para os orgânicos existem algumas tecnologias de reaproveitamento como compostagem e biodigestão, no entanto 2% dos resíduos sólidos orgânicos possuem uma destinação ambientalmente mais adequada como a compostagem ou a recuperação energética (SINIR, 2019), os outros 48% dos resíduos orgânicos no melhor dos casos tem sua destinação para aterros sanitários.

A recuperação de resíduos proporciona entre outros benefícios uma menor emissão de gases do efeito estufa (GEE), se comparado com seu descarte ou produção de novos materiais extraídos natureza, e uma menor necessidade de exploração de recursos naturais.

A biodigestão consiste na decomposição da matéria orgânica através de atividades anaeróbicas em biodigestores, produzindo biogás e fertilizante. O biogás gerado pelo biodigestor é uma fonte de energia renovável que pode ser usada para a geração de energia elétrica, produção de biocombustível e reaproveitamento para gás de cozinha. O biofertilizante produzido é rica em húmus e nutrientes, um adubo natural que melhora a qualidade do solo.

A compostagem, um fenômeno de fertilização natural do solo já utilizada por antigas civilizações e que tem crescido cada vez mais no Brasil, por ser um procedimento mais simples de degradação da matéria orgânica onde não é necessário consumo de energia e resulta em um composto rico em húmus que pode ser utilizado como fertilizante.

O Restaurante Universitário (RU) da Universidade de Brasília do Campus Darcy Ribeiro é um grande gerador de resíduo solido orgânico, sendo o restaurante com maior fluxo de pessoas por dia em Brasília e produzindo uma quantidade significativa de resíduos, que se gerenciados inadequadamente podem ocasionar problemas ambientais. Atualmente o gerenciamento dos resíduos gerados no RU contam com a segregação dos resíduos,

separando os resíduos orgânicos e recicláveis, a coleta é feita por uma empresa privada que segrega apenas os papelões dos recicláveis e parte dos orgânicos, o restante dos resíduos recicláveis e orgânicos são transportados para o Aterro Sanitário de Brasília (ASB).

Diante do exposto e do panorama atual em que vivemos é necessário avaliar as alternativas tecnológicas para um descarte ambientalmente adequado dos resíduos orgânicos para reduzir os impactos ambientais e suas consequências ao ser humano como as mudanças climáticas e o aquecimento global e o esgotamento de recursos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral comparar as categorias de impacto potencial de aquecimento global e depleção de recursos abióticos no tratamento final dos Resíduos Sólidos Orgânicos do Restaurante Universitário localizado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília pelas alternativas de disposição final em aterro sanitário, compostagem e biodigestão.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial de aquecimento global associado a cada alternativa de tratamento dos resíduos sólidos orgânicos do Restaurante Universitário localizado no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.
- Avaliar o impacto potencial de depleção de recursos abióticos resultante das alternativas de disposição final em aterro sanitário, compostagem e biodigestão dos resíduos sólidos orgânicos do Restaurante Universitário
- Identificar o potencial de mitigação através da geração de subprodutos ou produtos finais úteis para cada método de tratamento.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. HISTÓRICO AMBIENTAL NO MUNDO

Até o século XVIII as populações mundiais eram pequenas e os resíduos e rejeitos gerados eram basicamente de matéria orgânica, ou seja, de fácil absorção, até tal época ainda não havia indústrias, produtos artificiais e substâncias químicas feitas pelo ser humano, estas que demoram às vezes até séculos para se decompor no meio ambiente (PIMENTEL, 2020).

Existe um consenso entre boa parte os historiadores que foi entre os séculos XVIII e XIX, na Revolução Industrial, com o surgimento de indústrias, que começaram a surgir de fato problemas ambientais. Na época os combustíveis industriais eram principalmente madeira e carvão vegetal, que alimentavam maquinários e fornos, assim começou-se a gerar uma grande poluição do ar, por conta da queima desses combustíveis que eliminava principalmente dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, prejudicando a qualidade de vida da população (POTT et al., 2017).

O século XX foi marcado por dois grandes acontecimentos a 1ª e 2ª Guerra Mundial, foi justamente após esses episódios que se iniciou a discussão acerca do tema ambiental, quando aparecem os primeiros organismos internacionais dedicados à proteção da natureza com a criação em 1945 da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) que reuniu o I Congresso que institui a União Internacional para a Proteção da Natureza (1948). A partir daí têm-se o acontecimento de outros eventos importantes na questão ambiental conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Histórico de acontecimentos ambientais ao longo dos anos.

ANO	EVENTO
1962	Publicação do livro “Primavera Silenciosa”
1969	Criação do *National Environmental Policy Act* (NEPA)
1972	Publicação do Relatório Meadows “Limites do Crescimento”
1972	Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano – Conferência de Estocolmo
1975	Introdução de Avaliação de Impactos

ANO	EVENTO
	Ambientais (A.I.A.) em programas de cooperação de organismos internacionais
1987	Protocolo de Montreal sobre as Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio
1989	Publicação do Relatório de Brundtland "O Nosso Futuro Comum"
1992	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – ECO 92
1992	Criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC)
1997	Protocolo de Kyoto sobre Controle da Emissão de Gases do Efeito Estufa na Atmosfera

Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2023.

Boa parte dos acontecimentos mundiais relatados (Tabela 1) abordam a mudança climática, o aquecimento global, como um tema para tratar dos cuidados do meio ambiente, sendo assim uma categoria de impacto de relevância mundial. Outro tema comumente abordado e discutido globalmente é o esgotamento de recursos, nas conferências e nos relatórios sobre desenvolvimento humano e aumento populacional esse tema vêm à tona, como é no caso do Relatório Meadows "Limites do Crescimento", um dos pontos de debate na Conferência de Estocolmo, que é um estudo de simulação entre a interação do homem e o meio ambiente baseando-se no aumento populacional e o esgotamento de recursos naturais (MEADOWS et al., 1972).

Além desses acontecimentos relatados na Tabela 1, outros mais recentes também aconteceram e trouxeram bastante importância para esse tema do meio ambiente e sustentabilidade entre eles a Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015 que elaborou um plano global chamado Agenda 2030, que consiste em uma meta a ser atingida em 2030 que resultará em um mundo mais sustentável e consequentemente melhor para todos os povos e nações. Esse movimento teve a participação de 193 países e estabeleceu 17 objetivos chamados de Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Definição de cada ODS.

ODS	DEFINIÇÃO
1	Erradicação da Pobreza
2	Fome Zero e Agricultura Sustentável
3	Saúde e Bem-estar
4	Educação de Qualidade
5	Igualdade de Gênero
6	Água Potável e Saneamento
7	Energia Acessível e Limpa
8	Trabalho Decente e Crescimento Econômico
9	Indústria, Inovação e Infraestrutura
10	Redução das Desigualdades
11	Cidades e Comunidades Sustentáveis
12	Consumo e Produção Responsáveis
13	Ação contra a Mudança Global do Clima
14	Vida na Água
15	Vida Terrestre
16	Paz, Justiça e Instituições Eficazes
17	Parcerias e Meios de Implementação

3.1.1. Mudança climática, gases do efeito estufa e resíduos sólidos

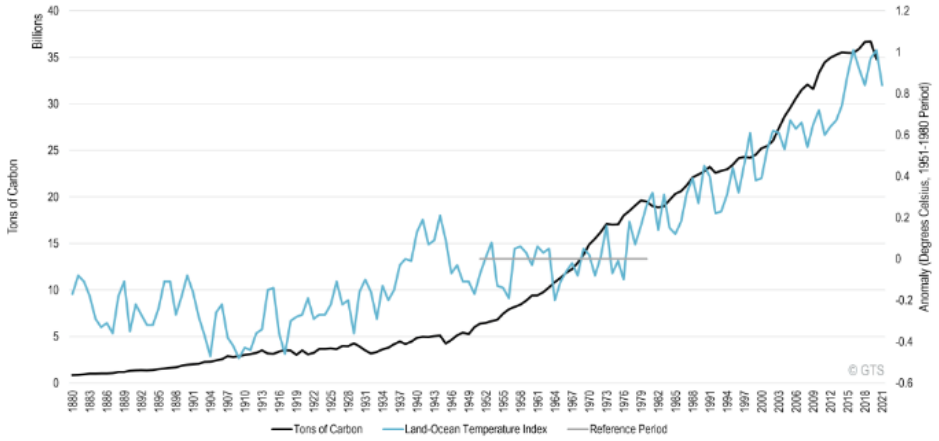
A mudança climática é um impacto discutido globalmente sendo também uma problemática ambiental contemporânea. Em 1988 foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), laureado com o Prêmio Nobel da Paz em 2007, que tem como objetivo fornecer avaliações científicas sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, além de propor planos de adaptação e mitigação (IPCC AR6, 2021).

O aquecimento global começou a ser estudado em 1856 pela cientista estadunidense Eunice Newton Foote que descobriu a relação entre o aumento na concentração de CO_2 e o aumento da temperatura, posteriormente chamado de efeito estufa e retratado a primeira

vez pelo cientista irlandês John Tyndal como uma camada de gases acumulada sobre a superfície da Terra (ECO21, 2020).

Em 1987 Svante Arhenius publicou o primeiro cálculo do aquecimento global das emissões humanas de CO_2, desde então os estudos foram se aprofundando a cerca do tema. Atualmente a relação entre a mudança climática, ou seja, o aquecimento global, e as emissões de dióxido de carbono é comprovada (ECO21, 2020). A Figura 1 apresenta o gráfico comparativo entre emissões de CO2 e o aumento de temperatura no oceano da Climate Central (*Peak CO_2 & Heat-trapping Emissions*, *Climate Centra*, 2022).

Figura 1.Gráfico comparativo entre emissões de CO_2 e aumento de temperatura no oceano.

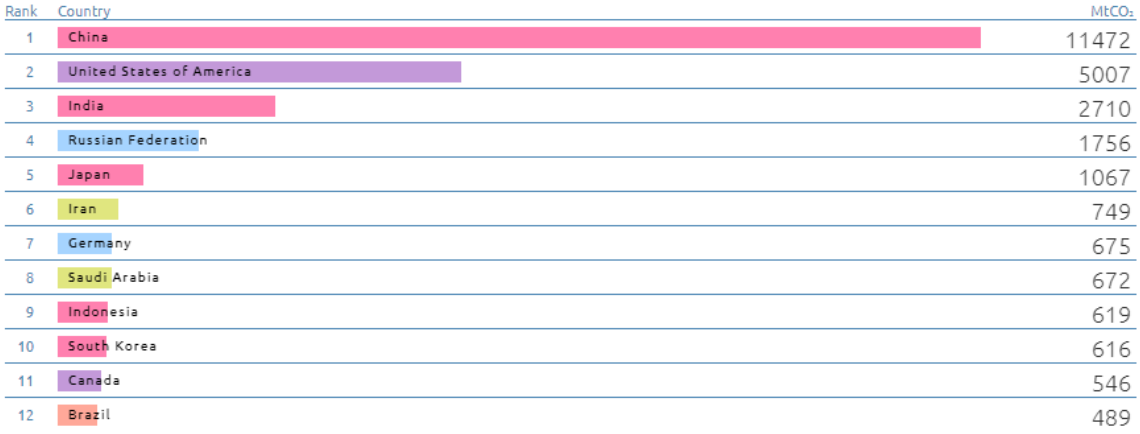


Fonte: Gráfico adaptado da *Climate Central*.

Como é possível observar, de acordo com a Figura 1, o aumento de temperatura oceânica segue a curva de aumento de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) na atmosfera. Com isso é possível concluir que a mudança climática está diretamente relacionada com as emissões de gases do efeito estufa.

Os últimos dados do Global Carbon Atlas, uma comunidade da Global Carbon Project que se baseia na contribuição de pesquisas e trabalhos científicos ao redor do muno, relativos ao ano de 2021 trazem o Brasil como a 12ª nação que mais emite gás carbônico no mundo, como pode ser visto na Figura 2, mas ele já chegou a ocupar a 11ª posição no ano de 2013 (GLOBAL CARBON ATLAS, 2021).

Figura 2. Gráfico de emissões de CO_2 por país.



Rank	Country	$MtCO_2$
1	China	11472
2	United States of America	5007
3	India	2710
4	Russian Federation	1756
5	Japan	1067
6	Iran	749
7	Germany	675
8	Saudi Arabia	672
9	Indonesia	619
10	South Korea	616
11	Canada	546
12	Brazil	489

Fonte: Global Carbon Atlas.

As emissões de GEE relativas ao descarte pós-consumo não possuem grande contribuição para o efeito estufa, no Brasil de acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases do Efeito Estufa (SEEG), uma iniciativa criada pelo Observatório do Clima para compreender as estimativas de emissões de GEE, os resíduos sólidos (apenas o descarte) contribuem em cerca de 4% do total de GEE emitido no país (SEEG, 2021).

O gás metano (CH_4) é um dos principais componentes dos Gases do Efeito Estufa ele é produzido pela decomposição de matéria orgânica. O CH_4 produzido nos aterros e nas águas residuárias são aproximadamente 14% das emissões globais de gás metano (BOGNER et al., 2008).O que torna os aterros uma das principais fontes de emissões de CH_4 antropogênicas no mundo, isso por conta da grande quantidade de resíduos orgânicos que ainda acabam sendo destinadas para aterros, o que mostra a necessidade de obter correções quanto a destinação final desses tipos de resíduos.

3.1.2. Depleção de recursos e resíduos sólidos

A depleção de recursos consiste em uma ideia de que as reservas de um recurso estão sendo muito utilizadas pela atividade humana chegando a um ponto de esgotamento, ou seja, serão encontradas na natureza por pouco tempo, sendo necessária a substituição do recurso em questão.

Uma discussão global importante desde quando publicado “Limites de Crescimento” é a depleção de recursos, ou seja, seu esgotamento. Em seu relatório, Meadows, mostra através de uma projeção realista e um discurso trágico um limite de sobrevivência na Terra de 100 anos seguintes de quando foi elaborada sua pesquisa. O alto consumo, o crescimento demográfico, o crescimento industrial e a deterioração ambiental levarão ao esgotamento

de recursos naturais e essenciais para a vida do ser humano, de acordo com o relatório, a velocidade dos processos industriais, do crescimento populacional e econômico é bem maior quando comparada a velocidade de regeneração da natureza (MEADOWS et al., 1972).

Os recursos podem ser divididos em dois grandes grupos: os bióticos, que são obtidos por meio de componentes com matéria viva dos ecossistemas, tal como a madeira, as bactérias e as algas e são bastante utilizados para a alimentação, medicina e construção; e os abióticos que são os oriundos de uma matéria sem vida, tal como a luz solar, os ventos e as rochas. Esses recursos são utilizados para a confecção de qualquer produto e mais ainda nos industrializados.

Atualmente vive-se uma era de alto consumo e descarte, com produtos de vida útil cada vez menores, sendo o consumismo um dos principais agentes da degradação ambiental (PEREIRA e HORN, 2009). O consumo em excesso leva a uma maior produção e mais atividade industrial o que implica no uso exacerbado de matéria-prima, ou seja, recursos naturais, além de contar com uma maior geração de resíduo, o descarte após o uso. Unindo esses fatores ao fato de o país não possuir um gerenciamento de resíduos efetivo e acabar levando boa parte desses produtos para os aterros sanitários ou até mesmo lixões, acaba sendo é necessário buscar mais matéria-prima na natureza.

Os recursos na natureza estão cada vez mais escassos, portanto é preciso descobrir e implementar métodos e alternativas de reuso dos materiais para que não corra esgotamento. Um método bastante utilizado atualmente é a reciclagem que consiste na reinserção de um produto no seu descarte a linha de produção novamente.

Quando se trata de resíduos a maior parte da geração no Brasil e no mundo são orgânicos, recursos essenciais para a vida e que quando recuperados em tecnologias pós-descarte podem retornar nutrientes importantes de volta ao ciclo natural. São necessárias implementações de alternativas para que os resíduos se tornem recursos, no caso dos orgânicos podendo ser biótico ou abiótico, e seja cada vez menos necessária a exploração de matéria-prima na natureza.

3.1.3. Economia circular

Alinhada a todas as questões de problemática que envolve o meio ambiente e as ações humanas surge a perspectiva da economia circular, que visa reduzir a dependência dos

recursos naturais, minimizar o desperdício e promover a reutilização, reciclagem e recuperação de materiais ao longo do ciclo de vida dos produtos (SILVA *et. al*, 2019).

Existem várias vantagens da economia circular, incluindo a redução dos impactos ambientais, a diminuição da pressão sobre os recursos naturais, a geração de empregos verdes e a promoção da inovação tecnológica. Além disso, a implementação de estratégias circulares pode trazer benefícios econômicos, como a redução de custos de produção, o fortalecimento da competitividade das empresas e a criação de novos mercados e oportunidades de negócio. No entanto, há também barreiras que podem dificultar a transição para uma economia circular como: a falta de conscientização e conhecimento sobre o tema, a resistência às mudanças por parte das empresas e consumidores, a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, e os desafios na coordenação e colaboração entre os diferentes atores da cadeia produtiva (SILVA *et. al*, 2019). A seguir é apresentada a Figura 3, que mostra o ciclo e funcionamento da visão da economia circular.

Figura 3. Funcionamento da economia circular.



Fonte: Green Building Council Brasil, 2019.

A economia circular tem se mostrado uma abordagem promissora para promover a sustentabilidade e a retomada verde em diferentes setores da economia. Ao adotar princípios como reutilização, reciclagem, remanufatura e economia de compartilhamento, a economia circular busca transformar a forma como os produtos são projetados, produzidos, consumidos e descartados. Isso permite o fechamento de ciclos de materiais, onde os resíduos de um processo se tornam insumos para outro, gerando benefícios ambientais, sociais e econômicos. Através da implementação de práticas circulares, empresas podem reduzir sua dependência de recursos virgens, otimizar o uso de recursos existentes e criar cadeias de valor mais sustentáveis (SOARES e SILVA, 2020).

3.2. ASPECTOS LEGAIS ACERCA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

A Constituição Federal Brasileira em seu capítulo VI - Do Meio Ambiente, Artigo 225, estabelece que:

> *"Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações" (BRASIL, 1988, p.36).*

Conforme estabelecido pela Constituição Brasileira nos Artigos 23, inciso VI, e 30, inciso II, os municípios possuem responsabilidade em preservar o meio ambiente, combater a poluição em todas as suas manifestações e complementar as leis federais e estaduais, quando necessário. (BRASIL, 1988).

Além da Constituição Federal, o Brasil conta com uma extensa legislação composta por leis, decretos, portarias, instruções normativas, entre outros instrumentos, que abordam diversas questões ambientais, incluindo o manejo de resíduos sólidos.

No âmbito federal, os principais instrumentos legais relacionados aos resíduos sólidos são a Lei 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a Lei 11.445/2007, que aborda a Política Nacional de Saneamento, e a Lei 11.107/2005, que trata da contratação de consórcios públicos (BRASIL, 2005, 2007, 2010). Os consórcios públicos são fundamentais para a prestação regionalizada dos serviços públicos, conforme estabelecido pela legislação federal de saneamento básico, e são incentivados e priorizados pela política nacional de resíduos sólidos. Esses documentos estão interligados e formam um marco regulatório no país.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos preencheu uma importante lacuna no arcabouço regulatório nacional. Essa iniciativa é o reconhecimento, ainda que tardio, de uma abrangente problemática ambiental que assola o País, problemática de proporções desconhecidas, mas já com diversos episódios registrados em vários pontos do território nacional, e que tem origem exatamente na destinação e disposição inadequadas de resíduos e consequente contaminação no solo, além da dificuldade de identificação dos agentes responsáveis.

A PNRS trouxe diversas evoluções, dentre as principais estão: a criação dos planos nacional, estaduais e municipais de gestão de resíduos sólidos; classificação dos resíduos quanto à origem; a eliminação dos lixões; criação do SINIR; a obrigatoriedade da implantação dos sistemas de logística reversa; responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos, dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e dos titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na logística reversa dos resíduos; a implantação da coleta seletiva bem como a participação de cooperativas e outras formas de associações de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis; proibição da importação de resíduos perigosos e rejeitos.

Os principais documentos legais e normativos de âmbito federal relacionados aos resíduos sólidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Documentos legais e normativos de abrangência nacional relacionados aos resíduos sólidos

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
Port. MINTER nº 53/79	Dispõe sobre o destino e tratamento de resíduos.
Lei 6.938/81	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
CONAMA nº 06/88	Dispõe sobre a geração de resíduos nas atividades industriais.
ABNT NBR 11174/90	Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e III - inertes - Procedimento
Lei 8.666/93	Normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências.

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
ABNT NBR 13463/95	Coleta de resíduos sólidos
Lei 9.605/98	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
CONAMA nº 275/01	Estabelece o código de cores para os diferentes tipos de resíduos, a ser adotado na identificação de coletores e transportadores, bem como nas campanhas informativas para a coleta seletiva.
ABNT NBR 10004/04	Resíduos Sólidos – Classificação
ABNT NBR 10005/04	Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido
ABNT NBR 10006/04	Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos
ABNT NBR 10007/04	Amostragem de Resíduos sólidos
Lei 11.107/05	Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências.
Decreto 5.940/06	Institui a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação as associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis, e dá outras providências.
Lei 11.445/07	Lei Federal de Saneamento Básico - Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
	Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.
Decreto 7.217/10	Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências.
Lei 12.305/10	Política Nacional de Resíduos Sólidos - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências.
ABNT NBR 13221/10	Transporte terrestre de resíduos
Lei 12.375/12	Os estabelecimentos industriais farão jus, até 31 de dezembro de 2014, a crédito presumido do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI na aquisição de resíduos sólidos utilizados como matérias-primas ou produtos intermediários na fabricação de seus produtos.
Decreto 7.619/11	Regulamenta a concessão de crédito resumido do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI na aquisição de resíduos sólidos.
Decreto 7.404/12	Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências.

Fonte: Legislação Federal e Associação Brasileira de Normas Técnicas.

É possível observar os avanços em termos de gerenciamento de resíduos sólidos através da Tabela 3, o que demonstra a preocupação acerca do tema no país.

Mais recente em 2022 foi instituído o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), através do Decreto n° 11.043, se tornando um importante instrumento para conseguir alcançar os objetivos constatados no Plano Nacional dos Resíduos Sólidos e alguns objetivos de desenvolvimento sustentável definidos pela ONU (MMA, 2022). O Planares apresenta diretrizes, estratégias, ações e metas a serem implementadas para aprimorar a gestão de resíduos sólidos no país.

O Planares prevê o encerramento de todos os lixões no Brasil e o aumento na recuperação de resíduos para até 50% em 20 anos. Ou seja, espera-se que em até 20 anos pelo menos metade dos resíduos sólidos deixarão de ser aterrados e terão destinos ambientalmente mais adequados como compostagem, biodigestão, reciclagem e recuperação energética, atualmente 2,01% dos resíduos sólidos urbanos são reciclados de acordo com os dados mais recentes do SNIS (MDR; SNIS, 2021).

Além das leis, no Brasil vem cada vez sendo mais divulgado o conceito "Lixo Zero" que atua de forma alinhada com a economia circular e as legislações ambientais nacionais, promovendo uma abordagem holística e sustentável para a gestão dos resíduos. O movimento Lixo Zero busca reduzir ao máximo a geração de resíduos, reutilizar materiais, reciclar e compostar, evitando o envio de resíduos para aterros sanitários e incineradores (MENDONÇA *et. al*, 2018).

