UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM ESTUDO DA COLETA SELETIVA DO DISTRITO FEDERAL

MICHELLE JULIENY RODRIGUES FONSECA

ORIENTADOR: FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA

COORIENTADOR: VICTOR ALEXSANDER OLIVEIRA SILVA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2023

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

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UM ESTUDO DA COLETA SELETIVA DO DISTRITO FEDERAL

MICHELLE JULIENY RODRIGUES FONSECA

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:

_____

Francisco Javier Contreras Pineda, Ph.D. (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)

_____

Victor Alexsander Oliveira Silva, Mestre (SLU/ DF)
(CO-ORIENTADOR)

_____

Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Doutor (ENC / UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

Thiago Oliveira Rodrigues, Doutor (IBICT)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 19 DE DEZEMBRO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

FONSECA, MICHELLE JULIENY RODRIGUES FONSECA
Avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: um estudo da coleta seletiva do Distrito Federal.
xiii, 104 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2017)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.ACV	2. RSU
3. GEE	4. Gestão Integrada
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FONSECA, M. J. R. (2023). Avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: um estudo da coleta seletiva do Distrito Federal. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Michelle Julieny Rodrigues Fonseca
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação do ciclo de vida do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: um estudo da coleta seletiva do Distrito Federal.
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.

Michelle Julieny Rodrigues Fonseca
michellefonseca.rodrigues@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu pai e guia constante, por possibilitar minha entrada na faculdade e conceder discernimento, saúde e coragem para enfrentar diversas situações.

À minha amada família, que compartilhou meu sonho da graduação, estando ao meu lado em todos os instantes. Mãe Maria Aparecida, pai Carlos e irmã Ana Carla, obrigada por toda confiança, apoio, força, compreensão e carinho. Agradeço por incentivarem meus estudos, mesmo frente a diferentes obstáculos ou quando a saudade batia.

Vovó Juva, tia Lourdes, demais familiares e igreja, meu profundo agradecimento por suas orações e incentivo.

Aos amigos e família do coração, Stefanny, Rayssa, Felipe, Kassia e Brenda, obrigada por estarem presentes, por todos os momentos alegres e pela amizade que tornou essa jornada mais leve.

À incrível equipe COGEO/SLU, em especial Douglas, Murilo e Victor, por me receberem de braços abertos, me orientarem durante o estágio e por não pouparem apoio. Também agradeço ao SLU pela disponibilização de informações para a realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Prof. Francisco Contreras e Victor Alexsander, agradeço pela disponibilidade, pelos conselhos, cuidado e pelas importantes orientações, fundamentais para a realização deste trabalho.

À UnB, que proporcionou ambientes enriquecedores, excelentes professores e oportunidades de aprendizado, contribuindo significativamente para o meu amadurecimento como pessoa e cidadã.

RESUMO

A expressiva geração de resíduos sólidos urbanos configura-se como um desafio contemporâneo, com a acumulação inadequada desses materiais e o manuseio incorreto, desencadeando impactos significativos no meio ambiente e na sociedade. Neste contexto, esta pesquisa parte do pressuposto de que a coleta seletiva é uma solução viável para a redução da quantidade de resíduos destinados à disposição final, desempenhando um papel estratégico na gestão integrada de resíduos. Com o objetivo principal de analisar o sistema de coleta seletiva no Distrito Federal, enfatizando a quantificação das emissões de gases de efeito estufa relacionadas à gestão de resíduos sólidos urbanos, foram concebidos e avaliados três cenários distintos, direcionados a examinar as emissões relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade, bem como as provenientes do processo de compostagem e disposição final. Desta forma, no primeiro cenário, delinearam-se as etapas do atual sistema de coleta seletiva, compreendendo transporte, tratamento nas Instalações de Recuperação de Resíduos e disposição final no Aterro Sanitário de Brasília. Nos cenários 2 e 3, foram incorporadas as fases anteriores, com a inclusão do desvio dos resíduos orgânicos do aterro para compostagem (cenário 2) e a redução dos rejeitos, considerando-se uma melhoria na eficiência da quantidade de resíduos direcionados para aproveitamento (cenário 3). O método de análise adotado foi a Avaliação do Ciclo de Vida, com base nas diretrizes estabelecidas pela ISO 14.040, além de considerações provenientes de estudos de avaliação do ciclo de vida com foco em resíduos sólidos urbanos. Os resultados e análises destacaram que os maiores consumos de energia estão associados à fase de transporte, enquanto as emissões de CO_2 equivalente são mais significativas durante o processo de aterramento. Além disso, observou-se um baixo aproveitamento dos resíduos coletados, influenciando na quantidade de rejeitos e nas emissões de gases de efeito estufa decorrentes da decomposição. Ao comparar os cenários, percebeu-se que para 1 tonelada de resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva, a inclusão da compostagem (cenário 2) resulta em uma redução de 5 kg de CO_2 equivalente, com os ganhos não sendo tão expressivos devido ao aumento dos consumos de energia. Por outro lado, no cenário 3, onde há um melhor aproveitamento dos materiais, houve uma redução de 13% dos materiais aterrados, resultando em uma diminuição de 93 kg de CO_2 equivalente.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida (ACV); resíduos sólidos urbanos (RSU); gases efeito estufa (GEE); gestão integrada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 5

2.1. OBJETIVO GERAL 5

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 6

3.2. ELEMENTOS DO GERENCIAMENTO 9

3.2.1. Geração 9

3.2.2. Composição e acondicionamento 11

3.2.3. Coleta e transporte 13

3.2.4. Reaproveitamento e tratamento 15

3.2.5. Disposição final 16

3.3. COLETA SELETIVA 18

3.4. GERENCIAMENTO NO DISTRITO FEDERAL 22

3.5. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E IMPACTOS AMBIENTAIS 24

3.6. MODELOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS APLICADOS AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS 26

3.7. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 28

3.7.1. Avaliação do ciclo de vida 28

4. METODOLOGIA 44

4.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 44

4.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 44

4.2.1. Definição dos cenários 45

4.2.2. Objetivos e escopo 49

4.2.3. Construção do inventário do ciclo de vida 50

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 60

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO DISTRITO FEDERAL 60

5.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA 63

5.2.1. Apresentação dos dados 63

5.2.3. Consumo de combustível fóssil 70

5.2.4. Consumo de eletricidade 72
5.2.5. Compostagem 73
5.2.6. Disposição final 74
5.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO 75
5.4. INTERPRETAÇÃO 78
5.4.1. Análise de sensibilidade 82
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
I. ANEXO A 100
II. ANEXO B 102
III. ANEXO C 104

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Geração total de RSU (t/dia) nas regiões e no Brasil, 2010 a 2018..... 10
Figura 3.2 - Estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados pela coleta convencional no Brasil em 2020..... 12
Figura 3.3 - Veículos para coleta de resíduos..... 14
Figura 3.4 - Esquema aterro sanitário..... 17
Figura 3.5 - Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (t/ano e %) – 2022.. 18
Figura 3.6 - Escopo da minimização e da prevenção de resíduos no contexto do ciclo de vida dos produtos..... 19
Figura 3.7 - Esquema simplificado de um projeto integrado de reciclagem 21
Figura 3.8 - Fluxograma dos resíduos sólidos domiciliares 24
Figura 3.9 - Fases da avaliação do ciclo de vida 29
Figura 3.10 – Processos de alocação 33
Figura 3.11 - Fronteiras do sistema para o Inventário do Ciclo de Vida dos RS 36
Figura 3.12- Categorias de impacto utilizadas em diferentes estudos com temática em RSU 38
Figura 3.13 – Exemplos de categorias midpoint e endpoint..... 40
Figura 4.1- Diagrama Cenário 1 46
Figura 4.2- Diagrama Cenário 2 47
Figura 4.3 – Diagrama Cenário 3 48
Figura 4.4 – Limites do sistema..... 50
Figura 4.5 – Exemplo de distribuição da unidade funcional no decorrer de cada processo 51
Figura 5.1 – Caminhões utilizados na coleta seletiva..... 61
Figura 5.2 – Representatividade das coletas convencional e seletiva no ano de 2022..... 63
Figura 5.3– Composição gravimétrica de resíduos da coleta seletiva do Distrito Federal.. 65
Figura 5.4 - Balanço da contribuição dos cenários para a emissão de GEE (1 tonelada de RSU) 75
Figura 5.5 - Resíduos processados em cada etapa do fluxo 78
Figura I.1 – Localização das unidades operacionais 101
Figura III.1– Representatividade do consumo de eletricidade e diesel em cada etapa..... 104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos 11
Tabela 3.2 - Unidades funcionais adotadas pelos estudos 31
Tabela 3.3 - Categorias de impacto e indicadores ambientais para a AICV 39
Tabela 3.4 – Métodos para a avaliação e impactos na ACV 41
Tabela 4.1 - Taxa de aproveitamento 52
Tabela 4.2 – Fatores de consumo e emissão de GEE 59
Tabela 5.1 – Toneladas de resíduos provenientes da coleta seletiva por RA - jul/2022 a jun/2023 64
Tabela 5.2 – Quantidade e destino dos rejeitos descartados pelas IRR 66
Tabela 5.3 – Composição gravimétrica dos rejeitos para os diferentes cenários 66
Tabela 5.4 – Quantitativo de resíduos nas diferentes etapas 67
Tabela 5.5 – Deslocamento durante a coleta e até a IRR correspondente 68
Tabela 5.6 – Deslocamento entre IRR e transbordo 69
Tabela 5.7 – Deslocamento do transbordo ao aterro 69
Tabela 5.8 – Deslocamento da IRR até unidade de compostagem (Ceilândia) 70
Tabela 5.9 – Consumo de combustível para as diferentes trajetórias 70
Tabela 5.10 - Emissões provenientes do consumo de combustível de cada percurso 71
Tabela 5.11 – Consumo de combustível nas unidades operacionais 71
Tabela 5.12 - Emissões provenientes do consumo de combustível nas unidades operacionais 72
Tabela 5.13 - Consumo de eletricidade 72
Tabela 5.14- Emissões de CO_2 decorrentes do consumo de eletricidade 73
Tabela 5.15 – Degradação da Matéria Orgânica no processo de compostagem 73
Tabela 5.16 – Emissão de N2O no processo de compostagem 74
Tabela 5.17 – Parâmetros para determinação da emissão de metano no aterro 74
Tabela 5.18 – DOCj e K para os diferentes tipos de matérias 74
Tabela 5.19 – Emissões decorrentes do aterramento de resíduos 75
Tabela 5.20 - Balanço de entradas e saídas no tratamento de 1 tonelada de RSU da coleta seletiva em cada cenário 76
Tabela 5.21- Comparação de consumo e emissão 83
Tabela I.1 – Descrição da infraestrutura das IRRs 100
Tabela II.1 - Emissões de CO_2 eq cenário 1 (1 t/RSU coleta seletiva) 102

Tabela II.2 - Emissões de CO_2 eq cenário 2 (1 t/RSU coleta seletiva)..... 102
Tabela II.3 - Emissões de CO_2 eq cenário 3 (1 t/RSU coleta seletiva)..... 103

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 4.1 53
Equação 4.2 54
Equação 4.3 54
Equação 4.4 55
Equação 4.5 55
Equação 4.6 56
Equação 4.7 56
Equação 4.8 57
Equação 4.9 58

LISTA DE ABREVIAÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Análise do Ciclo de Vida Social
ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
AECV	Custeio do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANCAT	Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
ASB	Aterro Sanitário de Brasília
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CH_4	Gás Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
COGEO	Coordenação de Geoinformações
CS	Coleta Seletiva
DF	Distrito Federal
ENDPOINT	Ponto Final
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIRS	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
IRR	Instalações de Recuperação de Resíduos
ISO	Organização Internacional Para Normalização
Km	Quilometro
LCA	*Life Cycle Assessment*
LEV	Local de Entrega Voluntária de Resíduos Sólidos
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDR	Ministério de Desenvolvimento Regional
MIDPOINT	Ponto Médio
MMA	Ministério do Meio Ambiente
N_2O	Óxido Nitroso
NBR	Norma Brasileira
PDGIR	Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PDGIRS	Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PEV	Ponto de Entrega Voluntária de Resíduos Sólidos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMGIRS	Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RAS	Regiões Administrativas
RDO	Resíduos Sólidos Domiciliares
RPU	Resíduos de Limpeza Urbana
RSD	Resíduos Sólidos Domiciliares
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCIELO	*Scientific Electronic Library Online*
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases
SGI	Sistema de Gestão Integrado
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SNIS-RS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - Resíduos Sólidos
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
t	Toneladas
UF	Unidade Funcional
Urban-ESA	Grupo de Pesquisa em Análise de Sistemas
UTMB	Unidades de Tratamento Mecânico Biológico

1. INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, a gestão de resíduos sólidos urbanos se destaca como um desafio significativo, e o Brasil não é exceção a essa realidade. Levantamentos indicam que fatores como padrões de consumo, costumes sociais, entre outros, têm contribuído para o aumento na quantidade de resíduos sólidos urbanos (SLU, 2022a).A convergência desses fatores, associada ao crescimento econômico e à industrialização, resulta no aumento da quantidade de materiais descartados, muitos dos quais apresentam composições de difícil degradação (SNS, 2021b).