Essa abordagem está em conformidade com os princípios da economia circular, pois busca fechar os ciclos de materiais, mantendo os recursos em uso pelo maior tempo possível e minimizando o desperdício. Ao adotar práticas como a reciclagem, reutilização de produtos e embalagens, compostagem de resíduos orgânicos e a redução do consumo excessivo, o conceito de Lixo Zero contribui para a conservação dos recursos naturais, a redução da poluição e a promoção da sustentabilidade ambiental.

Além disso, o Lixo Zero está alinhado com as legislações ambientais no Brasil, como a PNRS, que estabelece diretrizes para a gestão adequada dos resíduos. O conceito de Lixo Zero complementa essas legislações ao enfatizar a necessidade de evitar a produção desnecessária de resíduos desde a sua concepção, bem como a responsabilidade de todos os atores envolvidos na cadeia de produção e consumo. Dessa forma, o conceito de Lixo Zero atua como uma abordagem integradora, alinhada com os princípios da economia circular e em sintonia com as legislações ambientais no Brasil (MENDONÇA *et. al*, 2018).

3.2.1. Definição de resíduos sólidos e resíduos sólidos orgânicos

Resíduos são os materiais nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades antropogênicas sejam elas de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços ou de varrição. Também são incluídos na definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e esgoto, os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, e outros líquidos que contenham particularidades que tornem o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água inviável, ou que exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (ABNT, 2004) define o resíduo sólido urbano consistente nos lixos: domiciliares, comerciais, industriais, de atividades mineradoras, de drenagens, e outras classificações que competem ao estabelecimento da norma já mencionada. Ou seja, o resíduo sólido é formado por todo o descarte de material em estado sólido advindo das mais diversas atividades humanas ou naturais. Essa definição exclui o resíduo sólido da possibilidade de um reaproveitamento, determinando apenas uma eliminação ou disposição final.

Nesse sentido surge a Lei 12.305/2010 que institui a PNRS, 2010 que define os mesmos como:

> *"qualquer 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."*

E assim diferenciando os conceitos de resíduos e rejeitos que são definidos como:

> *"os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada."*

Os resíduos sólidos podem ainda ser caracterizados de acordo com sua composição gravimétrica, isto é, fazendo um estudo através do volume aproximado, estado físico, constituintes principais, temperatura, etc. (ABNT, 2004).

De acordo com o SNIS e o estudo de composição gravimétrica brasileiro, aproximadamente 45,3% dos resíduos gerados são de origem orgânica, ou seja, resíduos compostos de sobras e perdas de alimentos, madeiras e outros resíduos verdes (MDR, 2021). Este que se caracteriza como resíduo sólido orgânico.

Uma parte significativa dos resíduos sólidos orgânicos nacionais são gerados nas residências. Os resíduos orgânicos têm a grande vantagem de poderem se degradar espontaneamente através dos ciclos de carbono e nitrogênio por exemplo, o que traz uma funcionalidade maior e um gerenciamento mais fácil. Estes resíduos podem ter diferentes destinações, mas usualmente vão para aterros sanitários e algumas destinações ilegais tal como lixões, e sua disposição incorreta pode se tornar um grave problema ambiental.

3.2.2. Gerenciamento de resíduos sólidos no Distrito Federal

A preocupação com a preservação ambiental tem se tornado cada vez mais o ponto principal em debates sobre condutas mais adequadas para minimizar impactos que atividades industriais, comerciais e residenciais podem causar no meio ambiente.

Dentre esses impactos, a geração de resíduos sólidos é a que mais tem causado preocupação, uma vez que praticamente todas as atividades econômicas geram algum tipo de resíduo em suas atividades.

O consumo encontra-se cada vez maior em razão do aumento populacional, poder econômico, revolução tecnológica, entre outros, contribuindo a um incremento na geração e complexidade dos resíduos sólidos com a consequente emissão de poluentes e danos ambientais. Outro fator importante que deve ser levado em conta é que cada resíduo possui uma destinação específica, conforme sua natureza e características, portanto o gerenciamento de resíduos permite um aproveitamento mais eficaz da matéria-prima e uma redução nos impactos ao meio ambiente.

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos tem como principal objetivo minimizar os impactos negativos no meio ambiente consiste em um conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente

adequada dos rejeitos, de acordo com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

O conceito de gestão de resíduos sólidos, previsto na PNRS, abrange atividades mais voltadas à tomada de decisões estratégicas e à organização de setores para fins de otimização e aproveitamento dos resíduos como novos materiais, envolvendo instituições, políticas, instrumentos e meios. E o gerenciamento refere-se aos aspectos tecnológicos e operacionais da questão, isso envolve fatores administrativos, gerenciais, econômicos, ambientai e de desempenho, relacionando-se também à prevenção, redução, segregação, reutilização, acondicionamento, coleta, transporte, tratamento, recuperação energética e destinação final (BRASIL, 2010).

Definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305/2010) A gestão integrada de resíduos sólidos envolve um conjunto de medidas que visam encontrar soluções para os resíduos, levando em consideração aspectos políticos, econômicos, ambientais, culturais e sociais, com participação social e baseado no princípio do desenvolvimento sustentável.

A gestão dos resíduos sólidos urbanos do Distrito Federal é conduzida pelo Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PDGIRS). Esse plano, baseado em um diagnóstico setorial abrangente, estabelece propostas para atender metas relacionadas ao cumprimento dos requisitos legais, à universalização dos serviços e à melhoria da qualidade, levando em consideração as condições técnicas e operacionais. (GDF, 2018).

Os objetivos principais do PDGIRS são estabelecer instrumentos e mecanismos que possibilitem a implementação de ações articuladas, eficientes e sustentáveis no Distrito Federal. Essas ações visam garantir o acesso universal aos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, com qualidade, equidade e continuidade, por meio de metas estabelecidas de forma participativa. Além disso, o plano busca promover a gestão integrada dos resíduos sólidos, seguindo diretrizes que priorizam a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada dos resíduos, mostrada na Figura 4, de acordo com as exigências das normas e legislação vigente (GOVERNO DE BRASÍLIA, 2018).

Figura 4. Prioridade na geração de resíduos sólidos.



Fonte: PDGIRS, 2018.

Assim como a nível nacional houve também uma evolução histórica em termos de legislação a nível distrital, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4. Documentos legais e normativos de abrangência distrital relacionados aos resíduos sólidos.

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
Portaria 39/74	Estabelece diretrizes para a uniformização da capacidade, tamanho e peso dos recipientes utilizados para armazenar e coletar resíduos na região do Distrito Federal.
Lei 41/89	Regula a política ambiental do Distrito Federal e estabelece medidas adicionais.
Lei 56/89	Dispõe sobre normas para a proteção do meio ambiente, nos casos que especifica.
Lei 462/93	Estabelece diretrizes para a prática da reciclagem de resíduos sólidos no Distrito Federal e contempla outras disposições.
Lei 660/94	Concede o status de autarquia ao Serviço Autônomo de Limpeza Urbana - SLU e ao Instituto de Ecologia e Meio Ambiente do Distrito Federal - IEMA/DF, além de estabelecer outras medidas pertinentes.

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
Lei 706/94	Estabelece a nomenclatura e a organização do Serviço Autônomo de Limpeza Urbana - SLU, bem como determina outras medidas a serem adotadas.
Lei 972/95	Regula as ações prejudiciais à limpeza pública e estabelece medidas complementares.
Decreto 17.156/96	Estabelece as regulamentações e normas da Lei 972/1995, com as alterações da Lei 1006/1996, que tratam dos atos prejudiciais à limpeza pública, bem como introduz outras medidas relevantes.
Lei 1.934/98	Institui o Programa de Limpeza do Distrito Federal, com o objetivo de promover ações e medidas específicas voltadas para a limpeza e conservação do ambiente urbano na região.
Lei 1.980/98	Estabelece a criação do Programa de Limpeza Pública Comunitária Comercial, com o propósito de promover ações e iniciativas para a limpeza e conservação do espaço público em áreas comerciais, envolvendo a participação ativa da comunidade local.
Decreto 22.440/01	Institui a criação do Batalhão de Limpeza de Parques Ecológicos e de Usos Múltiplos do Distrito Federal, com o objetivo de promover a preservação e conservação dessas áreas, por meio de ações específicas de limpeza e manutenção, visando garantir a sua qualidade e usufruto adequado pela população.

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
Lei 3.517/04	Regulamenta a implementação da coleta seletiva de lixo nos órgãos e entidades do Poder Público no Distrito Federal, estabelecendo diretrizes e responsabilidades para a separação e destinação adequada dos resíduos.
Decreto 24.813/04	Estabelece a criação de uma unidade orgânica chamada BELACAP no serviço de ajardinamento e limpeza urbana do Distrito Federal.
Lei 3.890/06	Estabelece diretrizes e regulamenta a coleta seletiva de lixo no Distrito Federal.
Decreto 27.898/07	Atribui competência ao Serviço de Limpeza Urbana – SLU e dá outras providências.
Decreto 29.399/08	Estabelece o Plano Diretor de Resíduos Sólidos, visando diretrizes e ações para a gestão adequada dos resíduos sólidos no Distrito Federal.
Lei 4.295/09	Concede ao Poder Executivo do Distrito Federal a autorização para conceder o serviço público de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos, além de tomar outras medidas necessárias.
Lei 4.329/09	Estabelece a proibição da prática de queimar resíduos vegetais e lixo em todo o território do Distrito Federal.
Lei 4.464/10	Estabelece a criação da carreira de fiscalização das atividades de limpeza urbana no Distrito Federal e estabelece medidas complementares.
Lei 4.518/10	Estabelece as diretrizes referentes à denominação, finalidade, competências e

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
	reestruturação administrativa do Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal - SLU/DF, além de dispor sobre outras medidas complementares.
Lei 4.756/11	Estabelece a obrigatoriedade da implementação da coleta seletiva de resíduos nas instituições de ensino públicas e privadas do Distrito Federal.
Decreto 32.922/11	Cria o Comitê Intersetorial para coordenar e monitorar a implementação das ações dos planos de gestão de resíduos sólidos no Distrito Federal e região, além de outras medidas pertinentes.
Decreto 33.445/ 11	Dá aval ao Plano de Intervenção Técnico-Político para a gestão de resíduos sólidos no Distrito Federal.
Lei 4.792/12	Estabelece as regras e diretrizes para a separação e destinação adequada dos resíduos recicláveis gerados pelos órgãos e entidades da Administração Pública direta e indireta do Distrito Federal, definindo os procedimentos necessários para o descarte adequado desses materiais.
Lei 5.275/13	Regula as atividades e competências do órgão responsável pela limpeza urbana no Distrito Federal e estabelece medidas complementares para sua efetivação.
Lei 5.312/14	Estabelece a obrigatoriedade do uso de papel reciclado por parte dos órgãos e entidades do governo no Distrito Federal,
Lei 5.418/14	Regula a gestão dos resíduos sólidos no Distrito Federal através da Política Distrital

LEI/ANO	DESCRIÇÃO
	de Resíduos Sólidos.
Decreto 35.107/ 14	Estabelece diretrizes para o programa "Cidade Limpa" de limpeza urbana e ações relacionadas.
Decreto 35.817/14	Estabelece regras e diretrizes para a implementação da Lei nº 4.792/2012 e outras medidas relacionadas.

Fonte: Câmara Legislativa do Distrito Federal.

Como visto na Tabela 4, a evolução das leis no Distrito Federal (DF) em relação aos resíduos demonstra uma crescente preocupação e ênfase no tratamento adequado desses materiais. Antes da implementação da PNRS em 2010, os resíduos já eram uma pauta importante no DF, no entanto, após sua promulgação houve um impulso significativo para a criação de leis mais específicas e voltadas para o tratamento de cada tipo de resíduo. Novas leis seguem sendo criadas, contudo a pesquisa se limitou ao período de 1974 a 2014.

Essas leis visam garantir uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos, incentivando a redução na geração, a reutilização, a reciclagem e o descarte adequado. Foram estabelecidas leis específicas para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos no caso de grandes geradores, promovendo a compostagem e a valorização desse tipo de material, visando sua transformação em adubo ou energia. Além disso, foram criadas regulamentações para a gestão de resíduos da construção civil, resíduos de saúde, resíduos eletrônicos, entre outros. Essas leis mais específicas direcionam as responsabilidades dos geradores, dos órgãos públicos e das empresas privadas, estabelecendo diretrizes para a coleta, transporte, tratamento e destinação final adequada de cada tipo de resíduo.

Essa evolução legislativa reflete a crescente conscientização sobre a importância de um manejo adequado dos resíduos e a necessidade de reduzir os impactos ambientais associados a eles. Com a implementação de leis mais direcionadas e específicas, o DF busca promover uma cultura de sustentabilidade e responsabilidade compartilhada, envolvendo todos os setores da sociedade na busca por soluções mais eficientes e ambientalmente corretas para o tratamento dos resíduos.

3.3. PRINCIPAIS TRATAMENTOS DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A redução é a prioridade na ordem de geração de resíduos, no entanto é importante destacar que a redução não significa sua eliminação completa. Mesmo com a implementação de medidas para minimizar a produção de resíduos, como ações de educação ambiental e incentivos ao consumo consciente, sempre haverá uma quantidade de resíduos a ser gerenciada. Portanto, é essencial adotar alternativas de tratamento adequadas para garantir a valorização e o correto encaminhamento dos resíduos, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e promovendo a transição para uma economia circular mais sustentável.

Os resíduos orgânicos são de fácil decomposição, processo que ocorre através de bactérias e outros tipos de microrganismos, quando decompostos os nutrientes presentes nos resíduos orgânicos são reinseridos no meio ambiente retornando ao ciclo do carbono e nitrogênio, que é essencial para a vida na Terra. No entanto, se dispostos de maneira incorreta, ou não proveitosa, podem se tornar um grave problema ambiental. Quando os resíduos orgânicos são enviados para aterros sanitários sem o devido tratamento, ocorre um processo de decomposição anaeróbica, no qual a falta de oxigênio favorece a produção de metano, um potente gás de efeito estufa. O metano liberado durante esse processo contribui significativamente para o aquecimento global, agravando os problemas relacionados às mudanças climáticas.

Além disso, a disposição inadequada de resíduos orgânicos em lixões e aterros também pode causar problemas de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Os resíduos orgânicos em decomposição liberam lixiviados, que são líquidos percolados contendo substâncias tóxicas e poluentes. Esses lixiviados podem infiltrar-se no solo e atingir os lençóis freáticos, comprometendo a qualidade da água e representando riscos para a saúde pública e o meio ambiente.

Considerando a coleta no país no ano de 2022, de acordo com o Panorama da ABRELPE, foram gerados aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de RSU, portanto pela média estabelecida no Panorama da ABRELPE de uma década de gestão de resíduos sólidos a fração orgânica corresponde a 37,06 milhões de toneladas de resíduos orgânicos. Desse montante uma pequena percentagem, aproximadamente 2% de acordo com o SINIR, é valorizada em unidades de compostagem o restante segue para aterros sanitários ou são encaminhados de maneira inadequada para aterros controlados e lixões (ABRELPE, 2022).

A Lei n° 12.305/2010 que institui a Política Nacional dos resíduos sólidos configura os aterros controlados e os lixões como forma ilegal e inadequada de disposição final de resíduos sólidos determinando inclusive a desativação dos mesmos (BRASIL, 2010).

A Tabela 5 a seguir apresenta uma análise dos gases do efeito estufa abordados nas referências utilizadas para este estudo, que discute as principais tecnologias de tratamento de resíduos sólidos adotadas no Brasil e ainda a frequência do uso de recuperação energética para cada tipo de estudo.

Tabela 5. GEE citados em cada estudo.

Tratamento	**Estudo**	**GEE citados no estudo**						
		CH_4	**CO_2**	**N_2O**	**CO**	**H_2S**	**SO_2**	**Recup. energética**
Digestão anaeróbica	Bartocci et al., 2020	x	x	x	x	x		x
	Bastian et al., 2013	x	x	x		x		x
	Bernstad et al., 2016	x	x	x				x
	Bogner et al., 2008	x	x	x				x
	Ferreira, 2015	x	x					x
	Dastjerdi, 2021	x	x	x				x
	Di Maria et al., 2016	x	x	x				x
	Dutra, 2018	x	x			x		x
	Hollas et al., 2022	x	x	x				x
	Leme et al., 2014	x	x	x				x
	Lin et al.	x						x
	Nishimura, 2009	x	x					x
	Rossi et al., 2022	x	x	x				x
	Saidur et al., 2010	x	x					x
	Silva et al., 2021	x	x	x				x
	Zhou et al., 2021	x	x					x
Compostagem	Bastian et al., 2013	x	x	x		x		

Tratamento	Estudo	GEE citados no estudo						
		CH_4	CO_2	N_2O	CO	H_2S	SO_2	Recup. energética
	Carvalho et al., 2011	x	x					
	Dastjerdi, 2021	x	x	x				
	Di Maria et al., 2016	x	x	x				
	Ibáñez et al., 2021	x	x	x				
	Lemos et al., 2009	x	x					
	Saidur et al., 2010	x	x					
	Silva, 2018	x	x	x				
	Silva et al., 2021	x	x	x				
Aterro Sanitário	Bastian et al., 2013	x	x	x		x		
	Cherubini et al., 2009	x	x	x				
	Dastjerdi et al., 2021	x	x	x				x
	Di Maria et al., 2016	x	x	x				
	Ibáñez et al., 2021	x	x	x				x
	Silva, 2018	x	x	x				x
	Silva et al., 2021	x	x	x				
Incineração	Cherubini et al., 2009	x	x	x				x
	Di Maria et al., 2016	x	x	x				x
	Jabeen et al.,2022	x	x	x	x			x
	Leme et al., 2014	x	x	x				x
	Merrild et al., 2012	x	x	x			X	x
	Queiroz et al., 2007		x	x	x		x	
	Saidur et al., 2010	x	x					x
	Silva, 2018	x	x	x				

Entre os gases estudados, o metano, o dióxido de carbono e o óxido nitroso são os mais frequentemente mencionados nos trabalhos consultados. A recuperação energética é um tema abordado em todos os estudos relacionados à digestão anaeróbica, em alguns que tratam de aterros sanitários e em quase todos que se referem à incineração. Enquanto as pesquisas sobre digestão anaeróbica e compostagem concentram-se no tratamento de resíduos orgânicos, os estudos sobre aterros sanitários e incineração abrangem todos os tipos de resíduos. No caso dessas últimas formas de tratamento, os trabalhos que incluem a recuperação energética apresentam eficiências menores do que aquelas obtidas na digestão anaeróbica.

Atualmente o aterro sanitário é a principal forma de destinação final ambientalmente adequada no Brasil, contudo a disposição de resíduos orgânicos reduz a vida útil do aterro, aumentam as emissões de gases do efeito estufa, já que a degradação dos resíduos orgânicos é uma das principais fontes de emissão de metano, e aumenta os custos com a manutenção dessas unidades, pela necessidade do tratamento do lixiviado gerado pelos orgânicos, os aterros sanitários são a terceira maior fonte antropogénica mundial de metano (HUMER e LECHNER, 1999; ROSE, MAHLER e IZZO, 2012) Logo um tratamento mais adequado para os resíduos orgânicos pode além de melhorar as condições do aterro, reduzir as emissões de gases do efeito estufa e contribuir no combate às mudanças climáticas, além de também diminuir a poluição no solo e nas águas superficiais e subterrâneas, ocasionadas muitas vezes pelo chorume em lixões, e reduzir a proliferação de doenças e vetores.

A incineração de resíduos sólidos é uma alternativa utilizada para a destinação final de resíduos que consiste na queima controlada dos mesmos em alta temperatura, geralmente acima de 850°C. O processo de incineração é realizado em um equipamento denominado incinerador, que pode ser de diferentes tipos, tamanhos e capacidades, dependendo do volume e das características dos resíduos a serem tratados (CHERNICHARO, 2013).

Um incinerador é composto por diversos equipamentos, como sistemas de alimentação dos resíduos, que podem ser realizados manualmente ou por meio de esteiras transportadoras; sistemas de combustão, compostos por queimadores e chaminés; sistemas de controle de emissão de poluentes, como filtros de manga, precipitadores eletrostáticos, entre outros; e sistemas de resfriamento dos gases de combustão, compostos por trocadores de calor e torres de resfriamento (OLIVEIRA, 2010). Os benefícios da incineração de resíduos sólidos incluem a redução do volume dos resíduos, a eliminação de patógenos e o controle

de odores. Além disso, a incineração pode gerar energia elétrica a partir da queima dos gases de combustão (MMA, 2023).

No entanto, existem alguns malefícios associados ao uso de resíduos orgânicos na incineração, se comparado com outras tecnologias como compostagem e digestão anaeróbica, tais como:

- Geração de poluentes atmosféricos: Durante o processo de incineração de resíduos orgânicos, são emitidos gases como dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis e partículas finas. Esses poluentes podem causar problemas respiratórios, além de contribuir para o efeito estufa e o aquecimento global;
- Redução da matéria orgânica no solo: A incineração de resíduos orgânicos também pode prejudicar a fertilidade do solo, já que os nutrientes presentes nesses resíduos são perdidos durante o processo. Isso pode afetar negativamente a produção agrícola e a biodiversidade local;
- Desperdício de energia: A incineração de resíduos orgânicos é um processo que consome muita energia, principalmente na fase de pré-aquecimento do forno. Isso pode ser considerado um desperdício de energia, especialmente quando comparado com outras formas de tratamento de resíduos, como a compostagem (QUEIROZ *et. al*, 2007).

A incineração segue sendo uma opção menos impactante e ambientalmente mais adequada que o aterro sanitário. Contudo existem opções de tratamento e destinação de resíduos orgânicos com quantidade ainda menores de emissões de GEE e depleção de recursos, sendo elas principais alternativas estabelecidas pelo Planares: a compostagem e a digestão anaeróbia para geração de biometano.

Este capítulo abordará a definição e o funcionamento de três alternativas de destino final de resíduos sólidos orgânicos: o aterro sanitário, o mais utilizado no Brasil, a compostagem e a digestão anaeróbia (biodigestores), principais opções para os orgânicos definidas pelo Planares.

3.3.1. Aterro Sanitário

A ABNT (ABNT, 1992), na norma de apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, define o aterro sanitário como uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, de maneira que não cause danos à saúde pública nem a

sua segurança, o método também minimiza os impactos ambientais por utilizar princípios de engenharia para confinar os resíduos na menor área possível e reduzir seu volume permissível até o menor possível, cobrindo-os com uma camada de terra em intervalos.

O aterro sanitário possui uma série de elementos de projeto que estão também previstos na norma NBR 8419/92 sendo eles: sistema de drenagem superficial, sistema de drenagem de remoção de percolado, camada impermeabilizadora superior e inferior a disposição de resíduos, sistema de drenagem de gás e sistema de tratamento do percolado. Ainda é necessário também que o aterro seja construído com uma série de barreiras impermeáveis e que tenha monitoramento ambiental e geotécnico (ABNT, 1992).