De acordo com dados da Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2022 o Brasil registrou uma geração total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, equivalendo a uma média diária de 224 mil toneladas. Desse volume gerado, observa-se que 61% dos resíduos coletados foram dispostos em aterros sanitários, com esta ação sendo realizada sem nenhum tipo de pré-processamento na grande maioria dos territórios brasileiros (ABRELPE, 2022; SNIS, 2021).

Num panorama geral, a prática de descarte de resíduos tem se tornado um desafio devido aos danos e à poluição ambiental, levando a alterações de características do solo, da água e do ar, por meio de processos como geração de chorume e emissão de poluentes ao longo de várias décadas (Souza et al., 2019, Nascimento e Filho, 2021). Nesse contexto, torna-se evidente que a gestão inadequada acarreta em impactos ambientais e na saúde da população, com resíduos sólidos compondo um papel significativo para o processo de mudanças climáticas (SNS, 2021b).

A análise das emissões de gases de efeito estufa no Brasil revela que o setor de resíduos contribui com 4% do total de emissões em 2022, equivalendo a 91,3 milhões de toneladas de CO_2 equivalente. Do total, 65% são provenientes da disposição final de resíduos sólidos (SEEG, 2023). Reichert e Mendes, (2014), afirmam que uma gestão eficiente possibilita às autoridades municipais reduzir a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) para a atmosfera, principalmente através da escolha adequada de tecnologias de tratamento na destinação final dos resíduos.

Frente a este problema, a Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos (Lei 12.305/2010) estabelece uma hierarquização no gerenciamento dos resíduos sólidos, na qual deve-se priorizar, em ordem, a "não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos" (Brasil, 2010).

Nesse sentido, a coleta seletiva se apresenta como solução indispensável e uma forma viável para reduzir a quantidade de resíduos destinados à disposição final, desempenhando um papel estratégico na gestão integrada de resíduos e na adoção da economia circular. Dentre outros, a ação de coleta seletiva promove a conscientização ambiental, estimulando a redução do consumo e do desperdício, reinserindo na cadeia produtiva materiais que substituirão o uso de matérias-primas virgens e de recursos naturais renováveis e não renováveis (Miranda e Mattos, 2018).

Integrando-se ao conceito da economia circular, a coleta seletiva abraça diversas finalidades, permitindo o aproveitamento dos materiais coletados por meio de atividades como reciclagem, reaproveitamento e outras aplicações inovadoras (Santos, 2020). Essa abordagem versátil pode ser direcionada para objetivos diversos, como a obtenção de resíduos propícios para aproveitamento energético, a produção de fertilizantes a partir da compostagem de resíduos orgânicos, ou mesmo, como visto no Distrito Federal, para a comercialização e processamento de materiais como plástico, papel e alumínio, reintegrando-os ao ciclo de vida na forma de novos produtos (Abreu, 2016).

No entanto, ao examinar a situação do gerenciamento de resíduos, os dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) para 2021 indicam que apenas 32,0% dos municípios brasileiros contam com algum tipo de coleta seletiva (SNIS, 2021). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), esse sistema é incipiente na maior parte do país, e mesmo nos locais que o adotam, a execução muitas vezes é inadequada, resultando no acúmulo de resíduos misturados e diminuindo a taxa de recicláveis aproveitáveis (MMA, 2022).

No contexto específico do Distrito Federal, a implementação da coleta seletiva abrange 33 das 35 Regiões Administrativas. Contudo, até o ano de 2022, apenas uma parcela ínfima, correspondente a 6% do total de resíduos gerados pela população, foi direcionada

para o processo seletivo. Além disso, dos resíduos coletados seletivamente, somente 46% foram efetivamente reintegrados à cadeia produtiva (SLU, 2022d).

Diante desse panorama de geração de resíduos e preocupações ambientais, torna-se imprescindível adotar estratégias de gerenciamento que visem à sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, a utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se destacado como uma ferramenta essencial para quantificar os impactos ambientais associados a um produto ou processo (Khandelwal *et al.*, 2019).

Possuindo a capacidade de avaliação abrangente não somente dos impactos resultantes da decomposição dos resíduos, mas também do balanço de todo o ciclo do processo, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, transporte e chegando ao reaproveitamento pós-consumo (ABNT, 2009a; Dai-Prá *et al*., 2018) este método ganha destaque, com aumento significativo de pesquisas o adotando em diferentes regiões do mundo (Mattos *et al.*, 2022a; Santos *et al.*, 2022).

Diante da complexidade apresentada, este estudo surge com o propósito de analisar o sistema de coleta seletiva no Distrito Federal, enfatizando a quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à gestão de resíduos sólidos urbanos provenientes desse processo. Para alcançar esse objetivo, foram concebidos e examinados três cenários, direcionados a avaliar os impactos decorrentes das distintas fases da coleta seletiva, buscando abranger emissões de GEE ao observar os sistemas relacionados ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade, bem como as emissões resultantes do processo de compostagem dos resíduos orgânicos e disposição final.

Dessa forma, no primeiro cenário, delinearam-se as etapas do atual sistema de coleta seletiva do Distrito Federal, que compreende transporte, tratamento nas Instalações de Recuperação de Resíduos (IRRs) e disposição final no Aterro Sanitário de Brasília. Nos cenários 2 e 3, foram incorporadas as fases anteriores, com a inclusão do desvio dos resíduos orgânicos do aterro para compostagem (cenário 2) e a redução dos rejeitos, mediante uma melhoria na eficiência da quantidade de resíduos direcionados para aproveitamento (cenário 3). A análise comparativa entre as alternativas delineadas em cada cenário foi realizada por meio do método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), no qual buscou-se obter informações detalhadas sobre o ciclo de vida dos resíduos sólidos urbanos originados da coleta seletiva do Distrito Federal, incluindo a identificação dos

principais pontos de emissão e a proposição de melhorias que possam minimizar o impacto ambiental e oferecer um suporte para o gerenciamento eficiente de resíduos, considerando-se também, a possibilidade dos resultados poderem servir como uma fonte de informações para a preparação de novos contratos de reciclagem e triagem da região. Considerando as diversas etapas relacionadas aos resíduos, estabeleceu-se o limite de análise do "portão ao túmulo", com a avaliação iniciando no momento em que o material se torna resíduo até o instante em que é levado para a disposição final.

Para além, a estrutura desta pesquisa abrange seis capítulos, cada um abordando diferentes aspectos relacionados ao tema central. O primeiro capítulo constitui a introdução, apresentando as ideias iniciais do estudo. O segundo capítulo aborda a definição dos objetivos gerais e específicos que orientam este trabalho. No terceiro, realiza-se uma revisão bibliográfica e um levantamento teórico para proporcionar uma visão abrangente do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e da coleta seletiva no Brasil. São discutidos conceitos e apresentados atos normativos que regem essas áreas, explorando também a estrutura da avaliação do ciclo de vida (ACV). O quarto capítulo apresenta a metodologia, descrevendo parâmetros e etapas essenciais para a avaliação do ciclo de vida. O capítulo cinco foca no caso do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Distrito Federal, com ênfase na coleta seletiva, apresentando dados, fontes, resultados e considerações obtidos pela ACV. Por fim, o sexto capítulo encerra o estudo, destacando principais observações percebidas no decorrer do estudo.

Adicionalmente, destaca-se que este estudo representa uma extensão das pesquisas realizadas pelo grupo *Urban-ESA,* que se dedica à investigação de temas urbanos e ambientais relacionados aos Sistemas de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Afiliado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental - PTARH na Universidade de Brasília, o grupo conta com membros do laboratório de pesquisa, incluindo também alunos de graduação de diversos departamentos da Faculdade de Tecnologia. Dentre as diversas pesquisas, o grupo tem se concentrado na modelagem de diversos cenários com o propósito de analisar o potencial impacto das emissões de gases de efeito estufa decorrentes das várias opções de tratamento de resíduos sólidos municipais. Essa dedicação não apenas contribui para o avanço do conhecimento no setor de resíduos, mas também desempenha um papel fundamental ao identificar indicadores de sustentabilidade e desempenho ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é analisar o sistema de coleta seletiva no Distrito Federal, com foco na quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar o sistema de gerenciamento da coleta seletiva dos resíduos sólidos urbanos no Distrito Federal.
- Explorar cenários de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e da coleta seletiva considerando as diferentes frações dos resíduos.
- Identificar os principais pontos de emissão de gases efeito estufa no sistema de coleta seletiva do Distrito Federal, a partir do método de avaliação do ciclo de vida.
- Elucidar ações com potencial para redução das emissões de gases efeito estufa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O marco legal conceitualiza o saneamento básico como um conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais (Brasil, 2020), com a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos sendo exemplos dessa aplicação.

Como um todo, o saneamento básico é uma pauta atual entre pesquisadores e estudiosos da área de gerenciamento de resíduos sólidos, sendo estudado e almejado em diferentes cenários e sociedades. Vinculado ao controle, distribuição de recursos básicos e bem-estar da população, o acesso aos seus serviços é essencial para se garantir a saúde, prevenção de doenças e do meio ambiente e redução das desigualdades sociais (Brasil, 2020).

No contexto específico do Brasil, o setor de saneamento básico e seus componentes passaram por uma revisão, delineada pelo marco legal estabelecido na Lei n° 14.026, promulgada em 15 de julho de 2020. No decorrer do artigo 3° desta lei, atribui-se à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a responsabilidade de implementar a Política Nacional voltada aos serviços públicos de saneamento básico, bem como estabelecer diretrizes regulatórias relacionadas a esses recursos (Brasil, 2020).

Demostrando coerência com sua denominação, a limpeza e manejo de resíduos sólidos, dizem respeito à remoção física e à higienização de áreas ocupadas por (estes) resíduos sólidos urbanos e consequentemente prevenção à proliferação de doenças e vetores (Brasil, 2020). Corroborando o assunto, a Secretaria Nacional de Saneamento (SNS, 2021a) indica que esta aplicação constitui um conjunto de atividades e ações de manutenção de infraestruturas que possibilitam o estado de limpeza adequado sem prejudicar o ambiente circundante.