O aterro é constituído por uma base com sistema de drenagem que se encontra em cima de uma camada impermeável de material sintético e de solo compactado, para evitar a contaminação das águas subterrâneas, onde são depositados os resíduos, seguido por uma cobertura de argila e terra que também devem contar com sistema de drenagem, no interior do aterro está o sistema de drenagem de gases. Quando construídos contam com um limite de quantidade de resíduos a ser depositado o que dá a eles uma vida útil, e mesmo depois de encerradas as operações, quando a vida útil é alcançada, gases e chorumes continuam sendo produzidos por aproximadamente 15 anos.

A decomposição da matéria orgânica presente no aterro leva a uma produção significativa de chorume e gás metano, que quando não tratados contaminam o meio ambiente. O Brasil possui 669 unidades de aterro sanitário de acordo com os dados mais recentes de 2021 do SNIS, até 2017 apenas 364 aterros possuíam sistema de drenagem e apenas 335 faziam tratamento adequado de chorume (SANTOS et al., 2019). Essa tecnologia de disposição deveria ser utilizada apenas para os resíduos gerados que não podem ser reaproveitados, no entanto, são atualmente a principal destinação dos resíduos sólidos urbanos no país.

Em Brasília o aterro sanitário está em funcionamento desde 2017, projetado para abrigar os resíduos do Distrito Federal como uma alternativa ao Lixão da Estrutural que iniciou no mesmo ano sua desativação gradativa conforme determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) (“Aterro sanitário de Brasília começa a funcionar”, 2017).

As técnicas utilizadas no aterro asseguram proteção ao meio ambiente e correto tratamento dos resíduos. São exemplos a impermeabilização do solo, o sistema de drenagem e a compactação diária, que reduzem o volume do lixo e evitam a contaminação de áreas vizinhas e a proliferação de animais, como roedores e urubus (DUTRA, 2022). O aterro

também estava previsto para receber apenas rejeitos, o material restante depois do reaproveitamento — método que minimiza impactos ambientais e que está previsto na PNRS (JABEEN et al., 2022).

O ASB foi projetado com uma vida útil de 13 anos no ano em que iniciou suas operações (2017). Em março de 2022 ele já contava com quase 40 % de sua capacidade total ocupada, o que diminui bastante seu tempo operacional. Ainda de acordo com uma pesquisa gravimétrica, coordenada pelo Serviço de Limpeza Urbana (SLU), pelo menos 500 toneladas de resíduos recicláveis acabam chegando ao aterro diariamente (DUTRA, 2022).

O SLU promove a coleta seletiva através de parcerias com coorporativas no Distrito Federal e centros de triagem. Nesses locais ocorrem a separação apenas de recicláveis, ou seja, todo resíduo orgânico que acaba nas competências do SLU termina sua vida no ASB, o que diminui a vida útil do aterro e agride o meio ambiente de maneira mais severa do que outras alternativas de destinação.

3.3.2. Compostagem

Ainda na agricultura antiga foi observada a existência de um fenômeno natural de fertilização do solo, a compostagem consiste em um processo de degradação de matéria orgânica, onde resíduos como folhagens, serragens ou outros orgânicos servem de alimento para o desenvolvimento de fungos, formigas, minhocas e outras formas de vida gerando húmus que é capaz de devolver os nutrientes para a terra onde são usados pelas plantas (MMA, 2017).

A compostagem é um processo de degradação de resíduos orgânicos feita de forma controlada sob condições aeróbias, com a presença de oxigênio, que transforma resíduos orgânicos em um fertilizante natural, rico em nutrientes e benéfico para o solo. A compostagem pode ser feita em escala doméstica ou industrial, e envolve a decomposição dos resíduos por micro-organismos, como bactérias e fungos. Todo processo deve ser adequadamente conduzido para que seja gerado um produto de boa qualidade sendo necessária reproduzir condições ideais de umidade, oxigênio e de nutrientes, principalmente de carbono e nitrogênio que são a base para o processo (LEMOS, 2009).

A mecânica da compostagem envolve a criação de condições ideais para a atividade microbiana, como a manutenção da umidade e da temperatura adequadas, além da aeração do material. O processo pode ser acelerado com a adição de materiais ricos em carbono,

como folhas secas e papelão (SMA, 2017). O processo de compostagem a céu aberto é o mais comum utilizado e pode ser dividido em duas principais fases sendo elas a fase ativa ou de bioestabilização, onde ocorre o aumento nas populações de microrganismos (bactérias e fungos), e a fase de maturação ou cura, onde a matéria já oxidada sofre um processo de humificação e forma um produto, denominado húmus, que é rico em nutrientes e funciona como um fertilizante natural para o solo (HERBETS et al., 2005).

A matéria orgânica adicionada a compostagem é seca, apresentando baixo teor de umidade, esses resíduos apresentam o nitrogênio como elemento limitante e carbono em excesso, obtendo uma relação C/N superior a 3:1 (HERBETS et al., 2005). Para produzir uma tonelada de RSO por dia, é necessário utilizar 350 quilos de poda (SILVA, 2018)

Os benefícios da compostagem são diversos, tanto para o meio ambiente quanto para a economia. Dentre eles, podemos citar:

- Redução da quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários: A compostagem permite que resíduos orgânicos sejam tratados de forma sustentável, sem a necessidade de serem descartados em aterros sanitários;
- Produção de um fertilizante natural: O composto resultante da compostagem pode ser utilizado como adubo para plantas e hortas, substituindo fertilizantes químicos;
- Redução do impacto ambiental: A compostagem é uma alternativa mais sustentável do que a incineração de resíduos orgânicos, que pode gerar poluentes atmosféricos e contribuir para o efeito estufa;
- Economia de recursos: A compostagem pode reduzir os custos de transporte e disposição de resíduos orgânicos, além de ser uma fonte de fertilizante natural gratuito (LIMA, 2014).

3.3.3. Biodigestão

A digestão anaeróbia pode ser definida como um processo natural que ocorre em ambientes com ausência de oxigênio, nele diversos microrganismos são responsáveis pela degradação de matéria orgânica. O principal subproduto desse processo é o biogás, constituído principalmente por gás metano e gás carbônico. Para a conversão da matéria orgânica, quatro etapas são fundamentais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (DUTRA, 2018).

A hidrólise é a etapa em que ocorre uma transformação dos polímeros complexos em compostos de menor complexidade. Isso ocorre devido a ação enzimática, fazendo com que a disponibilidade de alimento para os microrganismos aumente.

A segunda etapa, acidogênese, é onde ocorre a degradação dos compostos de menor complexidade advindos da transformação anterior transformando-os em compostos ainda mais simples como ácidos graxos, álcoois, ácido lático e compostos inorgânicos.

A acetogênese, terceira etapa, consiste na oxidação dos compostos formados na etapa anterior excretando acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, substratos fundamentais para o desenvolvimento do principal grupo de bactérias na biodigestão.

As bactérias metanogênicas são o principal grupo de microrganismos da biodigestão e dão origem ao nome da quarta e última etapa a metanogênese. É nela que os compostos inorgânicos são convertidos em biogás, através das bactérias, e por isso a importância fundamental no processo. Essa transformação ocorre em duas fases: a primeira é a metabólica, onde as bactérias metanogênicas acetoclásticas produzem gás metano e dióxido de carbono a partir do acetato; a segunda é a metabolização do dióxido de carbono e hidrogênio que dão origem ao gás metano feito pelas bactérias metanogênicas hidrogenótróficas.

O biogás gerado nesse processo é geralmente incolor, inodoro e constituído principalmente de metano. É uma ótima fonte de energia alternativa, não por possuir um alto potencial gerador, mas por diminuir impactos ambientais quando queimado para gerar energia, visto que o gás metano é extremamente nocivo ao meio ambiente.

As digestões anaeróbicas podem ser categorizadas de acordo com o percentual de sólidos totais do sistema. As tecnologias utilizadas em longa escala atualmente consistem principalmente de dois tipos de técnicas de fluxo contínuo a úmida e a seca, sendo os biodigestores úmidos (*Wet Anaerobic Digestion* - WAD) também chamados de biodigestores de baixo teor de sólidos e os biodigestores secos (*High Solid Anaerobic Digestion* - HSAD) também chamados de biodigestores de alto teor de sólidos (DI MARIA; SISANI, 2017).

Os sistemas WAD operam com um percentual menor que 10% de sólidos totais, são tecnologias de tratamento de digestão anaeróbicas mais tradicionais. Para conteúdos com mais do que essa percentagem de sólidos totais é necessário adicionar água ao processo. Nesse sistema o biodigestor deve ser alimentado com uma quantidade considerável de energia devido ao seu tamanho. O equipamento é mais úmido e não necessita de um

sistema de bombeamento sofisticado. Esse sistema possui mais estudos e já tem se mostrado eficaz quanto ao tratamento de resíduos gerados em estações de tratamento de esgoto e resíduos de alimentos.

Os biodigestores úmidos apresentam uma ótima eficiência na produção de biogás e de biofertilizante líquido, no entanto o líquido gerado antes de ser disposto na natureza deve passar por uma drenagem para que seja tratado e sanitizado. Eles também se mostram ideais para substratos hidrofílicos e operam com uma alta quantidade de resíduos.

Os sistemas HSAD possuem o teor de sólidos totais maior que 20%, são um tipo de tecnologia emergente que tem sido cada vez mais estudada e implementada para tratamento de resíduos agrícolas e urbanos. Essa tecnologia já vem sendo utilizada principalmente na Europa passando por investigações e melhorias técnicas seguindo tendências globais, no entanto existem poucos projetos no Brasil que implementam esse equipamento obtendo poucas informações sobre as possíveis vantagens ou desvantagens em comparação ao outro método tradicional WAD.

O HSAD não necessita da adição de água no processo, o que é uma grande vantagem dessa tecnologia por gastar menos água no processo ele ainda pode tratar até 28 vezes mais resíduos do que o WAD em um mesmo tempo (SILVA-MARTÍNEZ et al., 2023). Por possuir uma alta fração de sólidos o biofertilizante resultante do processo não é líquido e evita também a necessidade de um sistema de drenagem para aumentar a qualidade do produto. O sistema também tolera até 10% de impurezas ou resíduos inertes o que é um fator relevante no Brasil já que o país conta com um resíduo heterogêneo com alto conteúdo de impureza.

Os biodigestores secos apresentam menor produção de biogás, mas não necessitam também de muita energia para realização do processo por possuírem menor volume, eles possuem baixa dispersão e uma alta absorção da matéria orgânica. Os substratos para seu funcionamento ideal são hidrofóbicos e ele consegue se manter estável com uma menor quantidade de resíduos.

O Brasil já conta com alguns estudos e implementações de HSAD entre eles a plataforma de metanização implementada em 2016 no Restaurante Universitário da Universidade Federal de Minas Gerais, conhecido popularmente como bandejão, chamada de pMethar. Os resultados preliminares da plataforma estão reunidos no projeto Desenvolvimento de sistema integrado para tratamento de resíduos orgânicos e aproveitamento energético e agrícola dos subprodutos gerados, de autoria dos estudantes de Engenharia Ambiental

Catarina Azevedo Borges e Augusto de Assis Temponi Cabral Dias (CHENICHARRO e TEMPONI e AZEVEDO, 2016).

De acordo com o professor Carlos Augusto Lemos Chernicharo, do Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFMG e responsável pelo projeto da primeira unidade de biometanização da América Latina na cidade do Rio de Janeiro, o gás produzido na plataforma de metanização durante a degradação de 250 toneladas de resíduo produz uma quantidade de energia capaz de abastecer mil automóveis ou suprir o consumo de 1650 residências por mês (CHENICHARRO e TEMPONI e AZEVEDO, 2016).

A tecnologia em questão é composta por uma câmara vedada, onde não há contato com oxigênio, nela os resíduos são banhados por um líquido que acelera sua decomposição e ficam confinados por 30 dias. A decomposição ocorre sem o uso de água e por isso também é chamada de metanização extrasseca. Após decomposto o produto gerado é um biogás resultante da ação metabólica que escapa por uma cavidade no topo da câmera e é armazenado numa espécie de balão lacrado, para que não escape gases ou odores.

O gás produzido na planta pode ser utilizado para: alimentar um motor acoplado a um gerador de eletricidade, substituindo o óleo a diesel ou a gasolina, além da eletricidade gerada suprir a demanda da unidade ela pode ser também injetada na rede elétrica ou vendida para a concessionária local; gerar energia térmica que pode ser aproveitada, de acordo com o professor Chernicharo quando o motor queima o biogás para gerar eletricidade produz calor que é transformado em energia térmica para secagem dos resíduos que foi digerido; abastecimento de caminhões que transportarão o resíduo, sendo nesse caso necessária a purificação do gás .

Ainda o resíduo digerido após a secagem produz um biossólido que pode ser utilizado como adubo, tanto na agricultura como na recuperação de áreas degradadas pela mineração.

Essa tecnologia já é conhecida na Alemanha no tratamento de lixo orgânico, chamada de *garage*, e pode ser adaptada as condições brasileiras de temperatura, características de resíduos e possibilidade de aproveitamento energético. Apesar de alguns equipamentos terem de ser importados, toda a engenharia construtiva, de processo e controle e os materiais utilizados na Plataforma de metanização foram desenvolvidos e fabricados no Brasil, a Figura 5 apresenta o modelo da plataforma.

Figura 5. Plataforma de metanização do campus Pampulha da UFMG.



Fonte: Biblioteca digital da UFMG.

3.4. ANÁLISE DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATRAVÉS DO CICLO DE VIDA

A gestão de resíduos acessível e eficiente também é um pilar de desenvolvimento sustentável, levando benefícios a saúde pública, segurança e meio ambiente através da redução de impactos ambientais, tais como as emissões de GEE e a exploração de recursos. O gerenciamento de resíduos que considera as consequências ambientais e sociais melhora a qualidade de vida, promove saúde pública, previne contaminação da água e do solo, conserva recursos naturais e fornece benefícios a energia renovável (CHERUBINI; BARGIGLI; ULGIATI, 2009).

Neste sentido a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida pode ser utilizada como contribuição para uma decisão sobre a escolha de sistemas de gestão de resíduos, fornecendo uma visão geral dos aspectos ambientais de um sistema de gerenciamento de resíduo e assim comparar alternativas através dos impactos ambientais potenciais causados em cada uma delas.

Os estudos acerca do gerenciamento de resíduos sólidos com uso de ACV vem crescido nos últimos anos, a Tabela 6 e a Tabela 7 mostram o aumento de pesquisas mundiais e nacionais de acordo com um levantamento feito na plataforma do ScienceDirect que possuem ligação entre o método ACV e o gerenciamento de resíduos dentro de dois períodos de 12 anos.

Tabela 6. Aumento de pesquisas relacionando ACV e gerenciamento de resíduos a nível mundial.

Período	Quantidade de pesquisas
1998 - 2010	2.115
2010 - 2022	16.168

Fonte: ScienceDirect.

Tabela 7. Aumento de pesquisas relacionando ACV e gerenciamento de resíduos a nível nacional.

Período	Quantidade de pesquisas
1998 - 2010	24
2010 - 2022	651

Fonte: ScienceDirect.

Em 2010 ocorreu a instituição da PNRS e a partir de então o país tem mostrado um avanço em pesquisas acerca do tema de gestão de resíduos.

Os novos sistemas de gerenciamento de resíduos se caracterizam pela prevenção, redução e mitigação de diferentes tipos de impactos ambientais diretos, contudo dificilmente os impactos indiretos conseguem ser retratados nos estudos. Os impactos diretos estão ligados a gestão dos resíduos relacionadas as etapas da coleta, transporte, tratamento e pós-tratamento; os impactos indiretos ocorrem em segundo plano, são processos relacionados a linha de produção principal que também demandam insumos.

Dessa forma a ACV pode contribuir com a modelagem e os cálculos relacionados aos impactos indiretos e as compensações que podem ser feitas em um sistema, considerando não apenas o processo principal como também os intermediários.

3.5. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que mede os impactos ambientais de um produto ou serviço em todas as fases do seu ciclo de vida, do "berço ao túmulo". Isso inclui desde a extração de matérias-primas até a produção, distribuição, uso, descarte e até mesmo a reciclagem e reuso, quando aplicáveis. A ACV é uma abordagem sistêmica que permite analisar de forma abrangente os possíveis impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto ou serviço (IBICT, 2019).

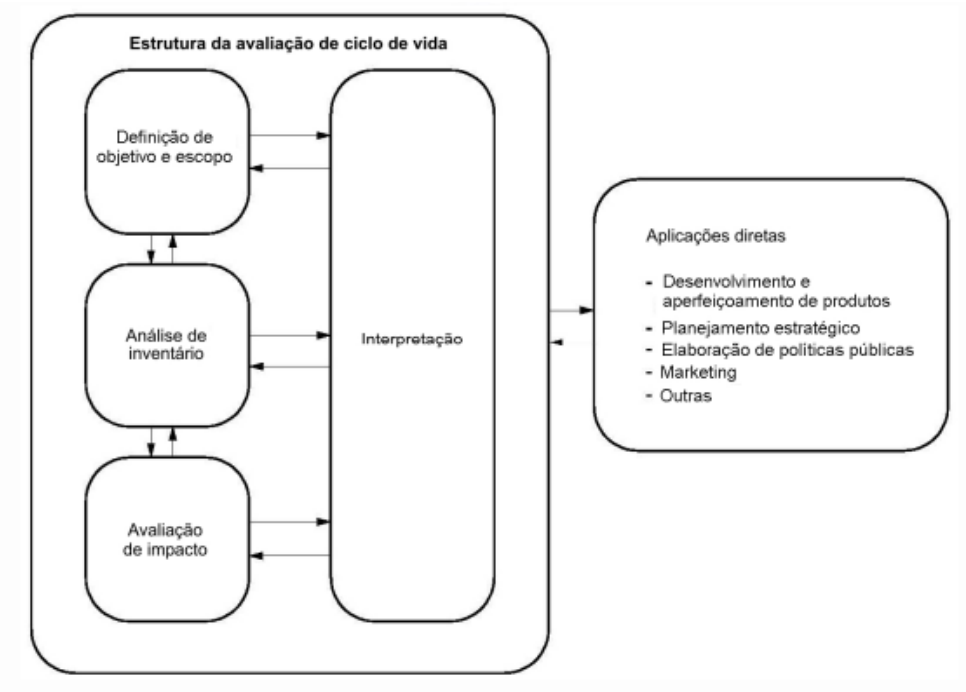
A ISO 14040 (ABNT NBR ISO 14040) (ABNT, 2014) define ACV como uma técnica em desenvolvimento com o objetivo de melhor compreender e lidar com impactos ambientais associados a um produto, lidando não apenas com os aspectos ambientais, mas também

com os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, ou seja: aquisição da matéria-prima, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final.

Existem ainda variantes de estudos de ACV podendo ele também ser do berço ao portão, abrangendo os estudos de impactos do momento da aquisição da matéria prima até o uso, ou do portão ao túmulo, ou seja, após o uso até a disposição final. Em todo caso a ACV busca entender os fluxos de matéria e energia envolvidos na produção de um material compreendendo quais os danos e benefícios da sua fabricação e do seu uso quantificando os prováveis impactos ambientais no seu ciclo de vida, o que permite identificar os pontos críticos e promover melhorias nos processos produtivos.

A ISO 14040 descreve também os princípios e a estrutura de uma ACV, sendo ela um estudo composto por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e por fim interpretação de resultados, como exibido na Figura 6.

Figura 6. Estrutura da avaliação do ciclo de vida.



Fonte: ABNT NBR ISSO 14040/2009.

3.5.1. Definição de objetivo e escopo

A norma ISSO 14040 (ABNT, 2014) declara que os objetivos dos estudos ACV devem compor a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo e se há

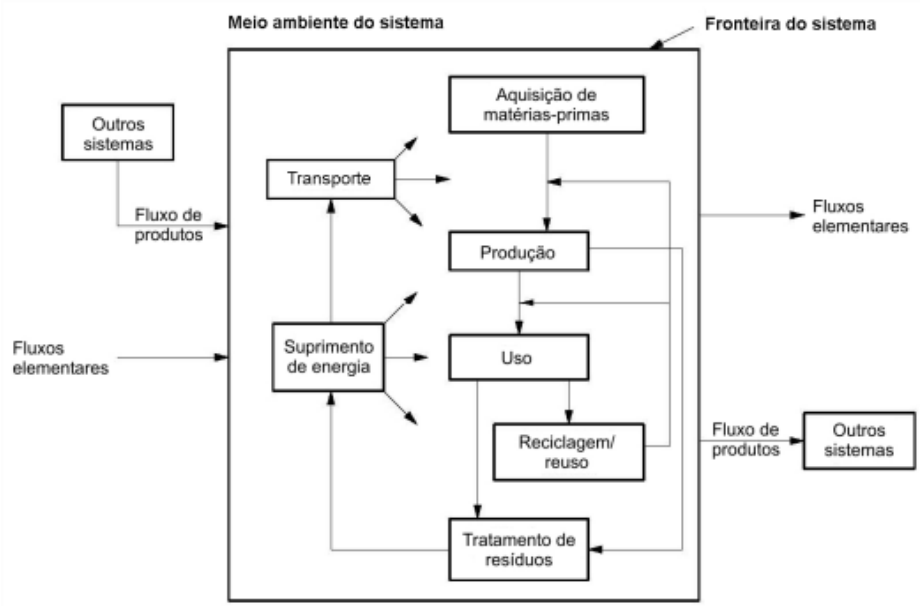
intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

O escopo dos estudos deve compor o sistema a ser estudado, as funções ou os estudos comparativos do sistema de produto, a unidade funcional, a fronteira do sistema, os procedimentos de alocação, as categorias de impacto selecionadas, metodologia para avaliação de impactos, os requisitos de dados, os pressupostos, as limitações, os requisitos iniciais, tipo de análise crítica e o formato do relatório requerido para o estudo (ABNT, 2014).

Para um estudo efetivo o escopo deve compor um fluxograma com todas as informações requeridas para essa fase, que deve delimitar os processos e representá-los baseado em uma mesma unidade funcional. As fronteiras do sistema definem os limites da análise de estudo, os processos elementares a serem incluídos no sistema e os elementos chave do sistema físico.

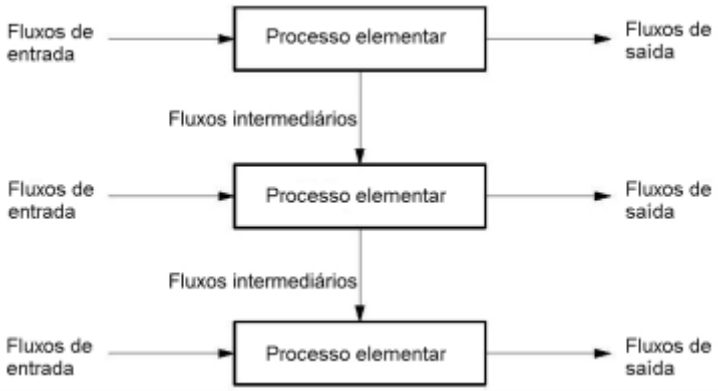
A elaboração do fluxograma deve levar em consideração os diversos estágios do ciclo de vida do sistema escolhido, para isso é necessário que apresente: aquisição de matérias-primas, entradas e saídas na cadeira principal de processamento, distribuição e transporte, produção e uso energia, uso de produtos, resíduos de processos, recuperação de produtos usados, manufatura de materiais auxiliares, uso de equipamentos e outras operações adicionais. A Figura 7 a seguir exemplifica o fluxograma de um sistema de produção ACV e a Figura 8 demonstra de maneira geral a ideia do conjunto de processos elementares e fluxos intermediários de um sistema.

Figura 7. Fluxograma para sistema de produto em um ACV.



Fonte: ABNT NBR ISO 1404:2009.

Figura 8. Fluxograma de conjunto de processos elementares dentro de um sistema de produto.



Fonte: ABNT NBR ISO 1404:2009.

A unidade funcional que também é definida na fase de definição de escopo e objetivo, descreve a função de um produto, o processo ou o material de que é feito, e deve ser escolhida com base no fluxograma de referência e de acordo com o objetivo final.

Os estudos de ACV são comumente utilizados para comparação de cenários e tecnologias, sendo assim os resultados comparativos só são válidos quando o sistema utiliza uma mesma unidade funcional. Por isso para estudos comparativos é crucial que as tecnologias ou os processos estejam compreensíveis e a unidade funcional esteja bem definida.

A Tabela 8 demonstra unidades funcionais utilizadas, através de um levantamento bibliográfico, em pesquisas que envolvem o tema de resíduos sólidos e resíduos sólidos orgânicos e a utilização da avaliação do ciclo de vida para seu gerenciamento.

Tabela 8. Unidades funcionais e categorias de impactos utilizadas em pesquisas.

Pesquisa	**Ano**	**Categoria**	**Unidade Funcional**
(BARTOCCI et al., 2020)	2020	Mudança climática	1 kWh de energia produzida
(DASTJERDI et al., 2021)	2021	Depleção de ozônio	2.023.876 t de RSU
(ZHOU et al., 2021)	2021	Mudança climática, eutrofização, potencial de oxidação e acidificação	1 t de sólidos voláteis
(ACCORSI et al., 2022)	2022	Aquecimento global	Comida distribuída em um palete cheio
(SULIS et al., 2021)	2021	Aquecimento global	1 t de comida
(BERNSTAD SARAIVA	2015	Aquecimento global	1 t de RSU

Pesquisa	Ano	Categoria	Unidade Funcional
SCHOTT; CÁNOVAS, 2015)			
(BERNSTAD SARAIVA; DAVIDSSON; BISSMONT, 2016)	2016	Aquecimento global	1 t de sólidos totais
(LIN et al., 2021)	2021	Aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção de água e demanda de energia	1 kg de mandioca
(KJERSTADIUS et al., 2017)	2017	Aquecimento global	1 palete preenchido com resíduos orgânicos
(QUINTERO-HERRERA et al., 2021)	2021	Emissão de GEE	1 kg de proteína do leite
(HOLLAS et al., 2022)	2022	Aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, eutrofização e ecotoxicação	1 t de resíduos sólidos
(LEME et al., 2014)	2014	Depleção de recursos abióticos, aquecimento global, depleção de ozônio, intoxicação humana, acidificação e eutrofização	1 t de RSU
(SILVA *et. al*, 2021)	2021	Aquecimento global e depleção de recursos abióticos	1 Mg-1 de RSU

Fonte: ScienceDirect.

3.5.2. Análise de inventário

Esta etapa envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculos que serão utilizados para atribuir valores numéricos as entras e saídas de um sistema de produto. Essa é uma fase interativa do estudo de ACV, onde à medida que mais dados são coletados o conhecimento acerca do sistema escolhido se amplia e a partir de então novos dados, requisitos ou limitações podem ser identificadas.

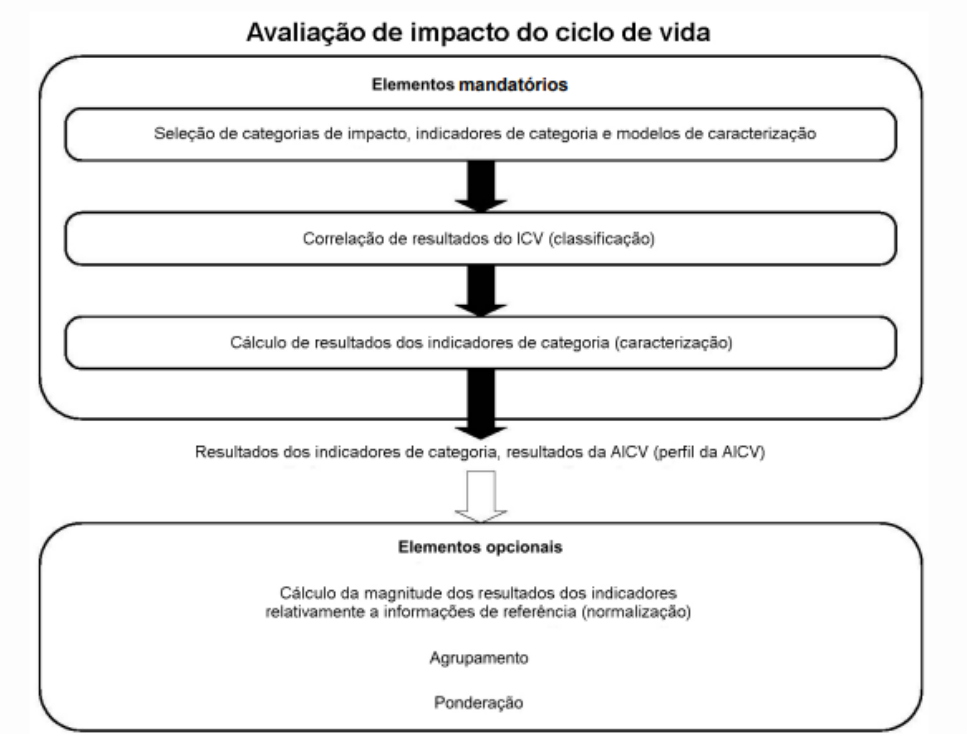
Os dados consistem nos elementos de entrada e saída estabelecidos dentro do processo que podem ser: uso de energia, matéria prima, produtos, geração de resíduos, emissões atmosféricas, descargas em água e outros. Após coletada as informações necessárias acerca dos dados de entrada e saída são feitos procedimentos de cálculos, a validação dos dados coletados, a correlação entre eles e os processos elementares bem como a correlação com a unidade funcional, são feitos para obter resultados do inventário do sistema (ABNT, 2014).

3.5.3. Avaliação de impactos

A avaliação de impactos projeta a significância dos impactos ambientais potenciais utilizando os resultados da fase anterior de análise de inventário, associando dados com categorias de impacto específicas definidas previamente no escopo e indicadores de categoria para uma melhor compreensão das suas consequências (ABNT, 2014).

Essa fase do processo inclui uma iteração de análise crítica do objetivo e escopo de estudo ACV, dessa forma é possível determinar se os objetivos finais foram atingidos e caso não sejam é necessário modificar as definições da estrutura. A norma ainda define os elementos mandatórios para essa fase do processo que estão apresentados na Figura 9.

Figura 9. Elementos da fase de Avaliação de Impactos.



Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2009.

3.5.4. Interpretação de resultados

A última fase é onde as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto, devendo fornecer resultados que sejam consistentes com o objetivo e escopo definidos e que levem a conclusões que explicitem limitações do sistema e proveja recomendações (ABNT, 2014).

Vale ressaltar que a interpretação dos estudos de ACV são baseados em uma abordagem relativa, o que resulta apenas na indicação de efeitos ambientais potenciais, sendo assim essa fase não prevê os reais impactos sobre o sistema por não abordar as categorias não definidas e calcular uma aproximação.

Por fim essa fase é a formadora de conclusões e recomendações onde há o fornecimento de uma apresentação prontamente compreensível, completa e consistente dos resultados da avaliação baseado nas três fases anteriores.

3.5.5. Softwares, base de dados e inventário

OpenLCA é o software de avaliação de ciclo de vida de código aberto mais utilizado mundialmente. Pelo programa ser livre e de código aberto, ele é preferivelmente utilizado devido à maior praticidade de uso.

O CML-IA baseline (2000) é uma base de dados de método de AICV que vem sendo bastante utilizado em pesquisas atuais sobre o gerenciamento de resíduos sólidos, a Tabela 9 demonstra alguns exemplos de estudos acerca do tema que utilizaram esse mesmo método nos últimos dois anos.

Tabela 9. Pesquisa e método utilizado nos anos de 2021-2022.

Pesquisa	**Ano**	**Método AICV**
(H; S, 2022)	2022	CML, TRACI
(LA ROSA et al., 2021)	2021	CML
(IBÁÑEZ-FORÉS et al., 2021)	2021	CML
(MULYA et al., 2022)	2022	CML, ReCiPe
(ERKISI-ARICI et al., 2021)	2021	CML
(ROSSI et al., 2022)	2022	CML

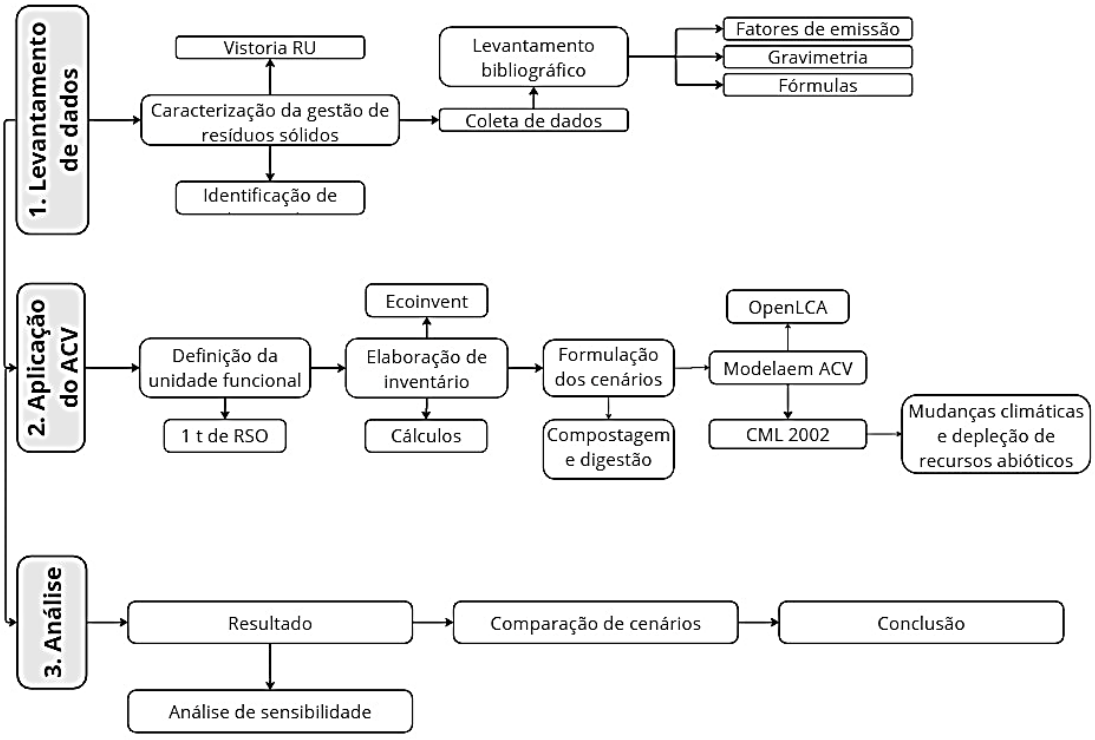
Fonte: ScienceDirect.

A Ecoinvent é uma base de dados de inventário que apoia o uso de dados ambientais e mantém um portal de transparência e uma melhor distribuição de dados de ACV. Além disso a Ecoinvent atua em conjunto com formuladores de políticas, empresas privadas, organizações não governamentais (ONGs) e uma ampla comunidade acadêmica ao redor do mundo, o que faz com que sua base de dados seja alimentada por diversas publicações e assim completa.

4. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa utilizada para realizar a avaliação de impacto ambiental através das emissões de GEE e da depleção de recursos abióticos das alternativas escolhidas de gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) no RU da UnB. A Figura 10 apresenta um diagrama explicativo referente as três etapas metodológicas do processo.

Figura 10. Fluxograma metodológico da pesquisa.



A fim de explorar as principais alternativas ao aterro sanitário para o gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos do RU, foram estabelecidos três cenários por meio de uma pesquisa bibliográfica. Esses cenários foram selecionados com base nas diretrizes estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) como as principais opções para esse tipo de resíduo. São eles:

Cenário 1: cenário atual com destinação para o Aterro Sanitário de Brasília.

Cenário 2: cenário alternativo com destinação dos resíduos para a composteira da prefeitura da UnB, para produção de biofertilizante.

Cenário 3: cenário alternativo com destinação dos resíduos para uma plataforma de metanização, localizada hipoteticamente onde atualmente se condiciona os resíduos do restaurante, para geração de energia através do gás metano.

Os cenários de compostagem e digestão anaeróbica foram escolhidos por representarem alternativas relevantes e alinhadas às diretrizes do Planares para o gerenciamento adequado de resíduos sólidos orgânicos. A análise realizada considerou o ciclo de vida, o potencial de aquecimento global (GWP) e a depleção de recursos abióticos dos resíduos orgânicos gerados no Restaurante Universitário, considerando-os compostos puramente por matéria orgânica.

A partir da fundamentação teórica, foi proposto um método contextualmente viável para aplicação da avaliação do ciclo de vida na presente pesquisa que tem como objetivo avaliar a melhor opção de destinação dos resíduos orgânicos gerados no Restaurante Universitário, contudo ela não engloba o dimensionamento e os estudos locacionais para os casos de cenário de compostagem e da digestão anaeróbia, apenas contabiliza os impactos gerados pelo transporte dos resíduos até seus possíveis destinos

Para o atual trabalho foram utilizados dados de estudos anteriores trazem informações sobre o gerenciamento dos resíduos orgânicos no RU, com dados sobre sua geração, qualidade e seu potencial para a produção de biogás através do uso da digestão anaeróbia e um comparativo dos impactos ambientais entre o atual sistema de destinação dos resíduos sólidos orgânicos, tratamento e disposição final em aterro sanitário, do RU e um cenário alternativo com uso de compostagem como tratamento final desses resíduos através da ACV utilizando a categoria de impacto Potencial de Aquecimento Global em 100 anos (DUTRA, 2018; SILVA, 2019).

O projeto atual além de utilizar o potencial de produção de biogás e as análises comparativas com o cenário da compostagem, realiza um estudo de ACV acerca do tratamento da biodigestão, e um estudo ACV com os 3 cenários utilizando novas categorias de impacto sendo elas: mudanças climáticas e depleção de recursos abióticos.

O presente trabalho utilizou uma metodologia estruturada para analisar a geração de resíduos sólidos orgânicos no Restaurante Universitário (RU) da Universidade de Brasília. Os dados foram coletados por meio de visitas técnicas e informações adquiridas tanto no RU quanto por meio da empresa contratada para o gerenciamento dos resíduos.

Para a obtenção de dados do projeto foram realizadas duas consultas ao RU. A primeira teve como objetivo realizar uma vistoria técnica e acompanhar a geração de resíduos. A segunda foi para adquirir informações detalhadas sobre a coleta e obter dados específicos sobre a geração de resíduos. Durante a vistoria técnica, foram realizadas observações

detalhadas das atividades no RU, a fim de compreender o fluxo de resíduos e identificar aspectos relevantes para a análise.

Além das visitas técnicas, foram utilizados levantamentos bibliográficos para obter informações e dados sobre pesquisas anteriores (DUTRA, 2018; SILVA 2019) que tiveram o RU como objeto de estudo. Os dados gravimétricos foram obtidos a partir de pesquisas anteriores e foram comparados com os dados fornecidos pela empresa de coleta de resíduos. Essa comparação foi realizada para validar a equivalência dos dados e determinar se era possível utilizar os mesmos valores na análise.

Em seguida, todas as etapas da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foram realizadas. O objetivo e escopo do estudo foram definidos, seguidos pela análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação e discussão dos resultados obtidos. Ao seguir essa metodologia, foi possível obter uma análise abrangente e detalhada da geração de resíduos sólidos orgânicos no RU da Universidade de Brasília, considerando todas as etapas do ciclo de vida desses resíduos. Isso proporcionou uma compreensão mais completa dos impactos ambientais associados a essa atividade e permitiu a identificação de possíveis melhorias nos processos de gestão de resíduos.

4.1. APLICAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Para realizar a análise do ciclo de vida dos três cenários estabelecidos (tratamento e disposição final em aterro sanitário, compostagem e digestão anaeróbica), foram seguidos os passos estabelecidos na norma ISO 14040. Para a quantificação dos impactos foi utilizado o software OpenLCA. O método escolhido para o estudo de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) para converter os dados do inventário em impactos potenciais quantificados foi o CML-IA baseline 2000, entre as vantagens de se utilizar o CML a principal é que ele conta com as categorias de impacto ambientais definidas nesse trabalho, mudanças climáticas e depleção de recursos abióticos, não sendo necessário qualquer tipo de combinação com outro método. A ACV é conduzida utilizando inventários da base de dados da Ecoinvent 3.6 *Cutoff*, que se encontra disponível para uso da UnB, em uma versão acadêmica, adaptadas aos valores do Brasil.

A Tabela 10 mostra as categorias AICV do método CML-IA baseline, que foram selecionadas para o projeto.

Tabela 10. Categorias AICV e suas unidades.

Categoria	Unidade

Categoria	Unidade
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	MJ
Potencial de aquecimento global	Kg de CO_2eq

Para a realização do estudo comparativo foi necessário compor um fluxograma para cada um dos sistemas de tratamento: aterro sanitário, compostagem e biodigestão; com as entradas e saídas do sistema delimitando os processos e representando todos os seus potenciais impactos.

A definição de escopo compreendeu as atividades necessárias para gerir os Resíduos Sólidos a partir do momento em que são enviados para a coleta até o destino de tratamento. Portanto, as etapas analisadas no presente trabalho consistem na geração, transporte, armazenamento, tratamento e destinação final. Sendo essas mesmas etapas a própria delimitação do sistema. A unidade funcional é um elemento central de uma ACV, para que seja possível estabelecer uma comparação significativa e válida, ela deve designar e quantificar os aspectos qualitativos e quantitativos.

A forma mais útil se unidade funcional em sistemas comparativos é adotar uma quantidade de medida, por exemplo, a massa em kg do produto, os trabalhos relacionados a resíduos sólidos tendem a dotar, como visto na Tabela 8 a unidade de 1 tonelada. Nesse sentido cada cenário foi avaliado em relação ao tratamento de resíduo sólido orgânico, com uma unidade funcional de 1 tonelada desse resíduo, sendo criado um fluxo para ela. Para fornecer os dados de entrada e de saída necessários nos processos, foram utilizadas as quantidades obtidas nos cálculos realizados de acordo com as equações do item 4.2, juntamente com os dados disponíveis na base de dados Ecoinvent. Esses dados permitem uma avaliação mais precisa dos impactos ambientais e da eficiência dos diferentes cenários de tratamento de resíduos orgânicos.

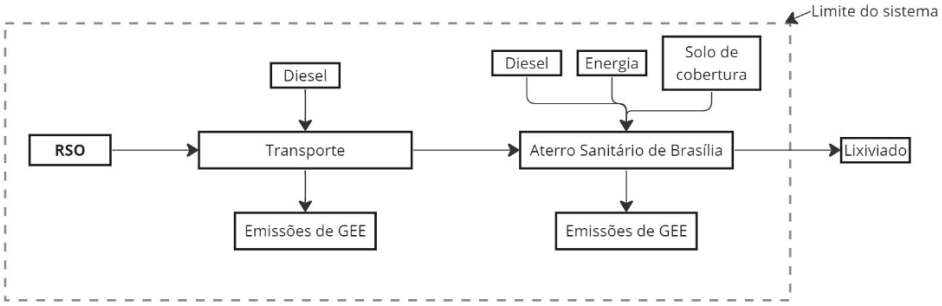
Foram feitos cálculos da emissão de gases do efeito estufa com dados literários e cálculos com uso do software e da base de dados da Ecoinvent, esses resultados também foram comparados entre si. Para o cálculo com dados literários foi feito um único processo de entrada e saída, com todos os insumos necessários como entrada e as emissões relativas a seu uso como saída, neste trabalho foram contabilizadas apenas as emissões de CH_4, CO_2 e N_2O, como visto na tabela 5 são os gases que aparecem de maneira mais frequente nos estudos.

Para calcular a quantificação dos impactos com uso do software foram elaborados processos específicos para cada tipo de tratamento, contendo as unidades de entrada e de saída necessárias para o tratamento do resíduo. Essas unidades de entrada e de saída foram estabelecidas com base nas informações presentes nas imagens 1, 2 e 3 sobra cada processo específico. Além disso, foram criados outros processos para a elaboração dos cenários, nos quais as entradas foram os produtos dos processos de tratamento criados anteriormente, considerando cada tipo de tratamento. As saídas desses processos foram relacionadas ao tipo de tratamento em questão.

As emissões provenientes do uso do diesel e da eletricidade foram contabilizadas pelo uso da base de dados dos provedores da Ecoinvent, por isso não se fez necessária sua contabilização nos processos elaborados dentro do software.

O ASB é o atual destino da maioria dos resíduos orgânicos gerados no RU para avaliar os impactos relacionados a essa forma de tratamento final um fluxograma foi montando baseando-se nos dados de entrada e de saída do sistema, já delimitado, desde o momento do transporte ao momento da disposição dos resíduos e está apresentado na Figura 11.

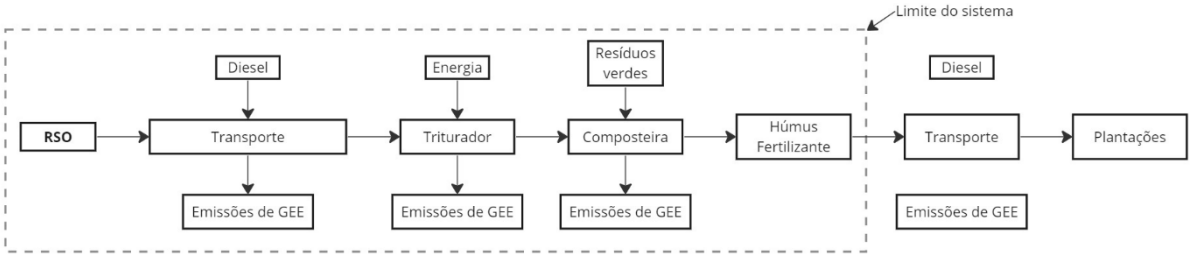
Figura 11. Fluxograma e limites do sistema no cenário 1.



O sistema é alimentado por resíduos sólidos orgânicos (RSO) e combustível diesel, que abastece o caminhão responsável por transportar os resíduos até o aterro. No aterro, os resíduos são dispostos e cobertos com solo de cobertura. Todo esse processo resulta na emissão de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (NO_2), que são liberados na atmosfera por meio de várias vias. Além disso, há a formação de lixiviado, que requer outro tratamento, mas esse tratamento não está incluído nos limites desse sistema.

A Universidade de Brasília conta com uma área de compostagem ao ar livre, para esse sistema será avaliado o uso dos resíduos sólidos orgânicos do RU na composteira da própria UnB que se localiza no prédio da prefeitura. Com isso o sistema ficou delimitado segundo o fluxograma representado na Figura 12.

Figura 12. Fluxograma e limites do sistema no cenário 2.