Na mesma esfera, o termo "resíduos sólidos" refere-se a materiais ou substâncias provenientes de atividades humanas, descartados em estados sólidos, semissólidos, líquidos ou na forma de gases, que são incompatíveis com as redes de esgotamento sanitário, podendo ser classificados de variadas formas e levando em consideração diversos fatores, com a classe escolhida variando de acordo com os objetivos da implementação ou ação em que a classificação será adotada (Brasil, 2010).

Dentre vários agrupamentos, os resíduos podem ser classificados conforme sua natureza física, (seco e molhado), composição química (orgânicos e inorgânicos) (Caopma, 2012), periculosidade, (perigosos e não perigosos) e origem (Brasil, 2010), sendo a última, uma das mais utilizadas e podendo ser dividida em grupos, tais como domiciliar; público ou de limpeza urbana, serviços de saúde, da construção civil, etc.

Como um todo, um mesmo material pode receber diferentes classificações, com seus significados podendo divergir a depender da localidade, critérios e infraestrutura do ambiente. Neste trabalho, dados os objetivos do estudo, optou-se pela classificação quanto à origem, focando nos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva, que agrupa descartes humanos de caráter domiciliar, comercial e serviços de pequeno porte e da limpeza urbana tais como papel, plástico, papelão, metal e isopor (SLU, 2018).

Considerando o panorama da geração de resíduos sólidos urbanos, observa-se que o descarte de materiais tem sido uma prática constante e intrínseca à existência humana, marcado por diferentes períodos. Inicialmente, o volume de resíduos era relativamente pequeno, consistindo-se principalmente de materiais de origem orgânica, sendo degradados pela própria natureza. No entanto, com o surgimento de assentamentos urbanos e do desenvolvimento de diferentes áreas do conhecimento, houve um significativo aumento na produção e no descarte. Consequentemente, esses resíduos passaram a ser eliminados de maneiras inadequadas a céu aberto, enterrados, queimados ou lançados aos cursos d'água (Barciotte 1994, apud Coelho, 2019).

Com o passar do tempo, a expansão dos polos urbanos e o crescimento das concentrações populacionais se intensificaram. Esse fenômeno, combinado ao contínuo desenvolvimento das ciências e tecnologias, resultou no surgimento de novos produtos, no aumento do consumo e na adoção de padrões de vida elevados, reverberando-se na incapacidade de o meio ambiente tratar, naturalmente todo o volume descartado. Como resultado, a gestão dos resíduos sólidos enfrenta desafios cada vez mais complexos e exigentes, demandando abordagens mais sofisticadas e eficazes (Szigethy e Antenor, 2021).

Buscando superar este obstáculo, foi necessário regulamentar o gerenciamento de resíduos sólidos, com ele sendo respaldado por uma série de leis e marcos normativos, que englobam desde o poder público, sociedade civil e empresarial (Gonçalves-Dias,

2015). Dentre as principais legislações, tem-se no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) .

Elucidando as regulamentações, Soler e Filho (2019, p. 63), discutem os resíduos sólidos na amplitude das esferas nacional, estadual e municipal, indicando que "a operacionalização das ações previstas na PNRS foi pensada para ser efetivada por meio de Planos, a cargo dos diversos atores responsáveis". Conforme afirmado pelos autores, é essencial que os estados, o Distrito Federal, os municípios e os consórcios públicos implementem Planos de resíduos sólidos. Essas entidades devem adotar abordagens regionais eficazes, com o objetivo de promover a organização, o planejamento e a execução de ações voltadas para a gestão adequada dos resíduos.

Soler e Filho (2019), explicam que, "conforme determinação da PNRS, os municípios e o Distrito Federal detêm a titularidade sobre os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos". Isso significa que os entes federados precisam garantir a efetiva prestação desses serviços em suas respectivas regiões, em conformidade com as diretrizes e metas estabelecidas pela PNRS.

Na especificidade desta pesquisa, delimitou-se como campo de estudos o Distrito Federal, que possui como um de seus atos normativos orientativos, o Plano Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PDGIRS), que tem como enfoque todos os resíduos sólidos gerados no Distrito Federal (GDF, 2018). De maneira geral esse plano visa estabelecer orientações claras, metas alcançáveis e ações concretas para assegurar que os resíduos sejam adequadamente destinados, tratados e descartados de forma apropriada. Além disso, o Plano leva em consideração as particularidades de cada tipo de resíduo e define claramente as responsabilidades atribuídas aos diversos envolvidos nesse processo, sejam eles indivíduos, empresas ou instituições públicas.

No documento em destaque, é enfatizado que a responsabilidade relacionada aos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), os quais incluem Resíduos Sólidos Domiciliares (RDO) e Resíduos de Limpeza Urbana (RPU), recai sobre o Poder Público. No entanto, realça que ao se tratar de resíduos volumosos, há um compartilhamento de responsabilidade entre o poder público e os geradores desses resíduos (GDF, 2018).

3.2. ELEMENTOS DO GERENCIAMENTO

Os termos gestão e gerenciamento são amplamente utilizados no que se refere a resíduos sólidos e embora sejam, em algumas situações, adotados como sinônimos, possuem significados distintos. Definido pela PNRS, o gerenciamento é um conceito relacionado à lógica operacional, envolvendo desde fatores administrativos, econômicos e sociais (Zanta e Ferreira, 2016), que devem ser incorporados em conjunto para a realização estratégica e adequada do manejo dos RSU (BrasiL, 2010).

Já a palavra gestão ou como nomeada pela PNRS, "gestão integrada de resíduos sólidos" (GIRS), surge como ações ou procedimentos que se relacionam ao planejamento das etapas de gerenciamento, tais como, a escolha de quais prioridades tomar na redução de resíduos, ou qual tecnologia será mais adequada na destinação final (Zanta e Ferreira, 2016). Para viabilizar essas ações conjuntas, a PNRS observa que no GIRS deve-se "considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável" (Brasil, 2010).

A ampliação do conceito de gestão integrada vem acompanhada de um conjunto de princípios que buscam, desde a adoção de medidas para se evitar danos, a ações para minimizar ou evitar a produção de resíduos sólidos urbanos, com os agentes econômicos sendo compelidos a assumir responsabilidades não apenas para prevenir danos e restaurar o meio ambiente degradado devido ao processo produtivo, mas também pelos efeitos gerados ao longo do ciclo de vida do produto (Juras e Araújo, 2012).

Conforme estabelecido pela Lei 12305/2010, o sistema de gerenciamento deve ser composto por ações exercidas direta ou indiretamente às etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final adequada dos resíduos sólidos, sendo estabelecida para cada uma, as atividades, planos, infraestrutura e instalação operacional correspondente. Para cada uma das etapas, entende-se que:

3.2.1. Geração

A geração de resíduos sólidos é observada a partir da quantidade de materiais descartados e possui uma caracterização que pode variar de uma região para outra (Ferreira Evangelista e*t al.*, 2020). Fatores como o desenvolvimento econômico de uma região, poder aquisitivo e o consumo correspondente da população, além de costumes sociais e

culturais são exemplos de fatores que podem implicar na geração de resíduos sólidos Urbana (Nascimento *et al*., 2015; SLU, 2023)

Em relação à perspectiva brasileira, tem-se uma variação da geração ao logo dos anos. Ao avaliar o panorama geração total de RSU de cada região e do país como um todo, no período de 2010 a 2018, o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2022), por meio do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, observou que a expansão desordenada das cidades, associada ao crescimento populacional e ao consumo causou um aumento expressivo na quantidade de RSU (Figura 3.1). Entre 2017 e 2018, por exemplo, todas as regiões do país apresentaram um aumento na geração de RSU, obtendo crescimento de quase 1% de um ano para o outro. Associado a este cenário, neste período a população brasileira aumentou cerca de 0,40% com a geração per capita alcançado 1,039 kg/hab/dia (MMA, 2022).

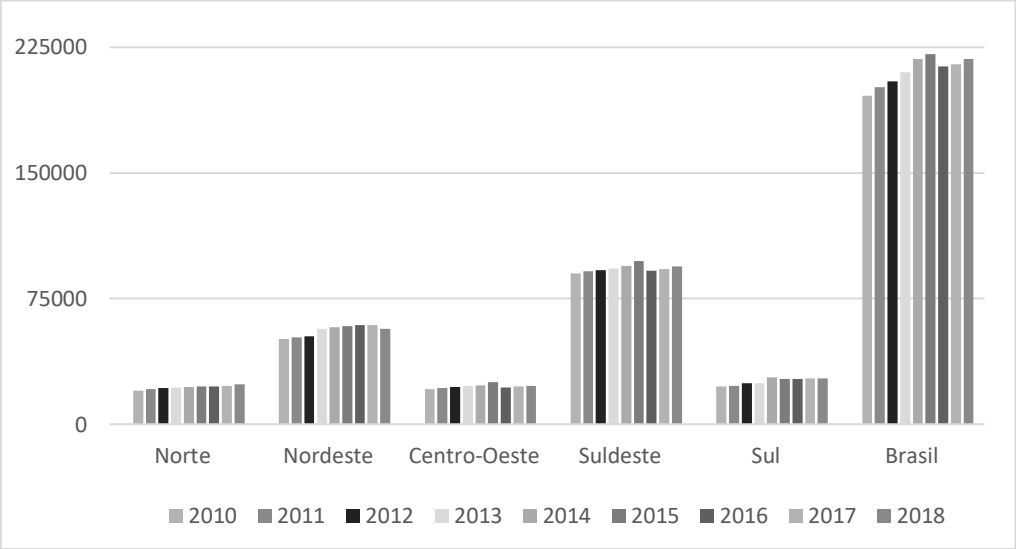


Figura 3.1 - Geração total de RSU (t/dia) nas regiões e no Brasil, 2010 a 2018 (MMA 2022, modificado)

Analisando os anos subsequentes, a ABRELPE observou a influência de fatores relacionados à COVID-19. Para o ano de 2020, a geração de RSU mostrou relação direta com o local onde atividades humanas eram desenvolvidas, com os serviços de limpeza urbana e manejo sendo afetados pelo deslocamento e concentração das atividades nos domicílios. Desta forma, para este período, a geração alcançou 225.965 toneladas diárias, com a geração per capita atingindo 1,07 kg de resíduo por dia (ABRELPE, 2021).

Em contrapartida, para ano de 2022, a imunização da população e fim do isolamento social, mudanças no poder de compra, diminuição da utilização dos serviços de delivery,

e retomada da geração de resíduos nas empresas, escolas e escritórios, levaram a uma queda na geração de resíduos, alcançado assim, um total de aproximadamente 224 mil toneladas diárias, com cada brasileiro produzindo em média, 1,043 kg de resíduos por dia (ABRELPE, 2022).

3.2.2. Composição e Acondicionamento

O termo acondicionamento refere-se aos procedimentos de armazenamento ou encapsulamento dos resíduos para o transporte (ABNT, 1993), com o recipiente sendo escolhido de acordo com a origem e tipo do resíduo. Essa fase é crucial, pois um armazenamento inadequado pode tornar o material irrecuperável, além de gerar impactos negativos no meio ambiente e na segurança da comunidade, uma vez que resíduos não perigosos podem ser contaminados pelo contato com resíduos perigosos. Por outro lado, um acondicionamento adequado facilita o processo de coleta (COPEL, 2021).

Como um todo, a escolha de armazenamento deve ser compatível com as características dos resíduos. Para tal, a composição é observada de "acordo com os componentes" tais como resíduos orgânicos, papeis e vidro, ou conforme indicado por Zanta e Ferreira (2016) em relação aos aspectos biológicos (como a capacidade do material ser metabolizado por microrganismos decompositores) e características químicas (pH, teor de umidade, poder calorifico). Esse conhecimento é essencial, visto que, por meio destes dados torna-se possível, por exemplo, definir as melhores políticas municipais, estimar a quantidade de material que poderá ser reaproveitado e entender a redução de massa nos aterros (MMA, 2022).