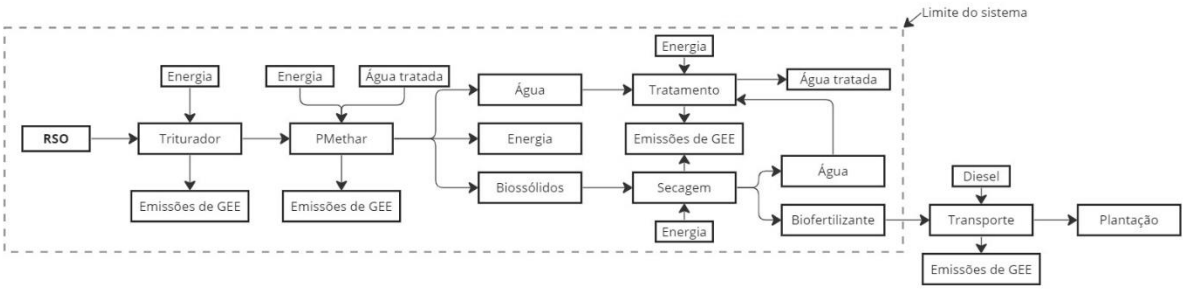


O processo de tratamento da compostagem envolve o transporte dos resíduos orgânicos do restaurante universitário até a prefeitura, onde são registrados os dados de combustível e a quantidade de resíduos sólidos orgânicos (RSO). Na prefeitura, os resíduos passam por uma etapa de trituração que requer energia antes de serem alocados na composteira. Uma vez dispostos na composteira, não é necessário equipamento elétrico de aeração para revirar as pilhas regularmente, visto que o método de compostagem utilizado é a céu aberto com pilhas baixas e boa oxigenação. Os produtos finais desse sistema de compostagem são o húmus, que possui propriedades fertilizantes, e que pode ser utilizado como fertilizante. Durante todo o processo, ocorre a liberação de gases de efeito estufa (GEE) em diferentes etapas. O fertilizante resultante pode ser utilizado nas plantações, porém, esse estágio não está abrangido pelos limites desse sistema de tratamento de compostagem.

A localização mais adequada para a plataforma juntamente com o triturador, levando em consideração que a escolha do modelo desse digestor anaeróbico é o seco e sua área necessária é menor do que o úmido, é o próprio local onde atualmente acontece o armazenamento dos resíduos para a coleta diária, se encontra na parte detrás do restaurante longe do fluxo de pessoas e sem atrapalhar o tráfego de veículos.

Essa localização não necessita do uso de veículos para transportar os resíduos sendo eles locomovidos pelos próprios funcionários da empresa através de lixeiras e contêiners de plástico com rodinhas. O fluxograma que delimita o sistema está representado na Figura 13.

Figura 13. Fluxograma e limites do sistema no cenário 3.



Esse sistema envolve a entrada de resíduos sólidos orgânicos (RSO) que são direcionados para a etapa de trituração, demandando energia. Após a trituração, os resíduos são encaminhados para a digestão anaeróbica, especificamente no caso da pMethar, onde é necessária energia para iniciar o biodigestor. Esse processo resulta em três produtos: biossólidos, que podem ser transformados em biofertilizante após tratamento adequado; água residuária, que pode passar por tratamento e ser reutilizada; e geração de energia. Durante esses processos, ocorre a emissão de gases de efeito estufa.

Ao final, o biofertilizante gerado pode ser utilizado em plantações. É importante ressaltar que esse estágio de utilização em plantações não está incluído nos limites do sistema definido.

4.2. DETERMINAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA

A determinação da quantidade equivalente de gases do efeito estufa a serem emitidos será feita de duas maneiras complementares: a primeira conta com o uso de cálculos da literatura e a segunda com o uso da base de dados e de inventários de ACV já elaboradas no ecoinvent.

A determinação de emissão total de GEE de um sistema se faz através da equação 1, uma fórmula geral (BASTIAN et al., 2013).

$$GHG_t = GHG_w + GHG_f - GHG_a$$

Equação 1

Onde:

GHG_t são as emissões em valor líquido de GEE;

GHG_w são as emissões de GEE relativas ao resíduo;

GHG_f são as emissões de GEE relativas ao combustível;

GHG_a são as emissões de GEE evitadas no sistema escolhido.

4.2.1. Transporte através de veículos

Para a determinação das emissões de gases relativas ao transporte dos resíduos orgânicos através de veículos utiliza-se a equação 2 (SILVA; PINEDA; GOMES, 2018).

$$E_i = \beta_i * C_{total} * 10^{-3} * GWP_i$$

Equação 2

Onde:

E_i é a emissão do poluente i (t de CO_{2eq}/ano);

β_i é o fator de emissão específica do poluente i (kg/L de diesel);

C_{total} é o consumo total de diesel em cada cenário (L/ano);

GWP_i é o potencial de aquecimento global do poluente i.

A equação 3 define o cálculo para o consumo total de diesel em um sistema.

$$C_{transporte} = f * P * D$$

Equação 3

Onde:

$C_{transporte}$ é o consumo total de diesel no transporte (L/ano);

f é o fator de consumo de combustível do veículo transportador dos resíduos (L/t.km);

P é o total de RSO coletados (t/ano);

D é a distância entre o ponto de partida e o de destino (km).

4.2.2. Energia elétrica

A estimação dos gases de efeito estufa, expressos em quantidade de CO_2eq, liberados para a atmosfera por meio da produção de energia elétrica foi realizada com base no fator de emissão definido pelo método da análise de despacho do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) do Governo Federal (MCTIC, 2017) através da equação 4.

$$E_e = e * C_{eletricidade}$$

Equação 4

Onde:

E_e é a emissão de CO_2 devido à produção de energia elétrica para o SIN (t de CO_2/ano);

e é o fator de emissão específico da produção de energia elétrica (t de CO_2/kWh);

$C_{eletricidade}$ é o consumo total de energia elétrica em cada cenário avaliado (kWh/ano).

O consumo total de energia elétrica é definido pela equação 5 que servirá de dado de entrada para a equação 4.

$$Celetricidade = \sum_{unidade} f_{ce} * P_t$$

Equação 5

Onde:

$Celetricidade$ é o consumo total de energia elétrica em cada cenário de gerenciamento (kWh/ano);

f_{ce} é o consumo específico de eletricidade em cada unidade avaliada (kWh/t);

P_t é o quantitativo de resíduos gerenciados na unidade (t/ano).

4.2.3. Aterro Sanitário

O cálculo de emissões de gás metano no aterro sanitário é feita através da aplicação de uma fórmula para a estimativa de quantidade de metano gerado. É utilizado o modelo de predição de Primeira Ordem de Decaimento (IPCC, 2006) para avaliar as emissões de biogás no aterro, a fim de obter valores conservadores de geração e também considerar as variáveis adicionais específicas da área de estudo, como a quantidade e composição de RSD aterrados, taxas de precipitação e temperatura. O modelo é baseado na Equação 6, que estima as emissões anuais de biogás durante o período de tempo de 100 anos, estabelecido pelo IPCC.

$$Emissões_{ch4} = \varphi * (1 - f) * GWP_{ch4} * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * CODf * FCM$$
$$* \sum_{x=i}^{y} \sum_{j} W_{xj} * COD * e^{-k_j(y-x)} * (1 - e^{-k_j})$$

Equação 6

Onde:

$Emissões_{ch4}$ é a emissão de metano (t CO_{2eq}/ano);

φ é o fator de correção para contabilizar as incertezas do modelo;

f é a fração de CH_4 capturada e queimada;

GWP_{ch4} é o potencial de aquecimento global do CH_4;

OX é o fator de oxidação;

F é a fração em volume de CH_4 gerado no biogás (%).

$CODf$ é a fração de COD dissociada (%);

FCM é o potencial de produção de CH_4;

W é a quantidade de resíduo depositados – RSD (t);

COD é a fração de carbono orgânico degradável (%);

k_j é a constante de decaimento do metano (ano^{-1}).

$$CODf = 0{,}014 * T + 0{,}28$$

Equação 7

T é a temperatura em que ocorre a digestão anaeróbia (°C).

4.2.4. Compostagem

Para os cálculos das emissões na compostagem são considerados o consumo de eletricidade e a produção de CH_4 e protóxido de nitrogênio (N_2O) por biodegradação. Os resíduos orgânicos no atual projeto são tratados como um único grupo e tipo. O IPCC estabeleceu uma equação geral para calcular as emissões de CH_4 e N_2O provenientes do tratamento biológico de resíduos, seja ele compostagem ou digestão anaeróbia. Esses cálculos levam em consideração a quantidade de matéria orgânica compostada, o fator de emissão do tratamento de compostagem e a quantidade de gás recuperada, conforme mostrado nas equações 8 e 9 (IPCC, 2006):

$$Emissões_{CH4} = (M_i * EF_i * 10^{-3} - R) * GWP_{CH_4}$$

Equação 8

Onde:

$Emissões_{CH4}$ é o total de emissões de CH_4 (t de CO_{2eq});

M_i é a quantidade de resíduos do utilizada no tratamento tipo i (t);

EF_i é o fator de emissão no tratamento tipo i (g de CH_4/kg de RSO);

i é o tipo de tratamento, compostagem ou digestão anaeróbica;

R é o total recuperado de CH_4 (t)

GWP_{CH_4} é o potencial de aquecimento global do CH_4.

$$Emissões_{N_2O} = (M_i * EF_i * 10^{-3}) * GWP_{N_2O}$$

Equação 9

Onde:

$Emissões_{N_2O}$ é o total de emissões de N_2O (t de CO_{2eq});

M_i é a quantidade de resíduos do utilizada no tratamento tipo i (t);

EF_i é o fator de emissão no tratamento tipo i (g de N_2O/kg de RSO);

i é o tipo de tratamento, compostagem ou digestão anaeróbica

GWP_{N_2O} é o potencial de aquecimento global do N_2O.

O triturador utilizado na composteira da UnB é o modelo Triturador Elétrico TRE25 Saída Lateral 2Hp Biv Tramontina. Ele possui capacidade de triturar até 910 kg de resíduos orgânicos em uma hora com potência de 1,5 kW.

Para avaliar a equivalência do produto resultante da compostagem com o fertilizante é utilizada a relação de nitrogênio presente no composto, 26,9 g/kg de resíduo sólido orgânico (EMBRAPA, 2010). Ainda, as emissões de GEE do produto final, o húmus fertilizante, são contabilizadas como emissões evitadas na fórmula geral. (BASTIAN et al., 2013) O valor dessas emissões em comparação com a produção de fertilizante químico está entre -22,4 a -46,1 kg de CO_2eq/t de RSO para os casos de composteiras fechadas alimentadas com resíduos orgânicos provenientes de restos alimentares e -22,6 a -41 kg de CO_2eq/t de RSO para os casos de composteira a céu aberto alimentada com resíduos verdes (BOLDRIN et al., 2009).

4.2.5. Digestão Anaeróbica

Nesse tratamento assume-se que o biogás gerado no processo é utilizado para recuperação energética e ainda utilizado para alimentar a própria necessidade energética do sistema e o funcionamento do RU. Para tanto será utilizada a mesma forma de tratamento adotada no Restaurante Universitário da UFMG, a plataforma de metanização, Belo Horizonte e Brasília possuem algumas semelhanças como o clima e a produção de resíduos orgânicos em suas universidades federais.

Para esse estudo não são considerados os tipos diferentes de resíduos sólidos orgânicos no sistema. O cálculo das emissões de CH_4 e N_2O é o mesmo mostrado nas equações 8 e 9 de tratamento biológico, utilizando o fator de emissão para o tratamento de digestão anaeróbica, que 10% do metano produzido é liberado na atmosfera (TAUBER et al., 2019) mas esse valor já está implícito no cálculo estabelecido pelo IPCC.

A eletricidade consumida na fase do processo da digestão anaeróbica relativa ao uso do triturador elétrico será o mesmo assumido para a compostagem. Já a determinação da necessidade de energia da plataforma de metanização foi calculada com base na potência nominal dos equipamentos utilizados na pMethar e na duração do tempo em que são utilizados (FERREIRA, 2015). Para este trabalho será adotado o consumo médio de energia da plataforma, 0,52 kWh/t, o valor é referente ao uso de energia por tonelada de resíduo, utilizando como referência a capacidade total da plataforma e a densidade aparente média de resíduos sólidos orgânicos (FERREIRA, 2015; SILVA, 2010).

Pela escolha do modelo da pMethar, e por ele ser um sistema de digestão anaeróbica seco não há necessidade de adição de água durante o processo, já que o teor de sólidos totais de restos de alimentos, resíduos de cozinhas, de cantinas, de feiras ou de alimentos não

apropriados para o consumo, está entre 15-20%, o que já é uma porcentagem aceita para o funcionamento da plataforma. Por isso esses restos de alimentos são ideais para tratamento no digestor, devido aos seus altos teores de gorduras, carboidratos e proteínas, bem como por sua alta umidade (PROBIOGÁS, 2015).

O percentual de conversão de biogás em energia elétrica pode variar dependendo do tipo de tecnologia utilizada na conversão e das condições operacionais. Em geral, as turbinas a gás têm uma eficiência média de conversão de biogás em eletricidade de cerca de 30% a 40%. Já os motores de combustão interna, que são mais comuns em pequenas instalações de biogás, podem ter uma eficiência de conversão um pouco menor, geralmente em torno de 25% a 35% (IRENA, 2018).

O CH_4 gerado no processo é utilizado para recuperação energética, para tanto será assumida uma eficiência de conversão igual a 25%, a menor eficiência possível obtida em um motor de combustão interno para pequenas instalações, que é o caso do biodigestor seco a ser utilizado. A estimativa da energia gerada através do biogás é dada em função do poder calorífico inferior do metano, equivalente a 8.500 kcal/m³ de CH_4 ou 9,97 kWh/m³ de CH_4 (SATHIANATHAN, 1975). O rendimento de produção de metano na plataforma varia de acordo com o tipo de substrato que está sendo depositado que pode ser consultado na Tabela 11 a seguir (FERREIRA; CHERNICHARO, 2015).

Tabela 11. Caracterização dos rendimentos de produção de metano em função do uso de diferentes substratos.

Substrato	**Rendimento mínimo metano (m^3 CH_4/tSV)**
Resíduo alimentar	245
Resíduo de frutas e vegetais	342
Resíduo de cozinha	370
Óleo animal	776
Óleo vegetal	811
Palha de milho	234
Palha de arroz	195
Palha de trigo	227
Beterraba	231
Cereais	290
Polpa de batata	358

Substrato	Rendimento mínimo metano (m^3 CH_4/tSV)
Água residual da batata	825
Melaço	261
Cenoura	241
Cevada	222
Bagaço da maçã	446
Bagaço da uva	432
Bagaço da banana	243
Bagaço da laranja	297

Fonte: Ferreira. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás, 2015.

Para calcular a recuperação energética será utilizada a equação a seguir, baseada nos princípios da proporcionalidade:

$$Geração_{el} = fp_{CH_4} * SV * PCI_{CH_4} * e$$

Equação 10

Onde:

$Geração_{el}$ é a geração de energia elétrica (kWh/ano);

fp_{CH_4} é o fator de produção de CH_4 (m^3 de CH_4/tSV);

SV é a quantidade de sólidos voláteis dos resíduos sólidos depositados (t);

PCI_{CH_4} é o poder calorífico inferior de CH_4 (kWh/m^3 de CH_4);

e é a eficiência de conversão do biogás em eletricidade (%).

A eficiência de conversão de biogás em eletricidade é geralmente maior do que a eficiência de incineração de resíduos porque o processo de incineração envolve a queima de materiais orgânicos em altas temperaturas para gerar calor, que é então utilizado para gerar eletricidade. No entanto, o processo de incineração resulta em perdas significativas de energia térmica devido à emissão de gases quentes para a atmosfera. Além disso, a incineração pode resultar na liberação de substâncias tóxicas no meio ambiente (IEA, 2019).

Por outro lado, o processo de produção de biogás envolve a digestão anaeróbica de resíduos orgânicos em um ambiente fechado, onde as bactérias convertem o material orgânico em biogás, que pode ser usado para gerar eletricidade. Esse processo é muito

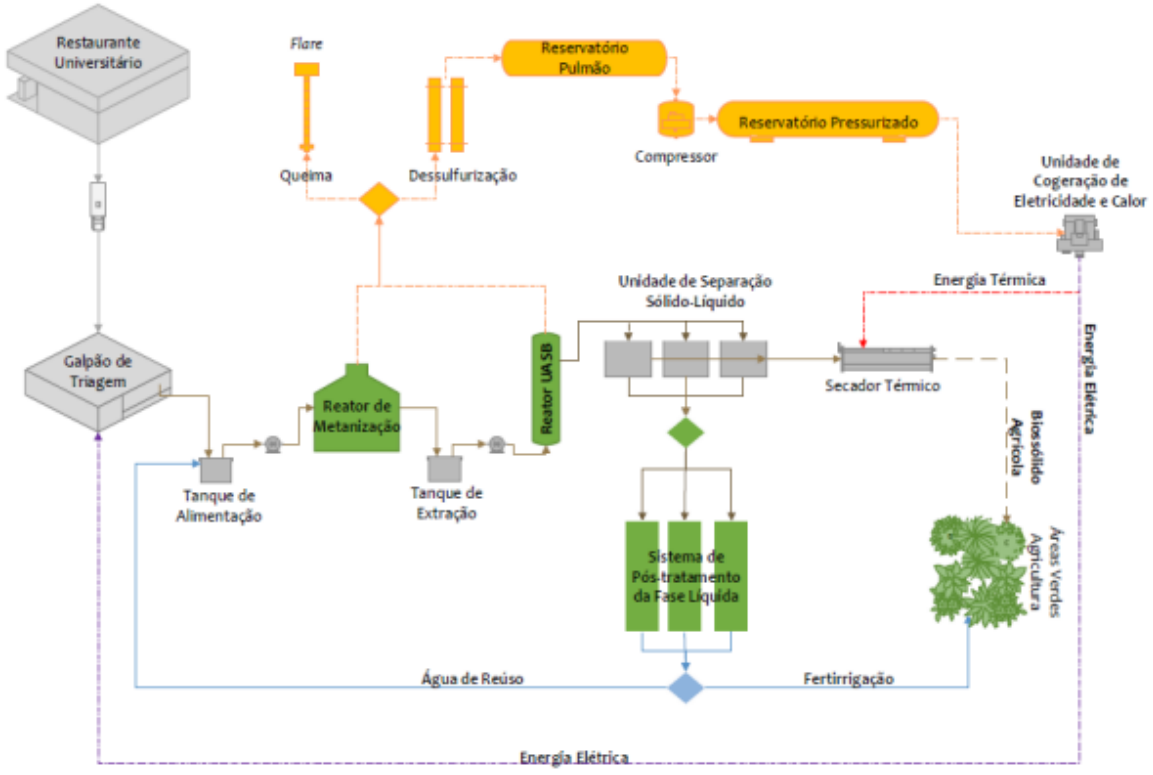
mais eficiente na conversão de energia, uma vez que aproveita toda a energia química contida nos materiais orgânicos.

Além disso, o processo de produção de biogás é considerado mais sustentável do que a incineração, uma vez que produz um subproduto útil (o biogás) e um subproduto residual (o biofertilizante), que pode ser usado como fertilizante orgânico em plantações agrícolas, sendo uma fonte de nutrientes orgânicos que inclui macronutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, além de micronutrientes como zinco, cobre e manganês e é similar ao fertilizante líquido químico. Isso torna o processo de produção de biogás uma alternativa mais amigável ao meio ambiente e com mais ganhos ambientais em comparação com a incineração (EUROPEAN UNION, 2014).

A utilização da pMethar resulta em diversos produtos, incluindo água que pode ser tratada para ser utilizada na fertirrigação de plantas na jardinagem. Além disso, o processo de separação sólido-líquido gera o biofertilizante, que é o resíduo sólido final chamado neste caso de biossólido agrícola, que após a remoção da água pode ser empregado como fertilizante.

A Figura 14 exibe a planta de funcionamento da Plataforma de Metanização com todos os seus tratamentos e suas unidades.

Figura 14. Planta de Plataforma de Metanização pMethar.



Fonte: Ferreira. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás, 2015.

É importante lembrar que a eficiência da conversão de biogás em eletricidade pode ser influenciada por vários fatores, como a qualidade do biogás, a temperatura ambiente e a manutenção adequada do sistema. Além disso, a eficiência de conversão pode ser melhorada com o uso de tecnologias mais avançadas, como a cogeração, em que o calor gerado durante o processo de geração de eletricidade é aproveitado para aquecimento ou refrigeração de outros processos, aumentando assim a eficiência geral do sistema (IEA, 2019).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A qualidade do inventário relacionada ao estudo ACV está diretamente interligada à veracidade e a aproximação mais real que se consegue obter dos dados coletados no Restaurante Universitário.

5.1. CARACTERIZAÇÃO

5.1.1. Caracterização do gerenciamento de resíduos no RU

Foi observado na visita ao Restaurante Universitário da UnB que é feito devidamente a separação dos resíduos em 3 classes sendo elas: recicláveis, orgânicos e indiferenciáveis. Contudo foi observado também que se constata uma lacuna nas ações de educação ambiental relacionadas aos resíduos sólidos, em especial ao desperdício de alimentos. Embora a separação de resíduos ocorra de forma efetiva por parte dos alunos e funcionários, observa-se uma tendência ao desperdício de alimento, que resulta em uma geração excessiva de resíduos na cozinha e no refeitório. Essa questão pode ser atribuída ao fato de que o valor subsidiado do restaurante universitário é significativamente mais baixo do que a média dos restaurantes comerciais e, muitas vezes, até mesmo de feiras em Brasília. Nesse contexto, a opção por alimentos de melhor qualidade e com menor potencial de geração de resíduos pode não ser acessível para a maioria dos frequentadores do restaurante universitário, dadas as restrições financeiras enfrentadas.

Os resíduos são coletados diariamente por uma empresa especializada nos horários mostrados na Tabela 12, os resíduos recicláveis em boa parte retornam para a cadeia de produção através do processo de reciclagem, uma pequena parte dos orgânicos coletados são destinados a fazenda de criação de porcos onde servirão de alimentos, a grande parte dos orgânicos, os recicláveis de recuperação inviabilizada e os indiferenciáveis são destinados ao Aterro Sanitário de Brasília.

Tabela 12. Horário de coleta dos resíduos.

Tipo do Resíduo	Horário da coleta
Recicláveis	15h
Orgânicos	20h
Indiferenciáveis	20h

Fonte: Restaurante Universitário do Campus Darcy Ribeiro.

O Restaurante Universitário é dividido em três regiões para efeitos de melhor compreensão sobre seu gerenciamento sendo elas: recepção, cozinha e refeitório. A Tabela 13 traz informações acerca da divisão das três regiões, as atividades executadas em cada uma e os resíduos gerados.

Tabela 13. Atividades e resíduos gerados por região.