Concomitante ao acondicionamento, tem-se a composição gravimétrica dos resíduos, adotada para quantificar a quantidade de resíduos presentes em uma amostra, por meio do percentual de massa de cada componente.

Tabela 3.1- Exemplos básicos de cada categoria de resíduos sólidos urbanos (SLU, 2022 modificado)

Tipo de Resíduo	Classe do Resíduo
Vidro	Branco, verde, âmbar, etc.
Metal	Alumínio
	Metal Ferroso
	Outros metais

Tipo de Resíduo	Classe do Resíduo
Plástico	PET
	Plástico Duro, Mole, Filme
Papel	Papel Colorido, Branco e Misto
	Papelão
	Jornais, revistas e panfletos
Matéria Orgânica	Restos de Comida e Podas
Outros	Embalagens Longa Vida, Madeira, Isopor
	Tecido, roupas, borracha e couro
Rejeitos	Areia, terra, pedra, contaminantes biológicos (fraldas, papel higiênico, absorventes)

Conforme indicado pela Tabela 3.1, no caso dos resíduos de origem domiciliar e comercial, os componentes discriminados na composição gravimétrica são agrupados por categorias, tais como, matéria orgânica, metais, papel, papelão, plásticos e vidro. Em geral, a gravimetria pode apresentar dados em relação à percentagem em peso. A título de exemplo, como indicado pela Figura 3.2, para o Brasil, no ano de 2020, os resíduos da coleta convencional foram predominantemente compostos por matéria orgânica e plástico, com vidro e metal sendo os tipos de resíduos de menor representatividade (ABRELPE, 2020).

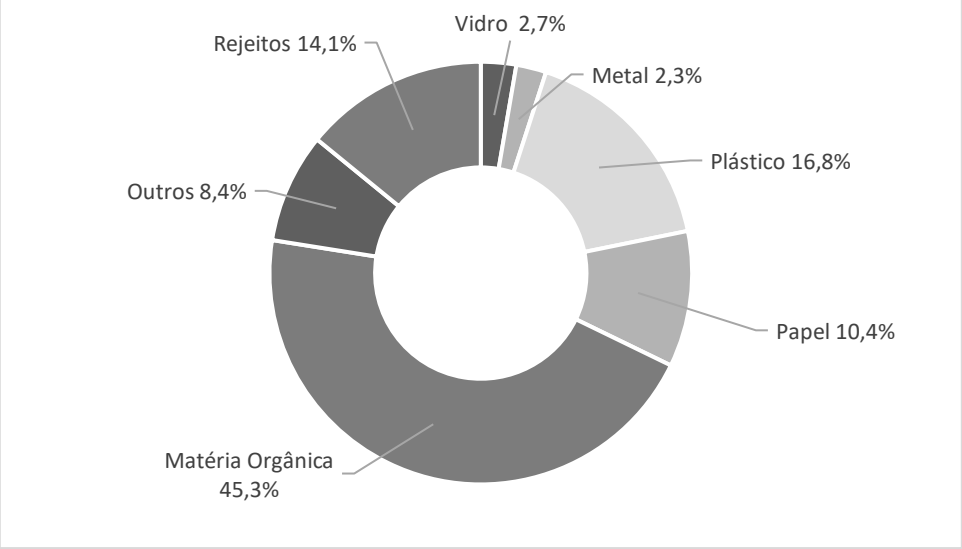


Figura 3.2 - Estimativa da composição gravimétrica média dos RSU coletados pela coleta convencional no Brasil em 2020.
(ABRELPE, 2020 modificado)

Como um todo, esta caracterização é essencial, pois auxilia na avaliação das opções mais adequadas de disposição final, na implementação de sistemas de tratamento e na

sustentação de programas de recuperação. Com o conhecimento da quantidade produzida é possível dimensionar adequadamente a frota, tipo de veículo coletor e o número de funcionários necessários para a realização dos serviços de coleta (Galdino *et al*., 2015).

3.2.3. Coleta e transporte

Conforme a NBR 12980, a coleta é entendida como o ato de recolher ou transportar resíduos por meio da adoção de equipamentos apropriados (ABNT, 1993).

Dentre as diferentes classes, as coletas podem ser divididas em regular, particular, especial e seletiva (ABNT, 1995). Conceituando cada uma das classes, a NBR 12980 caracteriza a coleta regular (ou coleta convencional) como o serviço realizado em intervalos definidos, com as coletas podendo ser do tipo domiciliar, de resíduos de feiras e calçadões, de varredura e de serviços da saúde (ABNT, 1993).

A coleta particular engloba RSU gerados por pessoas físicas ou empresas do qual o transporte é realizado por terceiros, tais como resíduos de origem industrial e comercial. Já a coleta especial se refere ao deslocamento de resíduos que não podem ser recolhidos pelo serviço regular em decorrência de características como volume, peso e quantidade, tais como, animais mortos, entulhos e podas de jardim (CEMPRE, 2018). Por último, tem-se a coleta seletiva, caracterizada por resíduos que são previamente separados pelo gerador (ABNT, 1993). Dado o objeto do trabalho, a coleta seletiva será retomada pelo tópico 3.3.

Em relação às modalidades de coleta, as duas mais utilizadas são a porta a porta e ponto a ponto. A coleta porta a porta é mais frequente em áreas urbanas densamente povoadas, onde o serviço de coleta ocorre em dias e horários específicos, cabendo aos moradores de cada região, a função de dispor seus resíduos nos períodos programados. Por outro lado, a coleta ponto a ponto envolve a definição de pontos estratégicos próximos às comunidades, nos quais os cidadãos podem depositar seus resíduos em recipientes específicos, que serão posteriormente recolhidos (Barros, 2012).

Em geral, é extremamente necessário um planejamento eficiente dos serviços para que gastos sejam controlados e os serviços contemplem maior parte da população. CEMPRE (2018), ao falar dos custos, afirma que os serviços voltados à limpeza urbana englobam de 5 a mais de 15% dos recursos de um orçamento municipal, com 40 a 60% desta fração

sendo destinada à coleta e ao transporte de resíduos. Em relação à prestação de serviços, o Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), ao realizar o Diagnóstico de Gestão, observou que aproximadamente 89,9 % da população brasileira (rural e urbana) foi atendida pela coleta em 2020, com a região norte possuindo a menor taxa (79,0%) e o Sudeste a melhor (95,8%) (SNIS, 2021).

No que diz respeito à execução, as fases de recolhimento apresentam variações regionais - a depender da modalidade de coleta, tipo de equipamento, etc. e abrangem o deslocamento do veículo da garagem, a remoção dos resíduos acondicionados, a descarga do material, culminando com o retorno ao ponto de partida. Como um todo, a diversidade nos padrões de geração de RSU, nas vias de acesso e nos tipos de veículos utilizados torna a coleta e transporte como fases desafiadoras do gerenciamento integrado de RSU (Ornelas, 2011 apud Nascimento *et al*., 2020).

Acerca do transporte, observa-se que o planejamento do sistema de coleta, do número e do tipo de veículos coletores variam conforme as características urbanas, tais como topografia, infraestrutura e condições da via, além das próprias características dos resíduos sólidos e do seu acondicionamento (Barros, 2012). Conforme CEMPRE (2018) há diferentes tipos de veículos coletores que podem ser utilizados - como caminhões compactadores e basculantes, veículos utilitários de médio porte, caminhões-baú, caminhões com carroceria aberta de madeira - com a escolha a depender do serviço a ser realizado.

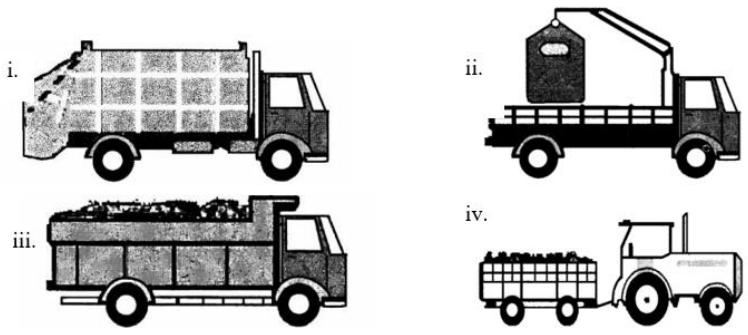


Figura 3.3- Veículos para coleta de resíduos
(CEMPRE, 2018 modificado)
i. Caminhão compactar para coleta regular, ii. Veículo com guindaste área coleta de poda ou entrega voluntária, iii. Caminhão basculante, iv. Trator para coleta em local de difícil acesso.

- Transbordo ou unidades de transferência

A localização dos pontos de destino final dos RSU tem se afastado cada vez mais dos principais centros de geração. De acordo com (CEMPRE, 2018), devido à grande distância a ser percorrida até o local de destino final dos RSU, é recomendado o uso de estações de transbordo ou transferência para limitar o trajeto dos veículos coletores, resultando na redução dos custos de transporte por unidade.
Desta forma, com o uso de estações de transbordo, os veículos de coleta padrões têm a responsabilidade exclusiva de coletar os RSU, enquanto o transporte até o local de destino final é realizado por veículos de maior porte, como caminhões, vagões ferroviários e barcaças(Nascimento *et al*., 2020).

3.2.4. Reaproveitamento e tratamento

A implementação de medidas de reaproveitamento e tratamento de resíduos é uma abordagem corretiva que traz diversos benefícios, como a valorização dos resíduos e diminuição do consumo de recursos naturais (Zanta e Ferreira, 2016). Conforme Barbosa e Ibrahin (2014), estes procedimentos são uns dos principais instrumentos para melhoria da qualidade de vida da população e preservação do meio ambiente.

Desta forma, dois processos importantes para o tratamento dos resíduos sólidos são a compostagem e reciclagem, com ambos envolvendo a modificação de características físicas, químicas ou biológicas dos resíduos, com o objetivo de convertê-los em novos materiais ou insumos para outros produtos (Nascimento *et al*., 2015).

De modo geral, a compostagem é um processo biológico para tratamento da matéria orgânica, com a decomposição podendo ocorrer na presença de oxigênio (processo aeróbio) ou na sua ausência (processo anaeróbio) (Telles, 2022). Segundo o autor esse processo visa à produção de um condicionador de solo chamado composto. Caracterizado como um tipo de adubo orgânico, o composto atua na manutenção do húmus no solo, com sua produção podendo resultar no aumento da vida útil de aterros sanitários e redução na emissão de gás metano (Bosco, 2017).

Já a reciclagem se caracteriza na transformação do resíduo, para posterior reintegração na cadeia produtiva, servindo assim, de matéria prima para criação de um novo produto (Barbosa e Ibrahin, 2014).

3.2.5. Disposição final

A PNRS define a disposição final como uma alternativa de destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). Assim, a lei (PNRS) e os Planos de RSU (PLANARES, PGIRS) estabelecem diferentes metas e critérios para a adoção desta alternativa.

Pela política, ao longo do gerenciamento, os resíduos devem ser tratados o máximo possível, sendo reaproveitados em outros processos, e apenas ao finalizar todas as possibilidades de beneficiamento, poderão ser encaminhados para a disposição final (Barbosa e Ibrahin, 2014). Desta forma, esta alternativa só deve ser utilizada por resíduos que não são mais passiveis de tratamento ou conforme conceituado pela PNRS, para disposição de rejeitos (Brasil, 2010).