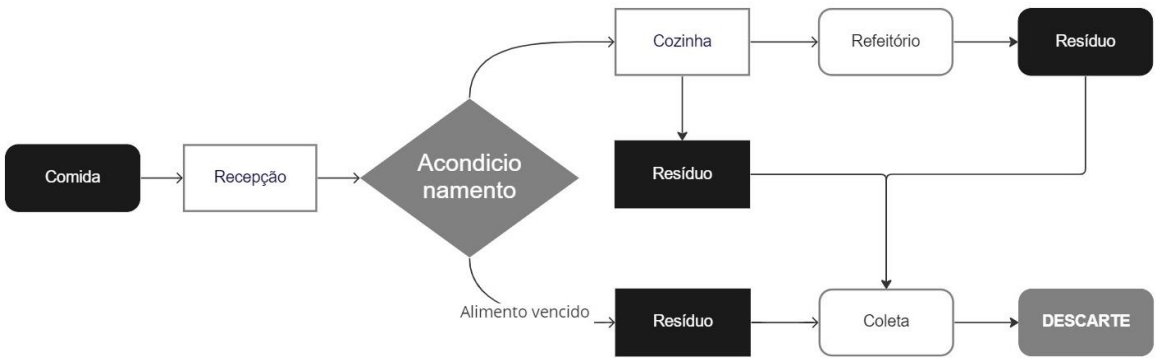
Região	Atividades	Resíduo gerado
Recepção	Recepção de produtos; acondicionamento de materiais; acomodação dos funcionários	Reciclável e indiferenciado
Cozinha	Preparo de refeição	Orgânico e indiferenciado
Refeitório	Distribuição das refeições; recepção de clientes;	Orgânico e indiferenciado

Fonte: Restaurante Universitário do Darcy Ribeiro.

As regiões de maior geração de resíduos orgânicos são: o refeitório, por conta do desperdício por parte dos alunos, seja pela falta de consumo total dos alimentos servidos ou pela disposição incorreta dos restos de comida, contribui para o aumento da geração desses resíduos; e a cozinha, pela preparação e fornecimento de alimentos, o que resulta em uma significativa quantidade de resíduos orgânicos, como cascas de frutas, restos de alimentos e outros resíduos vegetais.

O projeto tem foco na geração e tratamento dos resíduos orgânicos, com as informações obtidos é possível traçar um fluxograma sobre o caminho do resíduo orgânico do momento de chegada ao momento do descarte, seguindo a metodologia do portão ao túmulo, como exibido na Figura 15.

Figura 15. Caminho dos resíduos orgânicos do portão ao berço.



O descarte dos resíduos orgânicos é feito pela empresa que recolhe os resíduos no RU, sendo destes parte separadas e levadas a uma fazenda onde servirá de alimento para porcos e os nutrientes voltarão ao ciclo natural, e o restante que contempla a maioria são descartadas no Aterro Sanitário de Brasília. Os resíduos orgânicos gerados são separados corretamente sendo limpos e sem contaminantes, resíduos de outros tipos, sendo ótimos para alternativas de degradação biológicas.

Os resíduos são acondicionados em contêiners e bombonas até o momento da coleta. O Restaurante Universitário possui: oito contêiners de 500L sendo eles divididos de acordo com o tipo de resíduo de cada um, são três para o acondicionamento dos indiferenciáveis, quatro para os orgânicos e um para os recicláveis; uma caçamba para o condicionamento de papelão; quinze bombonas de 60 L para o armazenamento dos resíduos orgânicos que terão como destino as fazendas de criação de porcos.

5.1.2. Análise quantitativa e qualitativa

Os dados utilizados da gravimetria para efeitos de cálculos são os mesmos adquiridos pela pesquisa de Dutra em 2018. Fazendo um rápido levantamento bibliográfico no anuário estatístico da UnB vê-se que a população na universidade se mantém parecida, sendo a quantidade de alunos, população que mais frequenta o RU, praticamente a mesma, a empresa que recolhe os resíduos do restaurante também é a mesma dos estudos anteriores, sendo assim é possível utilizar os valores adquiridos em 2018.

O Restaurante Universitário (RU) situado no Campus Darcy Ribeiro da UnB funciona diariamente, oferecendo as três principais refeições e, consequentemente, gerando resíduos de forma constante. Um estudo foi realizado para quantificar a quantidade de resíduos gerados durante uma semana consecutiva em abril. A Tabela 14 a seguir contém informações sobre a quantidade de resíduos orgânicos provenientes da preparação de alimentos, disposição de pratos utilizados e sobras de comida. Durante o final de semana, a produção de resíduos diminui consideravelmente devido à redução na quantidade de refeições servidas (DUTRA, 2018).

Tabela 14. Geração de RSO do Restaurante Universitário.

Dia	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Total (kg)	2.131,70	2.214,70	2.597,60	2.448,70	2.025,00	883.80	463,00

Fonte: Dutra, 2018.

Uma média diária de 1.823,5 kg de resíduos sólidos orgânicos foi gerada no restaurante universitário no mês de abril. Para um levantamento mais realista de medições seria necessário a mesma pesagem de resíduos para cada mês do ano, portanto para fins de uma análise mais aprimorada também será levado em conta o valor de referência da pesquisa de Zaneti em 2015 que quantifica a geração de RSO no RU em novembro resultando em uma média diária de 2.212,96 kg. A média das duas sondagens então é de 2.018,20 kg por dia.

Com base no levantamento bibliográfico realizado, constatou-se que o teor de sólidos totais nos restos de alimentos, resíduos de cozinhas, cantinas, feiras ou alimentos impróprios para o consumo varia entre 15% e 20% e ainda o teor de impurezas varia de 5% a 10%. Portanto, para fins de análise, será considerado o valor percentual mais baixo para os sólidos, ou seja 15%, e mais alto para impurezas, ou seja 10%.

Segundo a pesquisa conduzida por Dutra em 2018, os resultados das análises laboratoriais demonstraram que, em média, os resíduos orgânicos do Restaurante Universitário (RU) apresentam um teor de sólidos voláteis correspondente a 96,31% (DUTRA, 2018) mostrados na Tabela 15.

Tabela 15. Quantidade de Sólidos Voláteis e Totais no resíduo orgânico.

RSO (kg)	Sólidos Totais (kg)	Sólidos Voláteis (kg)
2.018,20	302,73	291,56

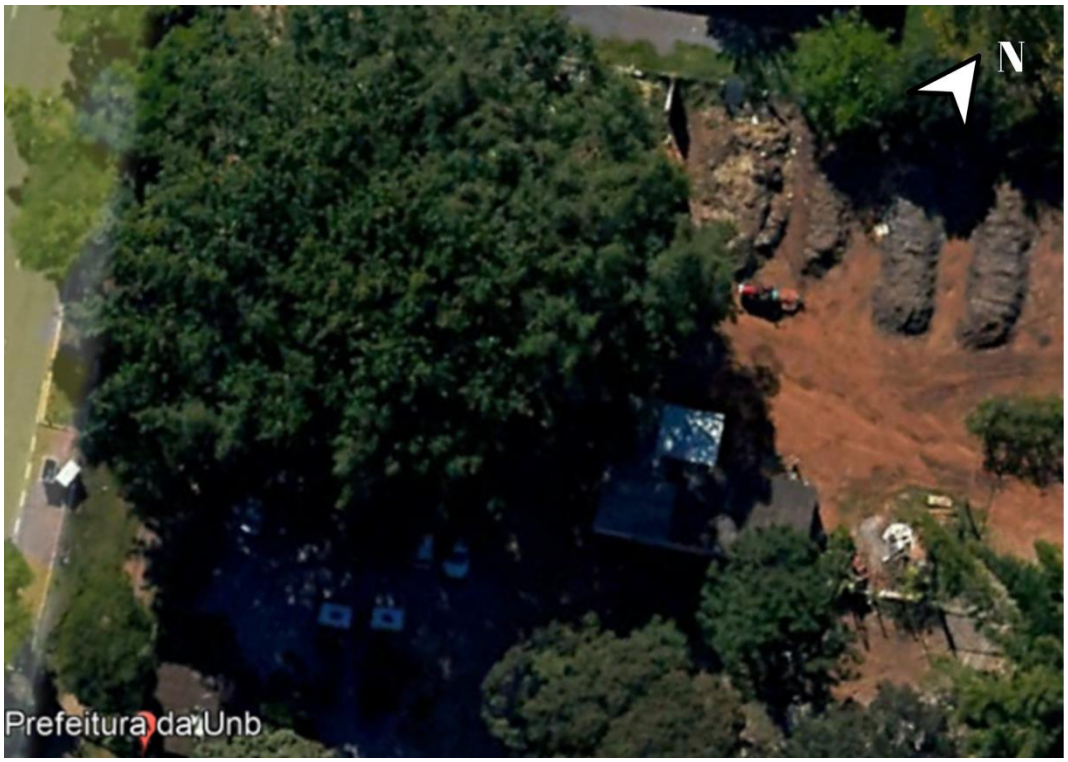
5.1.3. Caracterização da composteira da UNB

A Universidade de Brasília (UnB) conta com uma composteira manual a céu aberto localizada na Prefeitura da própria universidade que recebe boa parte dos resíduos verdes coletados na universidade, resíduos refentes a folhagens, poda, e toda área de jardinagem. Nesse caso o processo de compostagem consiste especificamente em fazer pilhas sucessivas de matéria orgânica seca, ou seja, com baixo teor de umidade, com altura de até 1 metro e comprimento de 2 a 4 metros.

A UnB, pela sua área que totaliza 4.784.449,13 m², e pela quantidade de geração de resíduos orgânicos principalmente os gerados pela poda e manutenção dos jardins e áreas verdes se enquadra no nível de compostagem institucional, ou seja, média escala, de acordo com o estabelecido pelo MMA.

A composteira fica localizada na área da prefeitura do campus, são duas colunas de aproximadamente 50 cm de altura com 4 m de comprimento e 1 m de largura, mostrada na Figura 16.

Figura 16. Localização da composteira da UnB.



Fonte: Google Earth, janeiro de 2023.

5.2. INVENTÁRIO DO ESTUDO

A Tabela 16 a seguir apresenta o inventário e os valores de entrada e saída do estudo. Os valores de entrada representam as quantidades de itens, produtos ou recursos considerados durante a análise. Os valores de saída representam os produtos resultantes de cada processo.

Tabela 16. Valores do inventário do estudo.

PARÂMETRO	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	CENÁRIO 3
Entradas			
RSO	1 t	1 t	1 t
Consumo de diesel (local de tratamento/destinação final)	0,28 L	N/A	N/A
Consumo de eletricidade	0,71 kWh	1,65 kWh	2,17 kWh
Solo de cobertura	0,125 m³	N/A	N/A
Transporte	93,90 t.km	3,45 t.km	0 t.km
Resíduo verde	N/A	0,35 t	0 t
Saídas			
Emissão de CO_2 no ar	44,83 kg	-2,38 kg	-39,12 kg
Emissão de CH_4 no ar	184,83 kg	10,001 kg	2 kg
Emissão de N_2O no ar	0,0015 kg	0,6 kg	N/A
Água cinza	N/A	N/A	0,68 m³
Produção de eletricidade	N/A	N/A	88,22 kWh
Produção de biofertilizante	N/A	0,14 t	0,14 t

Os itens a seguir fornecem uma visão detalhada dos valores do inventário para cada cenário analisado. Ao examinar essas informações, é possível identificar e comparar as variações nos inventários entre os cenários, bem como compreender melhor a distribuição dos recursos ou produtos analisados.

5.2.1. Cenário 1 - atual

A Tabela 17 contém informações sobre o trajeto dos Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) no cenário atual, que consiste na deposição dos resíduos orgânicos no Aterro Sanitário de Brasília. Para calcular as emissões relativas ao transporte dos resíduos é necessário estabelecer o consumo total de combustível relacionado ao transporte, o veículo utilizado no cenário atual é um caminhão pesado com autonomia de 3,6 km/L (CETESB, 2021) e fator de consumo igual a 0,15 L/t.km (MERRILD, 2012).

Tabela 17. Dimensionamento de transporte de RSO para o aterro.

Trajeto	Garagem - RU	RU - ASB	Total
Distância (km)	17,60	45,00	62,6

Fonte: Dutra, 2018.

A coleta de resíduos ocorre diariamente de segunda a sexta, exceto em feriado, e o caminhão tem capacidade para levar os resíduos em uma única viagem. Para a realização do cálculo do consumo total de diesel foram considerados 252 dias úteis no ano e utilizada a equação 3. Os fatores de emissão de CO_2, CH_4 e N_2O relativos a queima de diesel para o caminhão que recolhe os resíduos e leva ao aterro são iguais a 2,67 kg/L (MMA, 2011), 0,22 g/L e 0,11 g/L respectivamente (CETESB, 2021) e o potencial de aquecimento global de cada um desses gases é igual a 28 e 265, rescpectivamente (IPCC, 2014) e utilizando a equação 2 foi possível calcular as emissões destes poluentes no transporte. Além desses fatores de emissão foi levado em conta também o fator de emissão relativo a produção do diesel igual a 0,43 kg CO_2/L (ECOINVENT, 2018).

A Tabela 18 apresenta os valores de consumo energético, o uso de diesel e o solo de cobertura, que são elementos cruciais a serem considerados nos cálculos de emissões referentes ao cenário atual. O consumo energético representa a quantidade de energia utilizada anualmente nas operações diárias do aterro, enquanto o uso de diesel refere-se à quantidade desse combustível fóssil consumida para alimentar os equipamentos e maquinários.

Tabela 18. Indicadores do Aterro Sanitário de Brasília.

Indicador	Valor	Fonte
Consumo energético	0,71 kWh/t	SLU, 2021; NEOENERGIA, 2021
Consumo de diesel	0,28 L/t	LEME, 2010
Solo de cobertura	0,125 m³/t	LEME, 2010

No interior do aterro são utilizados também caminhões pesados com as mesmas especificações de fatores de emissão exibidas. Utilizando as equações 2 e 4 foi possível calcular os valores de emissões para o consumo do diesel e o consumo energético do aterro, respectivamente, utilizando o fator de emissão para energia elétrica igual a 0,4068 t de CO_2/MWh (MCTIC, 2022).

Neste trabalho a geração de metano no aterro proveniente dos resíduos sólidos é representada por $Emissões_{ch4}$, na equação 6, desse valor total de gás emitido parte dele é

queimado, em torno de 90% desse valor é captado no primeiro ano e ao passar dos anos o grau de eficiência muda por isso é utilizada uma eficiência de captação de 50%, do que é captado para queima aproximadamente 70% acaba sendo liberado na atmosfera (IPCC, 2006).

os valores admitidos para os parâmetros no cálculo de emissões estão representados na Tabela 19 a seguir.

Tabela 19. Valores dos parâmetros de emissões no aterro.

Parâmetro	Valor
φ	0,9
f	0
GWPch4	28
OX	0
F (%)	0,64
CODf (%)	0,77
FCM (%)	1
W (t/ano)	8839,716
COD (%)	0,15
k	0,4

Fonte: Adaptado de Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project, 2018.

Os valores totais de emissões relativas ao cenário atual se encontram na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20. Emissões do cenário atual.

Etapa	Emissão de CH_4 (t CO_{2eq}/ano)	Emissão de CO_2 (t/ano)	Emissão de N_2O (t CO_{2eq}/ano)	Total (t CO_{2eq}/ano)
Transporte (RU-ASB)	0,75	332,56	3,46	224,52
Tratamento	7.684,36	0	0	7.684,36
Maquinário (aterro)	0,01	6,61	0,07	6,69
Consumo energético	0	2,54	0	2,54
Produção do diesel	0	54,60	0	54,60

A emissão total nesse cenário é de aproximadamente 8.084,97 toneladas de CO_2eq por ano.

Ainda, há a necessidade total de 1.104,96 m³ de solo para uso de material de cobertura no aterro e uma produção total de 4.331,46 m³ de lixiviado, cujo tratamento não encontra-se definido dentro dos limites do sistema.

5.2.2. Cenário 2 - compostagem

A Tabela 21 a seguir contém informações sobre o trajeto dos Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) no cenário 2, que consiste na deposição dos resíduos orgânicos na composteira da Prefeitura da UnB. Para este cenário alternativo, o veículo utilizado será um veículo leve, mas que tem a fator de consumo igual a 0,03 L/t.km (MERRILD, 2012) e autonomia igual a 5,6 km/L.

Tabela 21. Dimensionamento de transporte de RSO para a composteira.

Trajeto	Garagem - RU	RU - COMP	Total
Distância (km)	1,4	0,9	2,3

Fonte: Gonçalves, 2018.

Para esse cenário a coleta foi estabelecida a cada dois dias úteis, levando em consideração a capacidade do veículo e com o objetivo de evitar desconforto de odores tanto para os clientes quanto para os funcionários. Sendo assim, foi utilizada a equação 3 para o cálculo do consumo total de diesel nesse cenário. Os fatores de emissão de CO_2, CH_4, e N_2O relativa a queima de diesel no veículo utilizado nesse cenário são iguais a 2,671 kg/L (MMA, 2011), 0,334 g/L, e 0,17 g/L (CETESB, 2021), respectivamente e o potencial de aquecimento global de cada um desses gases é igual a 28 e 265, rescpectivamente (IPCC, 2014). Dessa forma utilizando a equação 2 foi possível calcular as emissões destes poluentes no transporte.

Para calcular as emissões relativas ao tratamento da compostagem os fatores de emissão de CH_4 e de N_2O utilizados são respectivamente 10 kg de CH_4/t de RSO e 0,6 kg de N_2O/t de RSO, visto que a composteira é de base seca (IPCC, 2006), o potencial de aquecimento global utilizado foi 28 para o metano e 265 para o óxido nitroso (IPCC, 2014). Supondo que não houvesse recuperação do metano, as equações 8 e 9 foram utilizadas para calcular as emissões de CH4 e N2O.

O consumo total de eletricidade relativo ao uso do triturador resulta em um consumo específico igual a 1,65 kWh/t, em seguida foi calculada a emissão de CO_2 no uso da energia, de acordo com a equação 5.

O uso do fertilizante produzido a partir da compostagem de resíduos orgânicos proporciona um ganho ambiental significativo, pois diminui a necessidade de fertilizantes químicos reduzindo assim a liberação de gases de efeito estufa e o uso de recursos provenientes da produção desses fertilizantes (CARVALHO, 2011).

Os parâmetros estabelecidos para o cálculo da geração do composto foram os seguintes: 15% de sólidos totais nos resíduos orgânicos, 96,31% de sólidos voláteis (ou seja, compostáveis) e 10% de impurezas tanto nos resíduos orgânicos quanto nos resíduos verdes. Além disso, para o cálculo das emissões provenientes da produção do fertilizante, adotou-se o valor de -22,6 kg de CO_2eq/t de RSO, o qual representa o menor valor médio registrado para composteira a céu aberto alimentadas com resíduos verdes (Boldrin et al., 2009). É importante ressaltar que, mesmo com a presença de resíduos alimentares, esse valor é compensado pela adição de poda.

Sendo assim os resultados de emissões totais estão explicitados na Tabela 22.

Tabela 22. Emissões anuais totais do cenário 2 - compostagem.

Etapa	**Emissões de CH_4 (t CO_{2eq}/ano)**	**Emissões de CO_2 (t/ano)**	**Emissões de N_2O (t CO_{2eq}/ano)**	**Total (t CO_{2eq}/ano)**
Transporte (RU-composteira)	0,01	2,44	0,04	2,49
Tratamento	2.475,12	0	1.405,51	3.880,64
Consumo energético	0	5,93	0	5,93
Produção de diesel	0	0,39	0	0,39
Produção do fertilizante	-	-	-	-199,78

A emissão total nesse cenário é de aproximadamente 3.689,67 t de CO_2eq/ano.

Há ainda a necessidade de acrescer a quantidade de resíduos verdes necessárias como consta a equação 6, 3.093,90 t, é preciso também destinar as impurezas, que correspondem a 10% dos resíduos orgânicos, para o aterro sanitário, que neste cenário resultou em uma

quantidade de 883,97 t/ano. No entanto, é importante ressaltar que essa etapa não está contemplada dentro dos limites do sistema.

5.2.3. Cenário 3 – digestão anaeróbica

Este cenário representa o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos através da digestão anaeróbica com o uso de um biodigestor seco apresentado anteriormente nos itens 3.3.3, 4.2.5 e 4.3.5, através da plataforma de metanização pMethar. Para tanto o local de abrigo do biodigestor é considerado o mesmo do depósito de resíduos, na área externa do restaurante próximo a um estacionamento próprio de funcionários, e nesse caso não será necessário qualquer tipo de veículo automotivo para deslocamento dos resíduos, apenas o carrinho de mão já utilizado pelos funcionários.

As emissões relativas ao tratamento foram calculadas de acordo com as equações 8 e 9 e para isso foi utilizado o fator de emissão do metano igual a 2 g de CH_4/kg de RSO e para o fator de emissão do óxido nitroso, foi adotado o valor zero por ser considerado insignificante (IPCC, 2006), os valores do potencial de aquecimento global de cada um foram os mesmos adotados nos cálculos da compostagem (IPCC, 2014). No cálculo das emissões de CH_4 o fator padrão de emissão para o CH_4 na digestão anaeróbia já considera a recuperação do gás (IPCC, 2006).

O triturador utilizado para este cenário é o mesmo utilizado na composteira, o consumo energético calculado foi relativo a trituração dos resíduos acrescido do consumo das instalações da pMethar, 0,52 kWh/t de RSO.

Para o cálculo da recuperação energética, foram adotados os seguintes parâmetros: percentual de sólidos totais igual a 15%; percentual de sólidos voláteis de 96,31 %; o fator de produção de metano foi considerado como o rendimento mínimo nos restos de alimento, estabelecido em 245 m^3/tSV; o poder calorífico inferior igual a 9,97 kWh; e a eficiência de conversão estabelecida como o menor valor de 25%, para fins de análise. Através da equação 10 foi obtida a geração de eletricidade igual da quantidade gerada parte poderia ser utilizada para abastecimento do sistema, restando ainda e o restante poderia ser utilizada para abastecimento energético do RU ou outras instalações da UnB, levando a um ganho ambiental de emissões de gás carbônico anuais evitadas.

Além disso tem-se o ganho ambiental relativo ao uso do biofertilizante produzido a partir do biodigestor apresenta a redução do uso de fertilizantes químicos, que são poluentes e podem afetar negativamente o solo e os recursos hídricos, bem como reduz a emissão de

gases de efeito estufa proveniente de sua produção e captação de recursos (FERNANDES, 2015). A quantidade de fertilizante produzida corresponde à quantidade de biossólidos no sistema, ou seja, o valor dos sólidos voláteis após a digestão, que é de 1.277,03 toneladas. Para o cálculo das emissões relacionadas a essa produção, foi adotado o fator de emissão de -22,4 kg de CO_2eq por tonelada de RSO, que representa o menor valor médio encontrado para compostagem de restos de alimentos em composteiras de sistema fechado (BOLDRIN et al., 2009).

Os resultados de emissões totais, bem como o ganho ambiental relativo ao uso da energia produzida pelo biodigestor e a produção do fertilizante representado com o sinal negativo, estão exibidos na Tabela 23.

Tabela 23. Emissões totais do cenário 3 – digestão anaeróbica.

Etapa	**Emissão de CH_4 (t CO_{2eq}/ano)**	**Emissão de CO_2(t/ano)**	**Emissão de N_2O (t CO_{2eq}/ano)**	**Total (t CO_{2eq}/ano)**
Tratamento	495,02	0	0	495,02
Consumo energético	0	7,82	0	7,82
Recuperação energética	0	-317,24	0	-317,24
Produção de biofertilizante	-	-28,61	-	-28,61

Logo a emissão total nesse cenário é aproximadamente 157 t de CO_2eq/ano.

Há ainda a necessidade de destinar as impurezas, que correspondem a 10% dos resíduos orgânicos, para o aterro sanitário, que neste cenário resultou em uma quantidade de 883,97 t/ano. No entanto, é importante ressaltar que essa etapa não está contemplada dentro dos limites do sistema.

5.3. REALIZAÇÃO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Conforme definido na metodologia o cenário atual se caracteriza no processo de tratamento e disposição final em aterro sanitário. Foi elaborado um sistema com as entradas consideradas: resíduos sólidos orgânicos, diesel, eletricidade e transporte. As saídas foram: resíduos sólidos orgânicos gerenciados e emissões de metano relativas a disposição e degradação dos resíduos. Os valores encontram-se na Tabela 24.

Tabela 24. Valores das entradas e saídas no processo de tratamento e disposição final em aterro sanitário.

	Parâmetro	Quantidade
ENTRADAS	RSO	1 t
	Diesel	0,24 kg
	Eletricidade	0,71 kWh
	Transporte	93,9 t.km
SAÍDAS	RSO gerenciado	1 t
	Emissão de CH_4 no ar	27,94 kg

O cenário 2 consiste no tratamento de resíduos utilizando a compostagem a céu aberto, para ele foi estabelecido um processo de tratamento, com as entradas definidas como: resíduos sólidos orgânicos, resíduos verdes, transporte e eletricidade. As saídas foram definidas como resíduos sólidos orgânicos gerenciados, composto fertilizante e emissões de metano e óxido nitroso liberados no ar. Os valores encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25. Valores das entradas e saídas no processo de compostagem.

	Parâmetro	Quantidade
ENTRADAS	RSO	1 t
	Resíduo verde	0,35 t
	Transporte	3,45 t.km
	Eletricidade	1,65
SAÍDAS	RSO gerenciado	1 t
	Emissão de CH_4 no ar	10 kg

	Parâmetro	Quantidade
	Emissão de NO_2 no ar	0,6 kg

Ao analisar os valores dos impactos da compostagem, é importante ressaltar que existe um valor significativo que não está contabilizado na tabela o valor evitado de emissão e de depleção de recursos. Esses valores referem-se à quantidade de gases de efeito estufa que seriam emitidos e recursos naturais que seriam utilizados em forma de energia caso o fertilizante fosse produzido artificialmente. Para essa comparação foi utilizado a equivalência do conteúdo de nitrogênio presente no composto e a produção do componente nitrogênio em um fertilizante.

O cenário 3 consiste no tratamento dos resíduos orgânicos através de uma plataforma de metanização, para tanto foi definido o processo de digestão anaeróbica do sistema da pMethar, com as entradas definidas como: resíduos sólidos orgânicos e energia. As saídas foram definidas como resíduos sólidos orgânicos gerenciados e emissões de metano liberados no ar. Os valores de cada parâmetro encontram-se a seguir na Tabela 26.

Tabela 26. Valores das entradas e saídas no processo de digestão anaeróbica.

	Parâmetro	Quantidade
ENTRADAS	RSO	1 t
	Eletricidade	2,18 kWh
SAÍDAS	RSO gerenciado	1 t
	Emissão de CH_4 no ar	2 kg

Ao analisar esses valores de impactos da digestão anaeróbica, é essencial destacar dois valores relevantes que não são adequadamente considerados. Esses valores são os benefícios evitados em termos de emissões de gases de efeito estufa e consumo energético decorrentes do uso de energia convencional em comparação com a produção de energia e fertilizantes através desse processo. Para demonstrar foi calculado o resultado de emissões e uso de recursos que o uso da energia convencional resultaria. Também é relevante considerar a produção de fertilizante artificial, que poderia ser substituído pelo fertilizante obtido no biodigestor, nesse caso, foi considerado o mesmo da compostagem.

A seguir, são apresentados os resultados do projeto para a unidade funcional definida. A Tabela 27 mostra o nome e a descrição dos cenários conforme definido na configuração do projeto. Os nomes dos cenários da configuração do projeto são utilizados em todos os gráficos e tabelas seguintes.

Tabela 27. Nome e descrição das variantes.

Variante	Descrição
Cenário 1	Cenário atual com disposição final no Aterro Sanitário de Brasília.
Cenário 2	Cenário hipotético que utiliza o tratamento de compostagem na prefeitura da UnB.
Cenário 3	Cenário hipotético com uso de um sistema de digestão anaeróbica.

A Tabela 28 mostra os resultados AICV das variantes do projeto. Cada categoria AICV selecionada é exibida nas linhas e os cenários do projeto nas colunas. A unidade é conforme definida no método. Ao final no Apêndice A, é possível visualizar os resultados abrangentes de todas as categorias do CML IA Baseline.

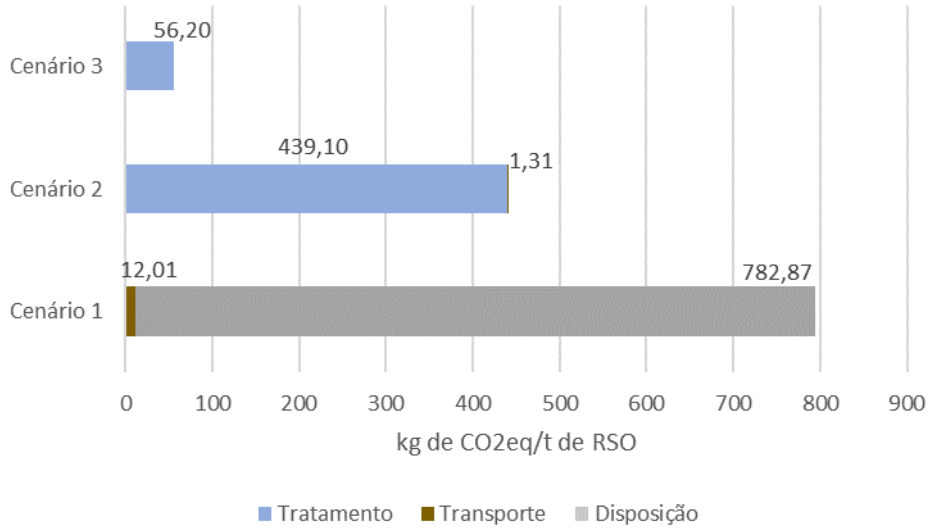
Tabela 28. Resultados AICV para cada cenário.

Categoria	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Unidade
Depleção de recursos abióticos (combustíveis fósseis)	252,56	30,62	5,16	MJ
Potencial de aquecimento global	794,88	440,40	56,20	kg de CO_2eq

As contribuições dos valores de cada cenário de acordo com a Ecoinvent são apresentadas na Figura 3. No cenário 1, as contribuições relativas à disposição incluem a degradação dos resíduos, a utilização do diesel em motores de combustão interna do aterro, as emissões indiretas decorrentes da produção do diesel e o consumo e produção de eletricidade. Tanto no cenário 1 quanto no cenário 2, o transporte também contribui com as emissões devido à queima e produção de diesel.

No cenário 2, as emissões são compostas pelo tratamento em si e o consumo de eletricidade no sistema com o uso do triturador. No cenário 3, as emissões do tratamento incluem o tratamento em si e o consumo de eletricidade tanto do triturador quanto da planta da plataforma de metanização.

Figura 17. Emissões equivalentes em cada etapa do cenário.



Como pode ser visto pelos resultados, dentro de cada cenário o processo de aterramento, compostagem e digestão anaeróbica são as etapas que causam maior impacto na categoria de potencial de aquecimento global, mostrando a importância de se escolher tratamentos que gerem menor impacto, visto que dentro de um fluxo eles são o processo que mais impacta.

Entre os dois cenários alternativos analisados, compostagem e digestão anaeróbica, a compostagem teve um impacto ambiental maior em ambas categorias analisadas. Isso poderia ser atribuído, em parte, ao fato de que o tratamento dos resíduos é realizado em uma composteira já existente na UnB e não próximo ao restaurante universitário, contudo observa-se na Figura 17 que o transporte não se mostra uma parcela considerável do impacto calculado.

As Figuras 18 e 19 a seguir apresentam gráficos que exibem os valores correspondentes a cada categoria de impacto ambiental em função da unidade funcional utilizada (1 t de resíduo sólido orgânico), juntamente com as respectivas mitigações alcançadas. Esses gráficos fornecem uma representação visual clara dos impactos ambientais associados a cada variante bem como a comparação entre elas.

Figura 18. Gráfico do potencial de aquecimento global em função de 1 t de resíduos sólidos orgânicos.

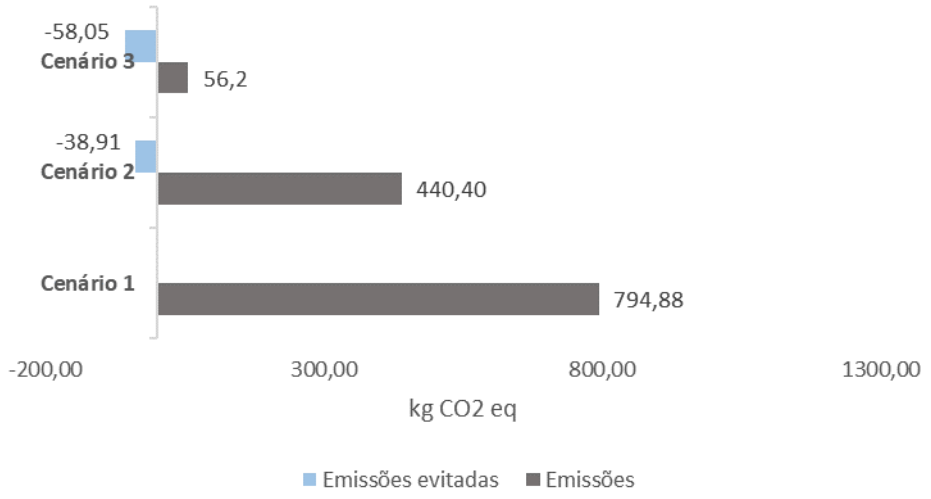
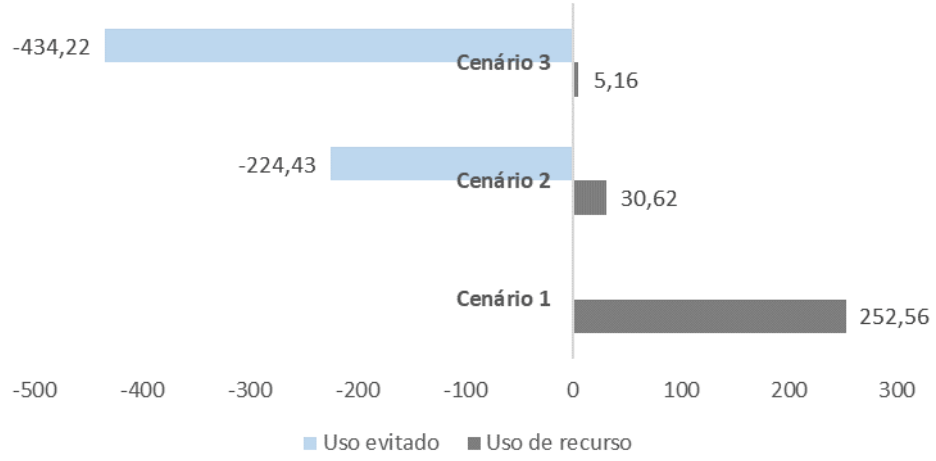


Figura 19. Gráfico da depleção de recursos em função de 1 t de resíduos sólidos orgânicos.



Como pode ser visto pelos resultados, o cenário atual de gerenciamento de resíduos orgânicos no RU, onde esses resíduos são levados ao aterro sanitário de Brasília, revela resultados mais elevados em termos de impacto ambiental. Os dados indicam que esse método de disposição resulta em maiores emissões de CO_2 equivalente e uso de energia por meio de combustíveis fósseis em comparação com outros dois cenários analisados. Esse é um tema importante a ser tratado, uma vez que o potencial de aquecimento global está diretamente relacionado às mudanças climáticas e o esgotamento de recursos abióticos pode levar a uma escassez desses recursos no futuro. Essa descoberta ressalta a importância de implementar alternativas mais sustentáveis para lidar com os resíduos orgânicos.

Entre os dois cenários alternativos analisados, 2 e 3, compostagem e digestão anaeróbica, ficou evidente que a compostagem teve um impacto ambiental maior, já a digestão

anaeróbica apresentou os menores valores de impacto nas categorias analisadas. Além disso, é importante destacar que a digestão anaeróbica apresentou um melhor resultado quanto ao potencial de se evitar impactos em comparação com a compostagem devido à reutilização energética, conseguindo evitar quase 50 % a mais de emissões e 93 % a mais do uso de recursos, como pode ser visto na Figura 18 e na Figura 19 o uso de recursos evitados.

Foi realizado um levantamento de resultados de ACV nos tipos de tratamento abordados em estudos anteriores, conforme apresentados na Tabela 29. Os estudos analisados demonstram uma variedade significativa nos valores resultantes das categorias de impacto analisadas devido a diferentes contextos de pesquisa. Essas variações são influenciadas por fatores como transporte, distância até o local de tratamento, tipo de tratamento (compostagem a céu aberto ou fechada, digestão anaeróbica seca ou úmida), presença ou ausência de recuperação energética no aterro sanitário, além das condições climáticas e estruturais específicas de cada país onde ocorre o tratamento.

Tabela 29. Impacto de aquecimento global e depleção de recursos abióticos por tipo de tratamento - Estudos anteriores.

Pesquisa	**Tratamento**	**Categoria**	
		GWP (kg de CO_2eq)	**Depleção abiótica (MJ)**
BERNSTAD *et. al*, 2016	Digestão anaeróbica	400	2000
BLANCO *et. al*, 2009	Compostagem	170	3220
HOLLAS *et. al*, 2022	Digestão anaeróbica	31,54	-
Lee *et. al*, 2017	Aterro sanitário	2500	-
LEME *et. al*, 2014	Aterro sanitário	2052	-
MONDELLO *et. al*, 2017	Aterro sanitário	1243	6874
	Compostagem	99	1543
	Digestão anaeróbica	66	982
RAZZA *et. al*, 2009	Compostagem	22	128
SULIS *et. al*, 2021	Aterro sanitário	200	-
ZHOU *et. al*, 2021	Digestão anaeróbica	24,75	-

Cada pesquisa apresenta um sistema e um fluxo de processos específicos que podem acabar por apresentar valores mais altos ou mais baixos. É importante ressaltar que poucos estudos abordam especificamente a categoria de impacto de depleção de recursos, o que

limita a disponibilidade de indicadores comparativos para este trabalho em relação à literatura. No entanto, os valores encontrados neste estudo para a categoria de impacto de aquecimento global são plausíveis e foram calculados com base na base de dados da Ecoinvent, o que indica que os resultados relacionados à depleção de recursos também devem estar próximos à realidade, dentro das condições específicas apresentadas neste estudo.

Para realizar a comparação dos resultados obtidos por meio da análise do ciclo de vida com a base de dados da Ecoinvent e os cálculos realizados de emissões baseados nos valores encontrados na literatura, foi elaborada a Tabela 30, que apresenta os valores totais de emissões correspondentes à disposição de 8.839,716 toneladas de resíduos sólidos orgânicos para cada tipo de tratamento.

Tabela 30. Comparação dos valores de emissões anuais por cenários em t de CO_2eq baseados nas fontes dados da Ecoinvent e artigos /publicações.

Cenário	Ecoinvent	Artigo e Publicação
Cenário 1 (t CO_2eq)	7.026,50	8.084,97
Cenário 2 (t CO_2eq)	3.893,05	3.889,45
Cenário 3 (t CO_2eq)	496,81	502,85

Conforme observado na Tabela 30, é possível notar que os valores de emissões tanto para o aterro quanto para a digestão anaeróbica foram mais elevados no cálculo das emissões baseadas na literatura, enquanto o valor para a compostagem foi ligeiramente mais alto na análise do software. Essas discrepâncias podem ser atribuídas à variação nos dados e arredondamentos dos fatores de emissões utilizados, como é o caso do fator de emissão do consumo energético, o dado mais atualizado da literatura atribui um valor médio de 0,4068 t CO_2/kWh (MCTIC, 2022) enquanto a base de dados da Ecoinvent lançada em setembro de 2019, atribui a essa emissão o valor de 0,2376 t CO_2/kWh. No entanto, é importante destacar que a maior diferença entre os valores apresentados não excedeu 0,8%, portanto com dados mais atualizados seriam obtidos valores maiores pelo software em todos os cenários.

Foi elaborada a Tabela 31, similar a Tabela 30, para avaliar os resultados obtidos na análise de emissões evitadas.

Tabela 31. Valores de emissões anuais evitadas por cenários em t de CO_2eq

Cenário	Ecoinvent	Artigo e Publicação
Cenário 2	-343,96	-199,78
Cenário 3	-513,15	-345,84

Ao analisar os resultados da avaliação de emissões evitadas, observa-se uma maior discrepância entre os valores obtidos no inventário e os valores gerados pelo software que utiliza a base de dados da Ecoinvent. Essa discrepância é principalmente atribuída à comparação do componente de nitrogênio do fertilizante, utilizado para o cálculo. A produção desse fertilizante, de acordo com a Ecoinvent, resulta em um fator de emissão aproximadamente 72% maior do que o utilizado pela literatura. Essa discrepância nas emissões evitadas pode ser atribuída às considerações adicionais realizadas pelo software OpenLCA, que leva em conta as emissões indiretas relacionadas, por exemplo, à produção de fertilizantes químicos. Essas emissões indiretas não foram plenamente consideradas no cálculo do inventário.

Além disso, o software é capaz de incorporar fatores de emissões indiretas em suas análises de ciclo de vida, resultando em estimativas mais precisas e abrangentes das emissões de gases de efeito estufa e de outros impactos ambientais. Ao considerar esses fatores indiretos, ele leva em conta uma gama mais ampla de atividades relacionadas à produção de um produto ou serviço, o que pode levar a resultados mais altos em comparação com os valores atribuídos pela literatura, que muitas vezes são arredondados ou baseados em estimativas simplificadas, contribuindo para uma análise mais precisa e informada dos impactos ambientais de um determinado processo ou produto.

Os resultados obtidos a partir do inventário e do software OpenLCA demonstraram uma proximidade significativa em relação às emissões totais para os diferentes tipos de tratamento avaliados, o que indica uma confiabilidade razoável, é provável que os valores no inventário também contabilizem essas emissões indiretas, mesmo que de forma menos abrangente. No entanto, uma diferença notável foi observada nas emissões evitadas.

Ainda podem existir reduções através de outras ações em ambas categorias de impactos se houver redução na geração de resíduos orgânicos no RU. Diante da eficiência na segregação de resíduos sólidos no restaurante universitário, especialmente no que diz respeito aos resíduos orgânicos, é possível explorar estratégias adicionais para minimizar ainda mais a sua geração.

No que diz respeito à conscientização tanto dos usuários do restaurante universitário quanto dos funcionários e dos empreendedores, poderia haver mais ações que vão além da segregação eficiente com a temática de geração de resíduos por conta da tendência ao desperdício alimentar. Ao adotar abordagens mais sustentáveis em todas as etapas, desde a

compra até o consumo, é possível avançar em direção a um cenário de menor impacto ambiental e maior eficiência na gestão dos resíduos.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados sobre o cenário atual fica evidente que podem-se adotar práticas mais sustentáveis no gerenciamento de resíduos orgânicos no RU. O fato de os resíduos orgânicos estarem sendo levados para o aterro sanitário de Brasília, resultando em maiores emissões de CO_2eq e uso de energia por meio de combustíveis fósseis, destaca a necessidade de buscar alternativas que minimizem o impacto ambiental.

Entre os cenários alternativos de compostagem e digestão anaeróbica, observou-se que a compostagem, realizada em uma composteira já existente na UnB, apresentou maiores impactos, principalmente devido ao transporte dos resíduos. Por outro lado, mesmo que a compostagem fosse feita em local próximo ao restaurante sem a necessidade de transporte, a digestão anaeróbica demonstrou ser a opção mais favorável, além dos baixos valores de impacto em relação ao potencial de aquecimento global e depleção de recursos abióticos, tem um maior potencial de evitação de impactos, especialmente por meio da recuperação energética.

Esses resultados indicam que a adoção da digestão anaeróbica como método de tratamento de resíduos orgânicos pode ser uma solução promissora, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a conservação de recursos abióticos e o aproveitamento energético dos resíduos. No entanto, é importante considerar a viabilidade econômica e a infraestrutura necessária para implementar essa tecnologia em larga escala, bem como envolver a comunidade universitária e estabelecer parcerias para garantir o sucesso desse processo de transição.

Pensando ainda na redução dos impactos, a minimização de geração de resíduos pode alcançar melhores resultados

Ao adotar práticas de reutilização e recuperação de recursos, é possível reduzir a demanda por matérias-primas virgens, minimizar o desperdício e promover a utilização eficiente dos recursos disponíveis. Essas são práticas alinhadas com a economia circular e que resultam em uma redução significativa do impacto ambiental, uma vez que menos recursos naturais precisam ser extraídos e menos resíduos são descartados de forma inadequada. Ao adotar práticas circulares no gerenciamento de resíduos orgânicos, o RU estaria contribuindo para a construção de uma sociedade mais sustentável, na qual os recursos são valorizados e utilizados de forma responsável, minimizando os impactos negativos no meio ambiente e promovendo a preservação dos ecossistemas para as gerações futuras.

Em suma, os resultados ressaltam a importância de repensar as práticas de gerenciamento de resíduos orgânicos no RU, alinhando-as aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU. Buscar alternativas mais sustentáveis que minimizem os impactos ambientais, reduzam as emissões de gases de efeito estufa e promovam a recuperação de recursos é fundamental para alcançar metas como o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 12 (Consumo e Produção Sustentáveis).

Nesse contexto, a implementação da digestão anaeróbica surge como uma opção promissora, capaz de atender a esses objetivos. Ao adotar essa tecnologia, o RU estaria contribuindo para o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, e também para o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ao aproveitar a recuperação energética dos resíduos orgânicos.

O estudo não levou em consideração estudos aprofundados acerca dos aspectos econômicos e infraestruturais envolvidos na implementação da digestão anaeróbica, bem como a capacidade da composteira da prefeitura da UnB ou uma alternativa de localização para uma composteira própria do RU, o que diminuiria bastante os impactos ambientais relacionados a esse tipo de tratamento. Também não foi avaliada a opção do uso de biometanização para geração de combustível através da digestão anaeróbica, o que aumentaria a eficiência de uso, já que boa parte dela é perdida na conversão da energia térmica para elétrica. Além disso este trabalho contempla apenas a avaliação em duas categorias de impacto, no entanto outra chamou atenção pelos seus valores elevados e muito discrepantes entre cada tipo de tratamento, a depleção abiótica em função do uso de recursos naturais não fósseis. Desta forma, estes poderiam ser aprofundados em estudos posteriores. Pensando ainda na redução dos impactos e que a minimização de geração de resíduos pode alcançar melhores resultados, recomenda-se que estudos posteriores analisem a tendência quanto ao desperdício alimentar.