Segundo a ABRELPE (2022, p. 27) as diretrizes estabelecem que esta forma final de acomodação dos resíduos deve incluir "(...) normas operacionais especificas de modo a evitar danos ou risco a saúde pública e a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos". Entretanto, no Brasil os locais mais utilizados para disposição final são lixões, aterros controlados e os aterros sanitários (Telles, 2022) com os dois primeiros sendo inadequados, representando riscos para saúde pública e meio ambiente. Observando as características destas opções, tem-se que:

- Lixão

Se caracteriza pela deposição dos resíduos sobre o solo, sem adoção de procedimentos técnicos-científico ou de qualquer medida de proteção ao meio ambiente. Nestas localidades não existe o controle do tipo e quantidade de resíduos que entra, possibilitando assim, a deposição de resíduos de alta periculosidade (Telles, 2022).

- Aterro controlado

O aterro controlado consiste na disposição final de resíduos no qual se assegura o recobrimento da massa materiais com terra, acesso restrito à área de lançamento, controle da composição dos resíduos recebidos, além de sistemas de impermeabilização de base, cobertura diária final, drenagem e tratamento de gases e materiais percolados (Jr e Bruna, 2019).

- Aterro Sanitário

Já o aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sobre critérios que visam evitar danos ao solo, água e saúde pública (Junior *et al.*, 2021). Baseia-se na decomposição e redução do volume dos rejeitos enterrados e devem possuir no mínimo impermeabilização perfeita do solo; sistema de captação, tratamento ou aproveitamento para o chorume, para queima dos gases gerados e para drenagem de águas pluviais; além de monitoramento adequados e acesso controlado (Telles, 2022).

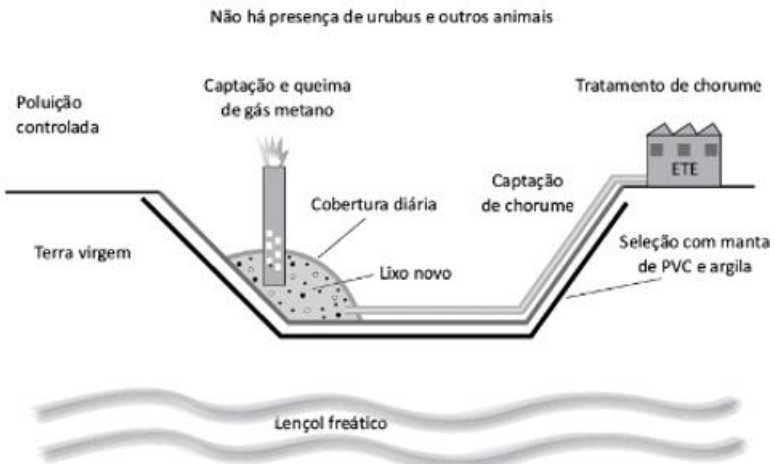


Figura 3.4 - Esquema aterro sanitário
(Telles, 2022)

Observando o panorama brasileiro, inicialmente a PNRS estabeleceu prazo de quatro anos para que cada município realizasse a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, com cada localidade sendo responsável pela gestão dos resíduos gerados (Szigethy e Antenor, 2021). A partir dos dados mais recentes divulgados pela ABRELPE, percebe-se que alguns municípios ainda estão distantes do estipulado. Embora o prazo inicial tenha inspirado em 2014, conforme indicado pela Figura 3.5, para o ano de 2022, em torno de 39,0% dos municípios destinam cerca de 29.706.226 toneladas/ano de resíduos de forma inadequada.

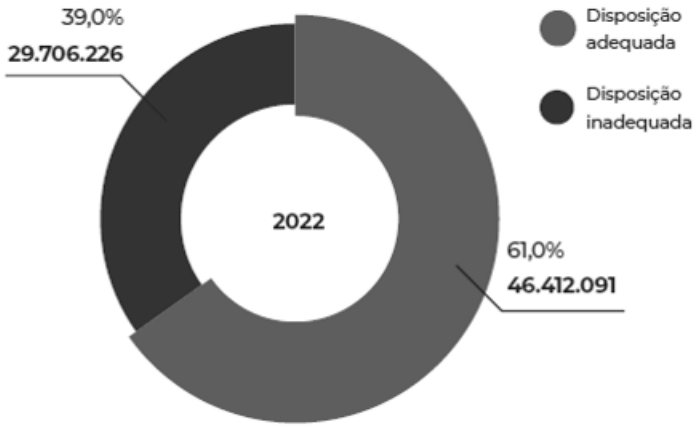


Figura 3.5- Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil (t/ano e %) – 2022. (ABRELPE, 2022)

3.3. COLETA SELETIVA

Conforme Nascimento *et al*. (2015), um outro fator associado à PNRS é a obrigatoriedade de os municípios apresentarem um Plano Municipal de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (PMGIRS), visto que com a adoção da lei, espera-se algumas mudanças dentro do setor público e privado.

Nesse contexto, a Política estabelece uma hierarquização no gerenciamento dos resíduos sólidos, na qual deve-se priorizar, em ordem, a "não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos" (Brasil, 2010). Conforme indicado pela Figura 3.6, essa abordagem objetiva criar uma gestão que englobe todo o ciclo de vida dos resíduos, desde sua origem até a disposição final.

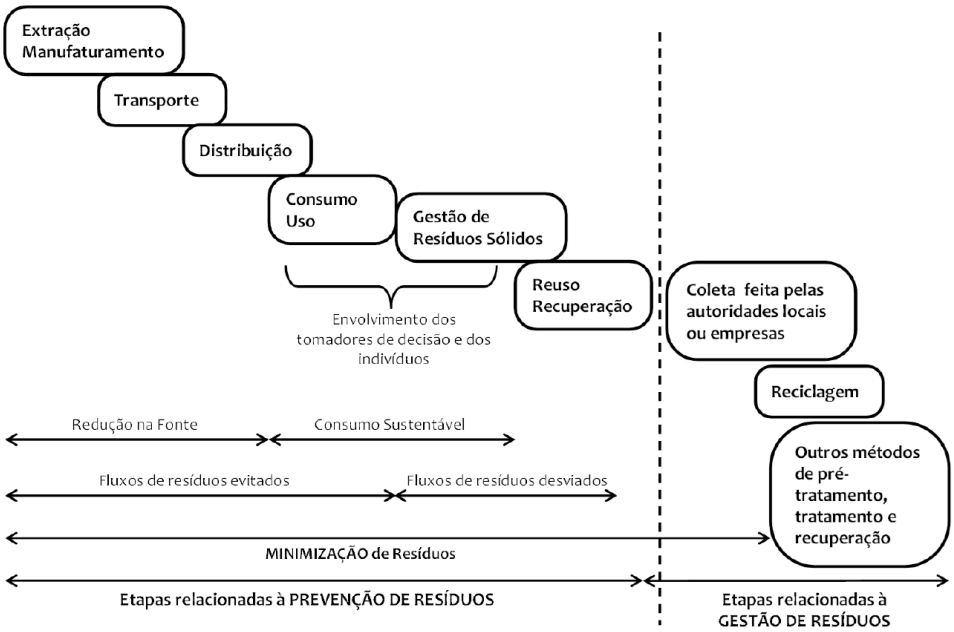


Figura 3.6 - Escopo da minimização e da prevenção de resíduos no contexto do ciclo de vida dos produtos.
(Gonçalves-Dias *et a*l., 2015)

Desta forma, consoante às etapas do gerenciamento, a hierarquização segue uma lógica que pode ser dividia por passos, com o primeiro referindo-se à priorização da não geração de resíduos, o segundo partindo pela escolha do reuso, que leva a utilização do material que seria descartado, prevenindo assim, a geração e por fim o terceiro, no qual a priorização é dada sequencialmente para a reciclagem, tratamento dos resíduos e, a menos indicada, disposição final (Soler e Filho, 2019).

Em meio a essa hierarquia, a coleta seletiva (CS) surge como uma ferramenta que possibilita maior utilização dos resíduos como matéria-prima. Para Cavalcanti et al., (2011) este instrumento (CS) vem se tornando uma alternativa sustentável i) ambientalmente, ao evitar o descarte inadequado de resíduos, e ii) socialmente, pois gera renda para milhares de famílias que trabalham com os materiais coletados.

Perante a Lei 12.305, a implementação desta modalidade de coleta é de responsabilidade dos municípios, que deverão estabelecer em seus planos de gestão integrada metas voltadas à hierarquia de gerenciamento (Figura 3.6) (MMA, 2022). Em contrapartida, a mesma em seu artigo 35, afirma que este sistema de coleta envolve uma responsabilidade compartilhada, principalmente entre o gerador e o poder público, cabendo ao consumidor acondicionar e disponibilizar adequadamente os resíduos (Brasil, 2010).

Dados os diferentes atores e etapas de priorização, a partir de CEMPRE (2014) e SLU, (2018), percebe-se que o processo de coleta seletiva deve ter início na fonte geradora com os materiais devendo ser separados, no mínimo em:

- Resíduos secos: engloba matérias que não se degradam facilmente como plásticos, papéis, vidros, metais, longa-vida e pneu.
- Resíduos orgânicos: ou úmidos, são compostos que são facilmente degradados pelo meio ambiente, tais como restos de alimentos, cascas de frutas, legumes e podas.

Esta classificação varia, com cada município podendo adotar o que melhor lhe convir. Realizado o acondicionamento, segue-se para a fase de coleta, que conforme apresentado pelo tópico 3.2.3, pode-se dividir em diferentes modalidades. Assim, dentre as mais adotadas, tem-se a realização da coleta seletiva em (CEMPRE, 2018;Bringhenti, 2004):

- Porta a porta (ou domiciliar) - assemelha-se à coleta convencional, com os veículos coletores percorrendo períodos que não coincidam com a coleta normal.
- Postos ou locais de entrega voluntária – (PEV ou LEV), contêineres ou pequenos depósitos são colocados em locais fixos para que os habitantes possam colocar seus resíduos.
- Postos de troca – o resíduo é entregue em troca de algum benefício
- Por catadores – trabalhadores autônomos ou apoiados por alguma associação ou cooperativa recolhem o material disposto em vias públicas.

Após a coleta, os resíduos são dirigidos a galpões de triagem para que possam ser separados, prensados e embalados (CEMPRE, 2014). Para tal, é necessário que estes galpões estejam equipados. Dentre as ferramentas mais utilizadas, adota-se esteiras (conduz o resíduo que é separado continuamente de forma manual), silos (armazena o resíduo que não pode ser separado, evitando que vire rejeito), balanças (para controle da entrada e saída de materiais) e trituradores (CEMPRE, 2014).

A separação dos resíduos é conduzida por catadores que fazem parte de cooperativas ou associações de reciclagem. Esses trabalhadores desempenham um papel crucial do ponto de vista social, econômico e ambiental, agregando valor aos materiais recicláveis, fornecendo matéria-prima e combustível para a indústria e empresas de manufatura, além

de contribuírem para a conservação de recursos naturais e economia de energia *(Souza et al.*, 2012; Saueressig *et al*., 2021).

Após a coleta e triagem, os resíduos necessitam de um mercado onde serão comercializados e posteriormente encaminhados para a cadeia de reciclagem (Berticelli, 2016). Observando o conceito legal, este processo só se inicia quando os resíduos resultantes da coleta seletiva sofrem alterações físicas, se transformando em matéria prima ou outro produto (MMA, 2022).

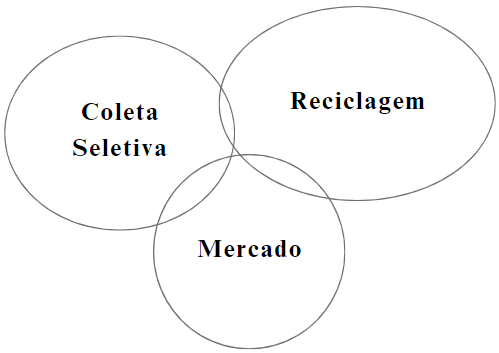


Figura 3.7 - Esquema Simplificado de um projeto integrado de reciclagem (CEMPRE, 2014 modificado)

Como um todo os benefícios da reciclagem variam a depender do local em que o processo irá ocorrer, do nível de conscientização ambiental da comunidade, de um mercado de recicláveis vantajoso e de uma infraestrutura adequada (Bringhenti, 2004; Knickmeyer, 2020; Park, 2018). Esta recuperação também sofre influências com relação à proximidade da instalação de reprocessamento, do custo associado ao transporte e estocagem do resíduo, além do volume de material que será processado (Bidone e Povinelle, 1999 apud Berticelli, 2016), sendo necessária a adoção de um sistema integrado para que a reciclagem seja eficiente (Figura 3.7).

Outra consideração crucial até que o processo de reaproveitamento ocorra é o armazenamento adequado dos resíduos. É imperativo que os resíduos sejam armazenados de maneira que sua classificação não seja alterada e que os riscos ambientais sejam minimizados. Para tal, os locais de armazenamento devem ser estruturados com isolamento apropriado e sinalização, possuir acesso e medidas para evitar a poluição do ar, do solo e das águas, entre outras precauções ambientais (ABNT, 1990).

Ao analisar o panorama da CS, o SNIS-RS para o ano de 2021, observou que apenas 32,0% dos municípios brasileiros são abrangidos por alguma modalidade de coleta

seletiva (SNIS, 2021). Conforme o MMA, além destes sistemas serem incipientes na maior parte do país, aqueles que o possuem realizam de maneira inadequada, acondicionando um grande volume de resíduos misturados, o que diminui a taxa de materiais que poderiam ser aproveitados.

Embora PNRS tenha estipulado várias metas para o gerenciamento de resíduos, a busca por um equilíbrio entre a geração excessiva e o tratamento adequado tem representado um dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea (Leleux e Kaaij, 2019 *apu*d Aguiar *et al.*, 2021).

Ilustrando a magnitude desse desafio, dados aferidos em 2021 e apresentados pelo Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos mostram que, mesmo decorridos 11 anos desde a implementação da PNRS, apenas 19 estados brasileiros (70,4%) possuíam planos estaduais elaborados de acordo com as diretrizes estabelecidas pela política. Além disso, o índice de recuperação de resíduos sólidos é alarmantemente baixo, registrando apenas 1,67% (SINIR, 2021).

Essas informações evidenciam a necessidade de um esforço conjunto para enfrentar os obstáculos associados ao gerenciamento adequado dos resíduos sólidos, a fim de atingir um cenário mais sustentável e alinhado com os princípios estabelecidos pela PNRS.

3.4. GERENCIAMENTO NO DISTRITO FEDERAL

Caracterizadas pelo consumismo e fabricação de produtos pouco duráveis e consequentemente pela alta quantidade de materiais descartados e destinados inadequadamente, as sociedades atuais têm encontrado diferentes desafios na gestão dos resíduos sólidos urbanos (Berguenmayer *et al.*, 2020; Silva, 2016).

No contexto do Distrito Federal (DF), apesar de figurar entre as regiões com índices mais elevados de desenvolvimento humano e infraestrutura no país, a capital brasileira ainda enfrenta um problema significativo de geração de resíduos sólidos urbanos (Berguenmayer *et al.*, 2020), com a gestão destes materiais ainda necessitando percorrer diferentes caminhos para garantir que as leis relacionadas às questões socioambientais sejam efetivamente cumpridas (Souza e Moraes, 2021).

Contendo uma população estimada de 2.817.068, com taxa de crescimento anual de 0,76% ao ano e área de 5.761 km^2 (IBGE, 2022) o DF atualmente é composto por 35

regiões administrativas (RAs) (SEGOV, 2023). No que tange limpeza urbana e resíduos sólidos, a gestão é realizada pela autarquia Serviços de Limpeza Urbana (SLU) e assim como nas demais localidades, engloba diferentes serviços que se dividem estre a as fases de "coleta, transporte, triagem, transbordo, tratamento e destinação final de resíduos sólidos urbanos domiciliares e daqueles provenientes da coleta seletiva (SLU, 2023).

Observando o panorama dos RSU do Distrito Federal, nota-se que a gestão dos resíduos é caracterizada a partir de 1960, pela destinação dos materiais descartados no Lixão do Jóquei Clube (ou lixão da Estrutural), sendo dispostos de maneira inadequada e sem o devido controle ambiental (Souza e Moraes, 2021; Silva e Contreras, 2020). Com o passar das décadas e aumento na geração de resíduos, o lixão se expandiu, chegando a ocupar uma área de aproximadamente 174 hectares, ganhando o título, a partir de 2012, de maior vazadouro a céu aberto da América Latina (Silva, 2016).

Dado os impactos, danos ambientais e à saúde humana[1] e o requerido por leis e normativas[2], o Lixão da Estrutural foi fechado, iniciando-se em 2015 o processo para transformá-lo em aterro controlado. Assim, a partir de 2018 tornou-se permitido a disposição de apenas materiais resultantes da construção civil. Entretanto, para que esta ação fosse possível, foi necessária a implementação de um novo ambiente para descarte final dos resíduos. De tal modo, em janeiro de 2017, foi inaugurado o Aterro Sanitário de Brasília (ASB), composto por uma área de 76 hectares, com 32 hectares sendo destinada à disposição de resíduos e previsão de vida útil de 13 anos (Silva e Contreras, 2020; SLU, 2022). As diferenças entre lixão, aterro controlado e aterro sanitário foram apresentados no levantamento bibliográfico, item 3.2.1.

Atualmente, dentre os diferentes serviços prestados, o SLU é responsável pelas coletas regular (ou convencional) e seletiva dos resíduos sólidos domiciliares do Distrito Federal. Como apresentado por meio da Figura 3.8, na coleta convencional e seletiva, os resíduos passam por diferentes etapas, de modo a serem separados em recicláveis, compostos orgânicos ou rejeitos, sendo destinados respectivamente para venda, doação ou disposição

[1] Localizado no Parque Nacional de Brasília, o Lixão da Estrutural ocasionou na contaminação do solo, ar, recursos hídricos, à saúde dos catadores (Souza e Moraes, 2021).

[2] Dentre outras, observa-se o previsto pela PNRS, Lei 12.305/2010 e PNMA, Lei 6.938/1981 além de normas (como a NBR 10157) que abordam questões operacionais requeridas em locais de disposição final, como drenagem, impermeabilização, captura dos gases gerados (Souza e Moraes, 2021).

final no ASB. Observando os dados dispostos pelo relatório do SLU, no ano de 2022, a partir da coleta convencional foram coletadas 696.995,94 toneladas/ ano, dos quais 274.659,38 toneladas/ ano foram processados pelas usinas (UTMB) (SLU, 2022).

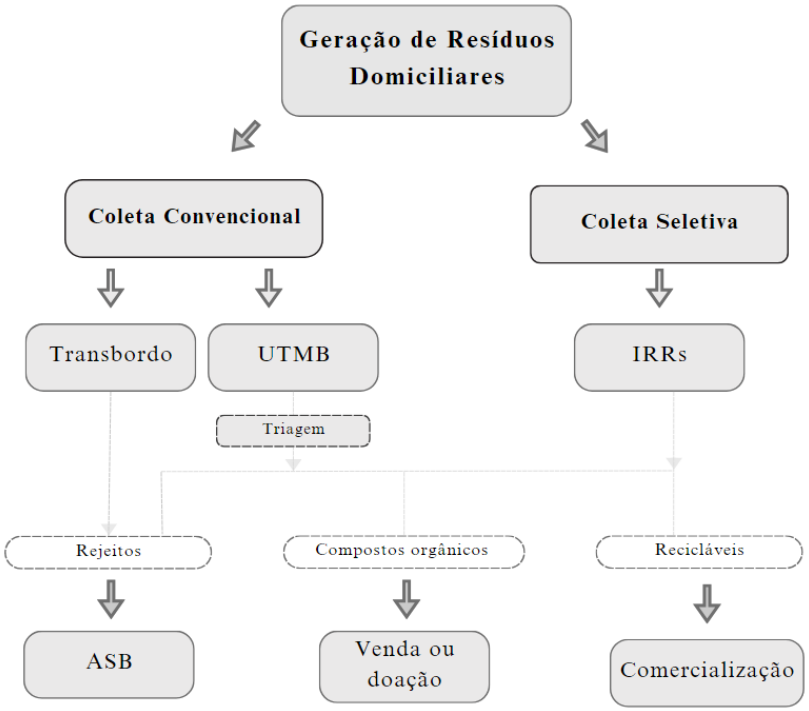


Figura 3.8 - Fluxograma dos resíduos sólidos domiciliares
(SLU 2022, Modificado)
Legenda: UTMB: Unidades de tratamento mecânico biológico; IRR: Instalações de Recuperação de Resíduos; ASB: Aterro Sanitário de Brasília

3.5. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E IMPACTOS AMBIENTAIS

Este estudo tem como cerne a geração de resíduos sólidos urbanos e o fato de a produção destes relacionar-se com o próprio desenvolvimento das sociedades. Essa questão carece de reflexões, visto que, o manejo inadequado dos resíduos sólidos urbanos pode levar a impactos ambientais irreversíveis, como a contaminação do solo, ar e recursos hídricos, danos à saúde pública devido à propagação de doenças por vetores, prejuízos econômicos pela desvalorização das áreas próximas aos locais de descarte decorrente da má destinação desses resíduos (COPEL, 2021).

A partir de Rodrigues (2010), verifica-se que a produção de resíduos é inevitável, erigindo assim o grande desafio de gerenciá-los. Nesse sentido, a gestão adequada torna-se essencial para minimizar os impactos negativos ao meio ambiente.

Estudos da área, indicam que o desenvolvimento econômico é um ponto que está atrelado à geração de resíduos, seja na vertente da degradação ambiental, quanto na dos esforços voltados à minimização dos impactos prejudiciais ao meio ambiente. Sobre o assunto, Gomes e Neto (2022), indicam que além do progresso econômico, é essencial considerar que a acumulação de resíduos sólidos em locais inadequados e o manuseio inseguro têm gerado várias mudanças, tanto no meio ambiente, quanto na vida dos trabalhadores envolvidos diretamente com esses materiais, insumos ou substâncias, como é o caso dos catadores de resíduos que dependem financeiramente dos resíduos descartados.

Logo é possível observar, que a problemática da geração dos resíduos sólidos e o grande desafio de seu gerenciamento, relacionam-se a uma gestão eficiente. Reichert e Mendes, (2014), acreditam que a implementação de uma gestão eficiente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) possibilita que às autoridades municipais desenvolver mecanismos de redução de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) para a atmosfera. Esse objetivo é alcançado, principalmente, por meio da escolha adequada das tecnologias de tratamento utilizadas na destinação final dos resíduos.

Observando a análise das emissões de gases efeito estufa no Brasil, nota-se o setor de resíduos como sendo o responsável por 4% do total de emissões no ano de 2022, correspondendo a uma emissão de 91,3 milhões de toneladas de CO_2 equivalente. Dentre esse montante, 65% provêm da disposição final de resíduos sólidos (SEEG, 2023)

De forma geral, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes dos resíduos sólidos urbanos são compostas principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e uma parcela pequena de óxido nitroso (N_2O) (SNS, 2021).