Por fim o engajamento da comunidade universitária, promovendo conscientização e participação ativa no RU pode contribuir de uma maneira melhor para garantir um futuro mais sustentável, preservando o meio ambiente e cumprindo sua responsabilidade com as gerações futuras, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS **NBR 12.235: Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos** – Classificação. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS NBR ISO 14040: **Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura**. Classificação. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉNICAS. NBR10004: **Amostragem de resíduos sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE (2020). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/arquivos/manual>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

ABRELPE (2021). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ABRELPE (2022). Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/arquivos/manual>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

ACCORSI, R. et al. Augmented spatial LCA for comparing reusable and recyclable food packaging containers networks. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, 15 nov. 2022.

BARTOCCI, P. et al. LCA analysis of food waste co-digestion. **Science of the Total Environment**, v. 709, 20 mar. 2020.

BASTIAN, L. et al. Greenhouse gas emissions from biogenic waste treatment: Options and uncertainty. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 15, n. 1, p. 49–60, 1 jan. 2013.

BERNSTAD SARAIVA SCHOTT, A.; CÁNOVAS, A. **Current practice, challenges and potential methodological improvements in environmental evaluations of food waste prevention - A discussion paper**. **Resources, Conservation and Recycling.** Elsevier, 18 jun. 2015.

BERNSTAD SARAIVA, A.; DAVIDSSON; BISSMONT, M. Lifecycle assessment of a system for food waste disposers to tank - A full-scale system evaluation. **Waste Management**, v. 54, p. 169–177, 1 ago. 2016.

BLANCO, J., MUNOZ, P., ANTÓN, A., RIERADEVALL, J. (2009). **Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops**. Resources, Conservation and Recycling, 53, 340-351.

BOGNER, J. et al. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). **Waste Management and Research**, v. 26, n. 1, p. 11–32, 2008.

BOLDRIN, A. et al. **Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions**. Waste Management and Research, v. 27, n. 8, p. 800-812, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0734242X09345275. Acesso em: 22 jun. 2023.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2020. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos** - Consulta Pública. Disponível em: http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wpcontent/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-ConsultaP%C3%BAblica.pdf. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 02 de fevereiro de 2023.

BRASIL. **Lei Federal nº. 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Lex: Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

BRASIL. Lei n° 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRASIL. **LEI Nº 11.107, DE 6 DE ABRIL DE 2005**. 2005. Lex: Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação.** Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, Serviço Social do Comércio. -- Brasília, DF: MMA, 2017. 68 p. ISBN: 978-85-7738-313-9.

BRASIL; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Departamento de Mudanças Climáticas. Gerência de Qualidade do Ar. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. 1. ed.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

CARVALHO, A. J. R. DE; THOMÉ, A. (2011). **Compostagem como alternativa para a gestão de resíduos orgânicos e produção de adubo**. Revista Brasileira de Agroecologia, 6(1), 89-98. Recuperado de https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-91692011000100010&script=sci_arttext.

CHENICHARRO, C.; TEMPONI, A. DE A.; AZEVEDO, C. **Plataforma de metanização reaproveita resíduos alimentares gerados na bandejão**. Universidade Federal de Minas Gerais, 14 mar. 2016.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration**. Energy, v. 34, n. 12, p. 2116–2123, 2009.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2021** [recurso eletrônico]. Coordenação geral Vanderlei Borsari; Coordenação técnica Marcelo Pereira Bales; Equipe técnica Antônio de Castro Bruni... [et al.]; Mapa Thiago De Russi Colella. São Paulo: CETESB, 2022. 1 arquivo de texto (235 p.): il. color., PDF; 6 GB. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103). Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/. ISBN 978-65-5577-048-3.

DASTJERDI, B. et al. **Comparative life cycle assessment of system solution scenarios for residual municipal solid waste management in NSW, Australia**. Science of the Total Environment, v. 767, 1 maio 2021.

DI MARIA, F.; SISANI, F. **Greenhouse gas emissions and environmental impact from recycling the organic fraction of solid waste: Comparison of different treatment schemes from a life cycle perspective**. Recycling, v. 2, n. 3, p. 1–15, 24 abr. 2017.

DUTRA, F. **Sem coleta seletiva, Aterro Sanitário do DF perde 2 anos de vida útil**. Metrópoles, 5 jun. 2022.

DUTRA, V. (2018). **Avaliação da Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Orgânicos provenientes do Restaurante Universitário do campus Darcy Ribeiro - UnB**. Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

ECO21. **Eunice Foote, primeira cientista que teorizou sobre a mudança climática**. Revista 281, 29 maio 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Compostagem de restos de alimentos com aparas de grama e esterco de animais: monitoramento do processo**. Rio de Janeiro, RJ, 2010. 7 p. Documento técnico.

ERKISI-ARICI, S. et al. **Comparative LCA of Municipal Solid Waste Collection and Sorting Schemes Considering Regional Variability**. Procedia CIRP. Anais. Elsevier B.V., 2021.

EUROPEAN UNION (EU). **Waste Framework Directive: Study on Waste Management Technologies**. Brussels, Belgium, 2014. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20180705. Acesso em: 20 jan. 2023.

FERNANDES, A. L. M.; CANUTO, E. L. (2015). **O uso do biofertilizante como alternativa na produção agrícola familiar**. Revista de Gestão Social e Ambiental, 9(2), 53-67. Recuperado de https://periodicos.ufsm.br/rgsa/article/view/3693.

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2015.

GLOBAL CARBON ATLAS. **Country Emissions**. *In*: Emissions. [*S. l.*], 2021. Disponível em: http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions. Acesso em: 6 fev. 2023.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (GDF). **Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PDGIRS)**. Brasília, 2018. Disponível em: http://www.so.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2018/03/PDGIRS.pdf. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

HERBETS, R. A.; COELHO, C. R. de A.; MILETTI, L. C.; MENDONÇA, M. M. **Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos**. Revista Saúde e Ambiente. v. 6, n.1, p.41-50, jun. 2005.

HOLLAS, C. E. et al. **Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production**. Journal of Cleaner Production, v. 354, 20 jun. 2022.

HUMER, M.; LECHNER, P. **Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills.** Waste Management & Research, v.17, p 443-452, 1999.

IBÁÑEZ-FORÉS, V. et al. **Achieving waste recovery goals in the medium/long term: Eco-efficiency analysis in a Brazilian city by using the LCA approach**. Journal of Environmental Management, v. 298, 15 nov. 2021.

Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). **O que é Avaliação do Ciclo de Vida**. *In*: ACV: Pensamento do Ciclo de Vida. [*S. l.*], 2018. Disponível em: https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/#:~:text=A%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20Ciclo%20de,de%20determinado%20produto%20ou%20servi%C3%A7o. Acesso em: 6 fev. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU AND B. ZHOU (Eds). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021, 41 pp.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Volume 5 Waste, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES, Japan

INTERNACIONAL AGENCY ENERGY (IEA). Renewables 2019. Paris: IEA, 2019. Disponível em: https://www.iea.org/reports/renewables-2019. Acesso em: 10/06/2023. Licença: CC BY 4.0.

INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). International Renewable Energy Agency. Biogas: Technology Brief. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.

JABEEN, F. et al. Trash to Energy: **A Measure for the Energy Potential of Combustible content of Domestic solid waste generated from an industrialized city of Pakistan**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022.

KJERSTADIUS, H. et al. **Carbon footprint of urban source separation for nutrient recovery**. Journal of Environmental Management, v. 197, p. 250–257, 15 jul. 2017.

LA ROSA, A. D. et al. **Recovery of electronic wastes as fillers for electromagnetic shielding in building components: An LCA study**. Journal of Cleaner **Production**, v. 280, 20 jan. 2021.

LEE, U., HAN, J., & WANG, M. (2017). **Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways**. Journal of Cleaner Production, 166, 335-342. ISSN 0959-6526. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016.

LEME, M. M. V. et al. **Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil**. Resources, Conservation and Recycling, v. 87, p. 8–20, 2014.

LEMOS, Luiz Marcelo Antoniazzi et al. **Compostagem de resíduos orgânicos: aspectos técnicos e ambientais**. Revista Brasileira de Agroecologia, v. 4, n. 2, 2009. Disponível em: https://www.agroecologia.gov.br/ojs2/index.php/rbagroecologia/article/view/7842/4282. Acesso em: 01 maio 2023.

LIMA, José Eudes de; FREIRE, Fernando José de Freitas. **Compostagem: um estudo sobre o processo e seus benefícios**. Revista de Agricultura Neotropical, v. 1, n. 2, p. 73-82, 2014. Disponível em: http://www.agraneotropica.com.br/ojs-2.4.8/index.php/Neotropical/article/view/55/47. Acesso em: 01 maio 2023.

LIN, H. et al. **Life cycle assessment of a biogas system for cassava processing in Brazil to close the loop in the water-waste-energy-food nexus**. Journal of Cleaner Production, v. 299, 25 maio 2021.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J.; BEHRENS III, W. W. **The limits to growth & a report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind**. New York: Universe Books, 1972.

MENDONÇA, T.T.; SCHMITZ, M.D.; ANDRADE, I.T. **Inserindo o conceito Lixo Zero e a economia sustentável em escolas públicas de Florianópolis**. Extensio: R. Eletr. de Extensão, Florianópolis, v. 15, n. 29, p. 70-80, 2018.

MERRILD, H.; LARSEN, A. W.; CHRISTENSEN, T. H. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances. **Waste Management**, 2012.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTIC). BRASIL. **Método da análise de despacho**. [Online]. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-

br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/metodo-da-analise-de-despacho. Acesso em: 23 jun. 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTIC). BRASIL. **Portaria nº 2.099, de 19 de abril de 2017**. Brasília, DF: Ministério do Estado da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação [2017]. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/migracao/Portaria_MCTIC_n_2099_de_19042017.html. Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Painel: Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos**. *In*: Saneamento: SNIS. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/rs. Acesso em: 6 fev. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Histórico Mundial.** Disponível em **https://antigo.mma.gov.br/educacao-ambiental/pol%C3%ADtica-nacional-de-educa%C3%A7%C3%A3o-ambiental/historico-mundial.html**. Acesso em: 01 maio 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Painel de Destinação**. *In*: SINIR. Painéis. [*S. l.*], 2019. Disponível em: https://www.sinir.gov.br/paineis/destinacao/. Acesso em: 6 fev. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Painel de Destinação**. *In*: SINIR. Painéis. [*S. l.*], 2019. Disponível em: https://www.sinir.gov.br/paineis/destinacao/. Acesso em: 6 fev. 2023.

MNISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR); SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DO SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, SNIS, 2021.

MONDELLO, G., SALOMONE, R., IOPPOLO, G., SAIJA, G., SPARACIA, S., LUCCHETTI, M. C. (2017). **Comparative LCA of Alternative Scenarios for Waste Treatment: The Case of Food Waste Production by the Mass-Retail Sector. Sustainability**, 9(5), 827. https://doi.org/10.3390/su9050827

MULYA, K. S. et al. **A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects**. **Science of the Total Environment.** Elsevier B.V., 20 jul. 2022.

NEOENERGIA. **Tabela de Tarifas de Energia Elétrica. Resolução Homologatória nº 2.861 de 27 de abril de 2021**. Disponível em:

https://www.neoenergia.com/documents/d/brasilia/01_nbsb_tarifas_energia_eletrica_grupo b_nov_2022_reh3134-pdf-1?download=true. Acesso em: 10/06/2023.

NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: Implementação de aplicativo computacional**. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Campo Grande, MT, 2009.

OLIVEIRA, Daniel; LENZ, Maria Heloisa. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

OLIVEIRA, R. B (2019). **Análise do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Orgânicos pela Metodologia Avaliação do Ciclo de Vida: Estudo de Caso sobre Restaurantes no Distrito Federal**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, número de páginas p.107.

PEAK CO2 & HEAT-TRAPPING EMISSIONS, CLIMATE CENTRAL. Disponível em: <https://www.climatecentral.org/climate-matters/peak-co2-heat-trapping-emissions>.

PEREIRA, Agostinho; HORN, Luiz. **RELAÇÕES DE CONSUMO**: **Meio ambiente**. Caxias do Sul: Editora da Universidade de Caxias do Su, 2009. 232 p. ISBN 978-85-7061-559-6.

PIMENTEL, WASHINGTON. **DIREITO FUNDAMENTAL AO DESENVOLVIMENTO E AO MEIO AMBIENTE**: Coleta seletiva e Reciclagem como instrumento de implementação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Orientador: Maria do Socorro Almeida Flores. 2020. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Direto) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

POTT, CRISLA; ESTRELA, CARINA. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *In*: PIMENTEL, WASHINGTON. **Dilemas ambientais e fronteiras do conhecimento II**: Estudos Avançados. 89. ed. Rio Grande do Sul: [*s. n.*], 2017. v. 31, cap. Dilemas ambientais e fronteiras do conhecimento II, p. 271-283.

PROBIOGAS; JENDE, Oliver et al. BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 83 p. Il. (Desenvolvimento do mercado de biogás; 2).

QUEIROZ, Maria E. A. de; BRAGA, Carolina A. S.; ANDRADE JÚNIOR, Ednilton T. de. **Incineração de resíduos: uma avaliação dos impactos ambientais e da saúde**.

Revista Brasileira de Epidemiologia, v. 10, n. 3, p. 409-420, 2007. Disponível em: https://www.scielosp.org/article/rbepid/2007.v10n3/409-420/. Acesso em: 01 maio 2023.

QUINTERO-HERRERA, S. et al. **The use of broccoli agro-industrial waste in dairy cattle diet for environmental mitigation**. Cleaner Environmental Systems, v. 2, 1 jun. 2021.

RAZZA, F., FIESCHI, M., DEGLI INNOCENTI, F., BASTIOLI, C. (2009). **Compostable cutlery and waste management: An LCA approach. Waste Management**, 29, 1424-1433.

ROSE, JULIANA LUNDGREN; MAHLER, CLÁUDIO FERNANDO; IZZO, RONALDO LUIS DOS SANTOS. **Comparison of the methane oxidation rate in four media**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 803–812, 2012. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100- 06832012000300011.

ROSSI, E. et al. **Environmental impacts of dry anaerobic biorefineries in a Life Cycle Assessment (LCA) approach**. Journal of Cleaner Production, v. 371, 15 out. 2022.

SAIDUR, R., ABDELAZIZ, E. A., DEMIRBAS, A., HOSSAIN, M. S., MEKHILEF, S. **Sustainable Treatment and Recycling of Municipal Solid Waste**. Environmental Science and Technology, v. 44, n. 8, p. 2671-2677, 2010.

SANTOS, H. A. D. S. et al. **Panorama Geral das Condições de Funcionamento dos Aterros Sanitários do Brasil com Base no SNIS (2017)**. Fortaleza: [s.n.]. Disponível em: <www.firs.institutoventuri.org.br>.

SATHIANATHAN, M. A. **Bio-gas : achievements & challenges** . 1. ed. New Delhi: Association of Voluntary Agencies for Rural Development, 1975.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA). Compostagem. São Paulo: SMA, 2017. Disponível em: **https://www.ambiente.sp.gov.br/qualidadeambiental/files/2017/05/Compostagem-2017.pdf**. Acesso em: 01 maio 2023.

SERVIÇO DE LIMPEZA URBANA DO DISTRITO FEDERAL (SLU). Relatório Anual 2021. Disponível em: https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2022/06/Relatorio-ANUAL-ATUALIZADO.pdf. Acesso em: 20 jan. 2023.

SILVA, V. A. O. (2018). **Análise de alternativas para minimização de impactos no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos – estudo de caso no Distrito Federal**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 81 p.

SILVA, V. **Análise do Sistema de Tratamento do Resíduo Sólido Orgânico de Restaurante Universitário**. *In*: Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, 30., 2019, São Paulo. **Anais** [...] Brasília, 2019. p. 1 – 10.

SILVA, V. L., TEIXEIRA, T., FRANCISCO, A. C. DE, PICININ, C. T., KOVALESKI, J. L., PAGANI, R. N. (2019). **Vantagens, barreiras e estratégias para economia circular: uma abordagem teórica**. Exacta, 17(4), 238-255. Recuperado de Universidade Nove de Julho.

SILVA, V.; CONTRERAS, F.; BORTOLETO, A. P. **Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasilia, Brazil**. Journal of Cleaner Production, v. 279, 10 jan. 2021.

SILVA-MARTÍNEZ, R. D. et al. **High solid and wet anaerobic digestion technologies for the treatment of the organic fraction of municipal solid wastes and food wastes: A comparative case study in Brazil**. Bioresource Technology Reports, v. 21, p. 101306, 2023.

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Emissões Totais**. *In*: Emissões. [*S. l.*], 2021. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission. Acesso em: 6 fev. 2023.

SOARES, F.A.R; SILVA, C.M. Sustentabilidade e economia circular: implicações para retomada verde. Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 9, n. 1, p. 110-128, 2020.

SULIS, F. et al. **Recognizing the wealth of non-marketable food in distribution centres: The environmental benefits of donation**. Journal of Cleaner Production, v. 318, 10 out. 2021.

TAUBER, J.; PARRAVICINI, V.; SVARDAL, K.; KRAMPE, J. **Quantifying methane emissions from anaerobic digesters.** Water Science & Technology, v. 80, n. 9, p. 1654-1661, 2019.

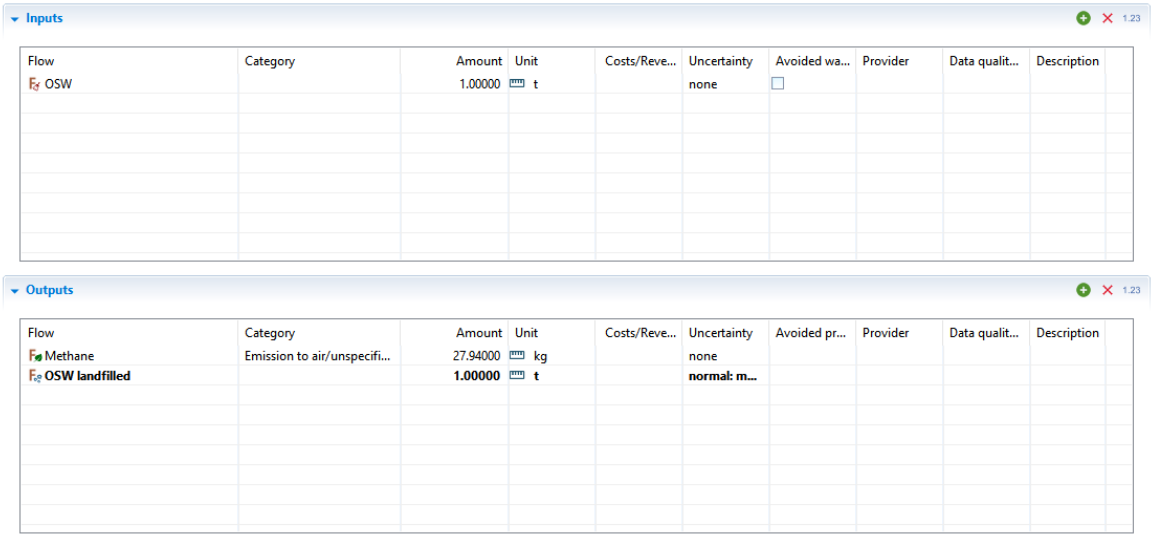
ZHOU, H. et al. **Decarbonizing university campuses through the production of biogas from food waste: An LCA analysis**. Renewable Energy, v. 176, p. 565–578, 1 out. 2021.

APÊNDICE A – RESULTADOS ACV CORRESPONDENTE A TODAS AS CATEGORIAS DE IMPACTOS DO MÉTODO CML-IA BASELINE PARA CADA CENÁRIO

Categoria de impacto	Unidade	Valor por cenário		
		1	2	3
Depleção Abiótica	kg Sb eq	0,00	0,00	0,00
Depleção Abiótica (combustível fóssil)	MJ	252,56	30,62	5,16
Acidificação	kg SO2 eq	0,08	0,01	0,00
Eutrofização	kg PO4 eq	0,02	0,17	0,00
Ecotoxicologia Aquática de Água Doce	kg 1,4-DB eq	2,98	0,93	0,61
Aquecimento Global (GWP100)	kg CO2 eq	798,74	441,26	56,52
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	7,39	1,24	0,46
Ecotoxicologia Aquática Marinha	kg 1,4-DB eq	5997,41	1316,72	531,71
Depleção de Ozônio (ODP)	kg CFC-11 eq	0,00	0,00	0,00
Oxidação Fotoquímica	kg C2H4 eq	0,17	0,06	0,01
Ecotoxicologia Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,03	0,01	0,01

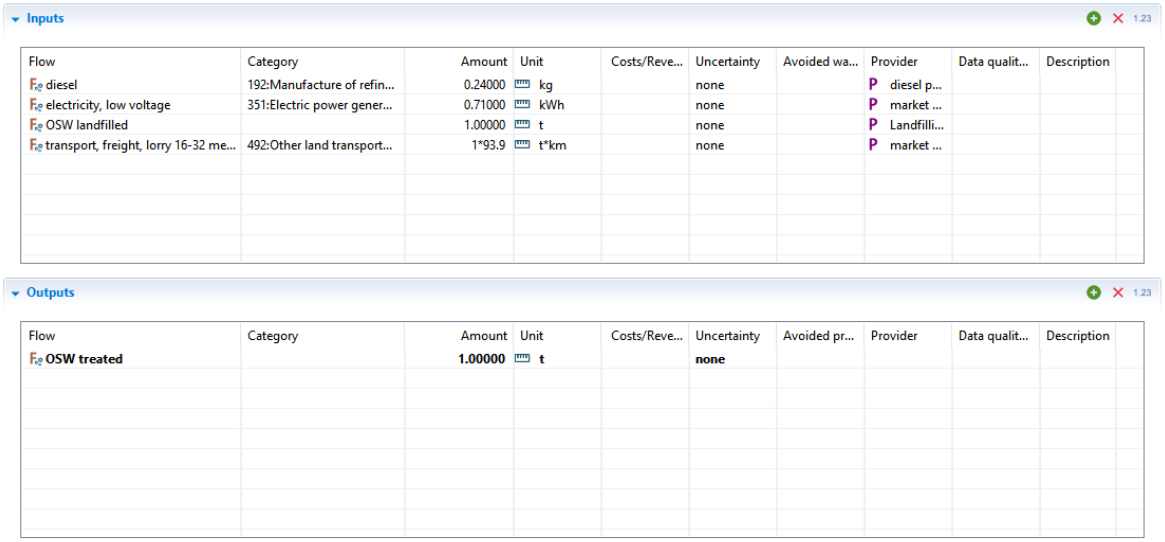
Na Figura 20 são apresentadas as entradas (*inputs)* e saídas (*outputs)* do sistema do cenário 1 apenas para o processo de aterramento.

Figura 20. Definição das entradas e saídas no cenário 1 - aterramento.



Na Figura 21 são apresentadas as entradas (*inputs)* e saídas (*outputs)* do sistema do cenário 1 para o consumo de eletricidade, diesel e o uso do transporte.

Figura 21. Definição das entradas e saídas no cenário 1 - eletricidade, diesel e transporte.



Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data qualit...	Description
diesel	192:Manufacture of refin...	0.24000	kg		none		P diesel p...		
electricity, low voltage	351:Electric power gener...	0.71000	kWh		none		P market ...		
OSW landfilled		1.00000	t		none		P Landfilli...		
transport, freight, lorry 16-32 me...	492:Other land transport...	1*93.9	t*km		none		P market ...		

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Description
OSW treated		**1.00000**	**t**		**none**				