Com um potencial de aquecimento global que pode ser até 28 vezes superior ao CO_2 ao longo de um período de 100 anos (IPCC, 2018), o metano é liberado durante a degradação de compostos biodegradáveis em condições anaeróbias, quando disposto em locais como aterros e lixões. Quanto ao óxido nitroso, ele se forma em quantidades diminutas a partir do nitrogênio gasoso presente no ar, sendo composto por elementos contidos nos resíduos durante a queima de biogás no aterro (Colatusso, 2021)

No que diz respeito à geração de CO_2, diferentes etapas do gerenciamento liberam esse gás, sendo liberado, por exemplo, devido ao uso de combustíveis fósseis nos equipamentos de transporte e processamento. No entanto, é importante ressaltar que

existem fases de eliminação de resíduos que não são tão prejudiciais ao meio ambiente (Simões, 2018). Métodos alternativos, como a digestão anaeróbia, exemplificam isso. No caso de resíduos biodegradáveis, o carbono liberado é absorvido da atmosfera durante o crescimento das plantas sendo novamente liberado no ambiente como CO_2 no processo de biodegradação, reiniciando um ciclo. Dessa forma, as emissões são compensadas, não entrando na contagem de emissões de gases de efeito estufa (Colatusso, 2021).

Como um todo, a gestão de resíduos mantém uma relação direta com o aquecimento global. As decisões e medidas adotadas podem influenciar positivamente para uma menor geração de GEE, especialmente quando se evita a destinação incorreta. Além disso, desempenha um papel crucial na redução, principalmente através do reaproveitamento de materiais, evitando a produção de novos elementos e permitindo a reintegração dos materiais no ciclo de vida, evitando emissões significativas durante o processo produtivo (Luiz e Suski, 2021). Outras questões, como as rotas percorridas durante a coleta, tecnologias adotadas e valorização energética, também se mostram estratégicas para a eliminação de RSU

3.6. MODELOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS APLICADOS AO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A compreensão da maneira com que os resíduos são geridos e o entendimento dos resultados e impactos a nível macro e micro assumem extrema importância. Nesse particular, surge a necessidade de reflexões focadas especialmente no centro desta discussão. Entretanto estes entendimentos são caracterizados por complexidade, lidando tanto com aspectos quantitativos como qualitativos, e enfrentando conflitos de interesses relevantes, dificultando assim, na seleção de caminhos e instrumentos auxiliares (Pereira, 2014).

Nesse sentido, é crucial adotar abordagens que permitam a avaliação dos impactos ambientais ao longo de todas as etapas do processo. Para tal, diferentes estudos têm abordado o desenvolvimento de metodologias para a construção de modelos de decisão e interpretação de problemas e de cenários (Pereira, 2014; Reichert, 2013; e Morrissey Browne, 2004). De acordo com Reichert (2013), os modelos mais atualizados buscam abordar os aspectos ambientais, econômicos e, em alguns casos, também consideram questões sociais, englobando em suas análises o ciclo de vida completo dos produtos em avaliação.

Morrissey & Browne (2004) propõem a divisão dos modelos de gestão de RSU em três categorias distintas: avaliação de custo-benefício, avaliação do ciclo de vida e métodos multicritério. Além disso, outros estudos também mencionam a inclusão de indicadores de desempenho, como a pegada ecológica (Costa, 2017; Vieira, 2019). Cada abordagem apresenta vantagens e limitações específicas, que podem ser resumidas da seguinte forma:

- Avaliação de custo-benefício - permite uma análise abrangente dos aspectos positivos e negativos de diferentes propostas, utilizando uma unidade de referência comum, com impactos sendo traduzidos em um valor único (geralmente monetário). Contudo, deve-se considerar as incertezas associadas à estimativa dos valores, pois eles podem variar ao longo da vida útil do programa de gerenciamento. Essa abordagem é frequentemente utilizada para tomar decisões específicas, como avaliar sistemas de reciclagem ou estimar custos ambientais com base em análises do ciclo de vida (Reichert, 2013; Morrissey e Browne, 2004).
- Avaliação do ciclo de vida - é uma ferramenta que permite analisar os impactos ambientais ao longo de todas as etapas de um processo produtivo. Esta abordagem permite avaliar questões ambientais, promover benefícios sociais, facilitar a tomada de decisões, identificar prioridades e superar o tradicional enfoque de "fim de tubo". No entanto, os resultados da ACV são influenciados pelas características e especificidades do local de estudo, com a falta de dados precisos podendo resultar em interpretações genéricas (ABNT, 2009a; Amaral e Lopez, 2018;Dai-Prá *et al.*, 2018; Oliveira, 2020).
- Análise multicritério - é um modelo que permite a avaliação de diversos critérios que não podem ser quantificados monetariamente. Utilizando métodos probabilísticos, essa abordagem permite que os tomadores de decisão tenham uma visão mais abrangente dos problemas e realizem análises a partir de diferentes perspectivas. Esse método pode combinar informações quantitativas e qualitativas, levando em consideração as preferências daqueles que o utilizam em decorrência das circunstâncias em que o estudo está ocorrendo. No entanto, a atribuição dos pesos aos critérios é subjetiva, não resultando em uma solução "ideal", mas sim em uma hierarquização baseada nos pesos estabelecidos anteriormente (Pereira, 2014; Morrissey e Browne, 2004).

- Pegada ecológica - é uma ferramenta que está relacionada à capacidade de carga, avaliando o impacto das atividades econômicas nos sistemas ecológicos. Como um todo, ele fornece uma medida quantitativa do desenvolvimento sustentável, permitindo uma compreensão de ganhos/ desgastes ambientais. No entanto, esta ferramenta não aborda a dimensão social da sustentabilidade, focando apenas nos efeitos das decisões econômicas e no uso dos recursos naturais (Costa, 2017; Vieira, 2019).

Considerando os objetivos desta pesquisa e as características dos modelos abordados, destaca-se uma maior compatibilidade com o método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta afirmação encontra respaldo na argumentação Reichert e Mendes (2014), que enfatizam a capacidade desta ferramenta em permitir a avaliação abrangente não somente dos impactos resultantes da decomposição dos resíduos, mas também do balanço de todo o ciclo do processo, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, transporte e chegando ao reaproveitamento pós-consumo. De acordo com Oliveira (2020), o método de ACV é adequado para quantificar os efeitos ambientais, sugerir e comparar diferentes cenários de sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos, além de fornecer suporte às autoridades governamentais na tomada de decisões e investimentos.

Em arremate, esclarece-se que a relevância da Avaliação do Ciclo de Vida no contexto do gerenciamento de resíduos tem sido destacada devido ao aumento contínuo de pesquisas científicas que têm empregado essa metodologia em diversas regiões do mundo nos períodos recentes(Mattos *et al*., 2022a; Santos *et al.*, 2022).

3.7. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.7.1. Avaliação do ciclo de vida

Atingir uma gestão integrada é algo complexo e requer a adoção de métodos que auxiliem nas decisões e planejamentos. Neste contexto a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge com uma ferramenta bem quista, dado sua flexibilidade de expandir o horizonte de estudo, e dar a possibilidade de quantificar os benefícios e desvantagens das opções de gerenciamento de resíduos sólidos (Ekvall *et al*., 2007; Vergara; Damgaard; Horvath, 2011).

ACV consiste na compilação e avaliação de impactos potenciais de um sistema ou produto ao logo de seu ciclo de vida por meio da avaliação de entradas e saídas (Dos Santos *et al*., 2022; ABNT, 2009a). Desta forma, ela permite considerar diferentes fatores durante suas etapas de análise, tais como prever cargas ambientais associadas a cada fase ao longo da vida útil do produto (Reichert e Mendes, 2014; Silva *et al*., 2015).

Como um todo, esta metodologia ainda é recente, com o seu desenvolvimento ganhando maior ênfase a partir de meados da década de 1980 (Mendes, Natalia Crespo; Bueno; Ometto, 2016). Observando a necessidade de criar um comitê técnico responsável por estabelecer diretrizes metodológicas para a realização do ACV, a Organização Internacional para Normalização (ISO) instituiu a ISO 14040, sendo normalizada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na série 14040 (ABNT, 2009a).

Observando a evolução da ACV, Mendes *et al*. (2015) evidenciam que a ampla utilização do método se dá devido a sua forma integrada de tratar diferentes assuntos. No entanto, Santos *et al.* (2022), observam que ao aplicar essa ferramenta, os resultados encontrados podem ser influenciados "pela metodologia, categorias de impacto selecionados, limites do sistema, qualidade dos dados e robustez das análises" (p. 128).

Neste contexto, buscando evitar incongruências nos resultados, a ISO 14040 organiza a metodologia do ACV em quatro principais etapas interdependentes, o que possibilita a restruturação da análise em qualquer momento do estudo (Silva *et al*., 2015). As etapas são divididas em fases conforme ilustrado pela Figura 3.9, sendo elas i) definição de objetivo e escopo, ii) análise de inventário, iii) avaliação de impacto, iv) interpretação (ABNT, 2009a).

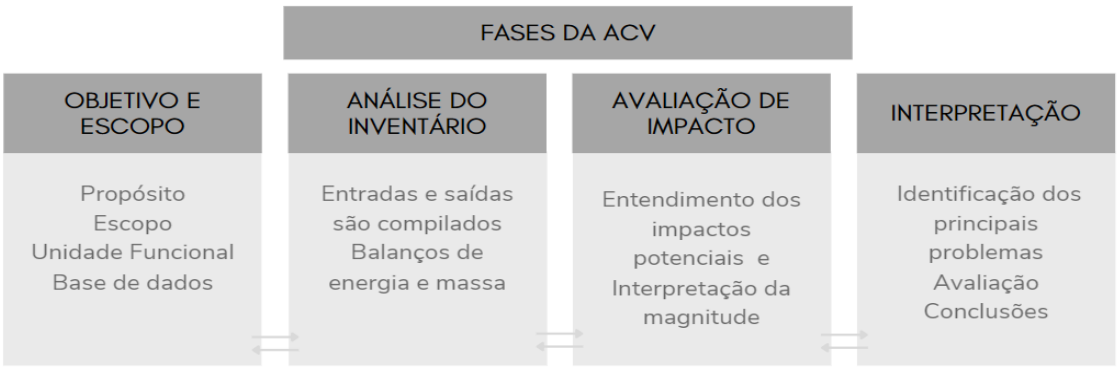


Figura 3.9 - Fases da avaliação do ciclo de vida

i. Objetivos e escopo

Relacionado ao contexto ou aplicabilidade pretendida do estudo, o objetivo de uma avaliação do ciclo de vida se relaciona com as razões na qual levaram a execução da análise e com o público de interesse (ABNT, 2009a). Consoante ao objetivo, o escopo assim como a própria palavra diz, se refere ao limite de abrangência ou ao alvo que se deseja chegar (Michaelis, 2023). Afins de exemplo, no âmbito dos RSU, um possível escopo incluiria as atividades necessárias para o gerenciamento de RSU desde o momento da geração até a disposição final (Dai-Prá *et al*., 2018; Mangue *et al*., 2015).

Como um todo, é por meio do escopo e objetivo que a ACV avalia os impactos, com o nível de detalhamento dependendo do que ali foi definido (ABNT, 2009a). Para Reichert e Casagrande (2014), esta fase é vista como uma das mais importantes, dado que por meio dela são definidos o propósito e os resultados esperados. Para tal, conforme indicado pela ISO 14.044, o objetivo e escopo devem ser bem definidos, contudo, dada a natureza iterativa do ACV, em caso de limitações não previstas ou resultados adicionais, essa fase pode ser retomada, passando por revisões (ABNT, 2009b).

Neste cenário, faz-se necessário estabelecer os fatores e individualidades da pesquisa, que são contemplados por meio de itens tais como as fronteiras do sistema, unidade funcional, requisitos de dados (ABNT, 2009a; Silva *et al*., 2015).

- Unidade funcional

Depois de entender qual o objetivo do estudo, faz-se necessário definir um termo que possa ser carregado durante o processo e que permita a realização de comparações e análises de forma adequada. Este temo é chamado de unidade funcional (UF) e tem como propósito fornecer uma referência quantitativa para normalizar os dados de entrada e saída, medindo assim o desempenho do produto (Silva *et al.,* 2015).

Para que ela seja bem defina e mensurável, as funções do sistema precisam ser claras, com suas finalidades estando especificadas para que as comparações sejam condizentes (ABNT, 2004). Como exemplificado pela Tabela 3.2, no que condiz RSU, a escolha da unidade funcional pode possuir um valor quantitativo simbólico, tal qual 1 tonelada de RSU (Leme, 2010; Luiz e Suski, 2021), ou coerente com o fluxo gerado por determinado período, como 620 t/ano de resíduos (Mengue *et al.*, 2015).

Tabela 3.2 - Unidades funcionais adotadas pelos estudos

Autor (es)	Temática Central	Unidade funcional
Leme, 2010	Recuperação energética por meio da incineração de RSU	1 t de RSU
Reichert e Casagrande, 2014	Auxiliar a tomada de decisão quanto ao sistema de gerenciamento dos RSU no município em questão	t de RSU/ ano
Luiz e Suski, 2021	Biodigestão anaeróbia visando a obtenção de energia elétrica	1 t de RSU
Mangue *et al*., 2015	Avaliação do sistema de gerenciamento de RSU	612 t de RSU /ano (sem considerar a CS)
Nobrega *et al.*, 2019	Procedimentos de coleta seletiva no processamento de papel e papelão para o núcleo de Bessa, João Pessoa	1 tonelada de RSU triado

- Fronteira do sistema

Após definir as funções, objetivos e escopo, faz-se necessário limitar os processos que serão analisados. Para tal, é estabelecida a fronteira do sistema, responsável pela delimitação do sistema e dos processos elementares de entrada e saída (Coltro, 2007).

Caracterizados como os menores elementos de entrada e saída do sistema, os processos elementares se dividem em i) fluxos elementares: composto por mateiras e energia advindos do ambiente sem passar por transformação e ii) fluxos de produtos, formado de elementos advindos do próprio sistema ou destinados a outro (ABNT, 2009ª).

Em consonância, conforme Oliveira (2020), as fronteiras do sistema podem ser estabelecidas em limites que observam ‘do berço ao berço’ (observa todo o ciclo de vida, incluindo a reintegração do produto como matéria-prima), do ‘berço ao túmulo’ (avalia desde a extração até o fim de vida), ‘do berço ao portão’ (observa da extração ao processo produtivo) e do ‘portão ao portão’ (analisa as fases intermediárias). Desta forma, ao definir o limite do sistema, vários fatores irão interferir, tais como a aplicação pretendida do estudo, critérios estabelecidos e restrição de dados (Henríquez, 2016).

Ainda nesta esfera, a ISO 14.044 ao elucidar sobre os processos elementares e suas interpelações, observa que convém realizar a identificação das entradas com base em suas contribuições em massa, energia e significância ambiental (ABNT, 2009b).

Quanto às entradas e saídas, a ISO 14.040 observa que são poucos os sistemas que possuem apenas uma saída, sendo necessário realizar processamentos de alocação para os processos que resultem em mais de um produto (ABNT, 2009a). Conhecido também como processo multifuncional, este fator é específico aos processos que possuem vários produtos com entrada e saída e que constituem também partes de um outro sistema, de modo a impossibilitar o levantamento de dados de entrada e saída de modo separado (ARDUIN, 2013).

Tal situação pode ocorrer em caso de (i) saída múltipla, no qual um processo resulta em mais de um produto, (ii) entrada múltipla, em que se partindo de um, tem-se o fornecimento de diferentes sistemas de produtos e (iii) reciclagem, no qual o resíduo de um sistema se converte em matéria-prima de outro (Suh *et al*, 2010 apud Arduin, 2013). Estes processos foram ilustrados respectivamente pelos esquemas referentes à Figura 3.10.

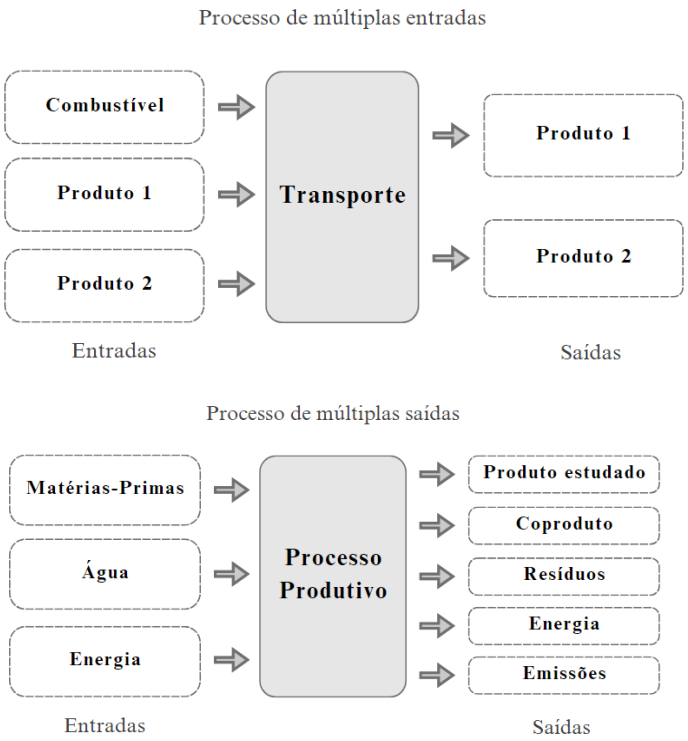




Figura 3.10 – Processos de alocação
(Arduin, 2013 modificado)

Neste sentido, surgem os procedimentos de alocação, que consistem na repartição dos fluxos de entrada e saída, de modo a atribuir proporcionalmente os impactos e recursos do fluxo com os diferentes produtos (ABNT, 2009ª). Para que esta ação seja possível, a ISO 14.044 estabelece uma revisão do fluxograma do sistema, sugerindo que (ABNT, 2009b):

i) A alocação pode ser evitada por meio da subdivisão dos processos elementares, os fracionando em dois ou mais subprocessos; ou expandindo o sistema.
ii) Se não puder ser evitada, subdividir o sistema em diferentes produtos ou funções, de maneira a refletir as relações físicas subjacentes entre eles;
iii) Caso não possa utilizar uma relação física, convém que as entradas sejam alocadas entre os produtos e funções de maneira que reflita outras relações (tal como valor econômico).

Avaliando as diferentes opções, Arduin (2013) observa que a escolha do procedimento é relacionada com sua adequação ao objetivo do estudo, com os resultados sendo alterados dada a forma de alocação adotada.

- Base de dados

Um outro item que deve ser compreendido no escopo da avaliação são os dados. Em geral, para cada pequeno processo do fluxo estabelecido, os dados podem ser classificados em relação a entradas (energia, matéria-prima, auxiliar), produtos, coprodutos, resíduos e aspectos ambientais (emissões, descargas de contaminantes na natureza) (ABNT, 2009a). Conforme Buchmann (2018), para que a avaliação seja consistente, as possíveis fontes de dados devem ser definidas de acordo com o objetivo do estudo, sendo primordial indicar

quando as origens são primárias e secundárias, para assim definir a qualidade dos dados e compreender a confiabilidade dos resultados.

Assim, entendendo o requisito de qualidade como “as características dos dados necessários para o estudo” (ABNT, 2009a p.13) a normatização recomenda que os dados devam ser estabelecidos observando parâmetros em relação à cobertura temporal, geográfica e tecnológica, representatividade e incerteza da informação (ABNT, 2009b).

Para Bahr e Steen (2004) a qualidade dos dados é um dos fatores que dificulta uma fácil aplicação da ACV. Na etapa de coleta, por exemplo - com fontes de informações provindas de livros, cálculos, bancos de dados (etc.) - comumente são encontradas limitações que podem interferir nos resultados da avaliação, com o responsável pela arguição estando sujeito a organizar, avaliar e garantir a eficácia dos dados (Buchmann, 2018; Bahr e Steen, 2004).

Desta maneira, pode-se tornar necessário realizar a análise da qualidade dos dados, que se refere a técnicas e informações que podem ser necessárias para se ter maior confiabilidade dos resultados, englobando análise de gravidade (identifica os processos de maior influência), análise de incerteza e análise de sensibilidade (mede alterações dos resultados quando se tem modificações no ICV) (ABNT, 2009b e Ferreira, 2004).

Para além, contexto atual, diversos softwares e bases de dados têm sido desenvolvidos para auxiliar nos estudos de ciclo de vida. Segundo Oliveira, (2020, p. 33), essas ferramentas são fundamentadas em informações relacionadas a “materiais, energia, transporte e outros” aspectos ambientais.

De maneira geral, essas informações são uteis na realização dos cálculos, porém, para se garantir a confiabilidade da análise, é essencial conferir sua compatibilidade com a região de estudo (Silva *et al*., 2015), visto que a maioria dos bancos são de origem Europeia (Mattos *et al.* 2022), com algumas análises requerendo a utilização de mais de uma ferramenta pra acessar todas as informações necessárias (Oliveira, 2020). Como um todo, os softwares são muito bem quistos pois auxiliam na execução do estudo, principalmente na análise do inventário de ciclo de vida, com o processamento de informações ocorrendo de forma mais simples e fluida e com os resultados já sendo apresentados por meio de tabelas e gráficos (Santos *et al*., 2022).

Mattos *et al.* (2022) observa que dentre os bancos mais utilizados, destaca-se *o Ecoinvent* ou outros já inclusos nos softwares SimaPro ou Gabi. Além destes, Ferreira (2004) também cita programas tais como KCL-ECO e LCAiT. De modo geral, estes bancos e modelos computacionais apresentam fatores de caracterização para diferentes componentes, definem as fases do ciclo de vida e realizam modelagens a nível *midpoint* ou *endpoint (*estes conceitos são apresentados no tópico sobre avaliações do ciclo de vida) (Mendes *et al.,* 2015; Ferreira, 2004).

ii. Análise do inventário do ciclo de vida

A análise do inventário do ciclo de vida (ICV) se refere a fase em que os dados de entrada e saída do sistema são compilados e quantificados (ABNT, 2009a). Nesta etapa são realizados os procedimentos de cálculo e o balanço de energia e massa, na qual são avaliadas as influências ambientais do sistema (Willers; Rodrigues; Silva, 2012).

Assim, os dados de natureza qualitativa e quantitativa a serem incorporadas no registro devem ser reunidos para cada processo básico do limite do sistema, com estes sendo empregados para mensuração das entradas e saídas dos processos elementares (ABNT, 2009a).

Honda (2014) afirma que este processo deve ser iterativo, visto que o sistema amplia seu conhecimento na medida que novos dados são inseridos, o que consequentemente pode influir em novos requisitos, acarretando a necessidade de novas formas de obtenção de dados para que o objetivo do estudo seja alcançado.

No geral, o ICV tem a habilidade de calcular o impacto ambiental relacionado a um sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos (Mersoni, 2015; Willers; Rodrigues; Silva, 2012). Nesse caso, o registro começa quando um produto se torna resíduo, e vai até o momento em que ele passa por tratamento ou recuperação, voltando a ser considerado um produto útil (Mersoni, 2015).

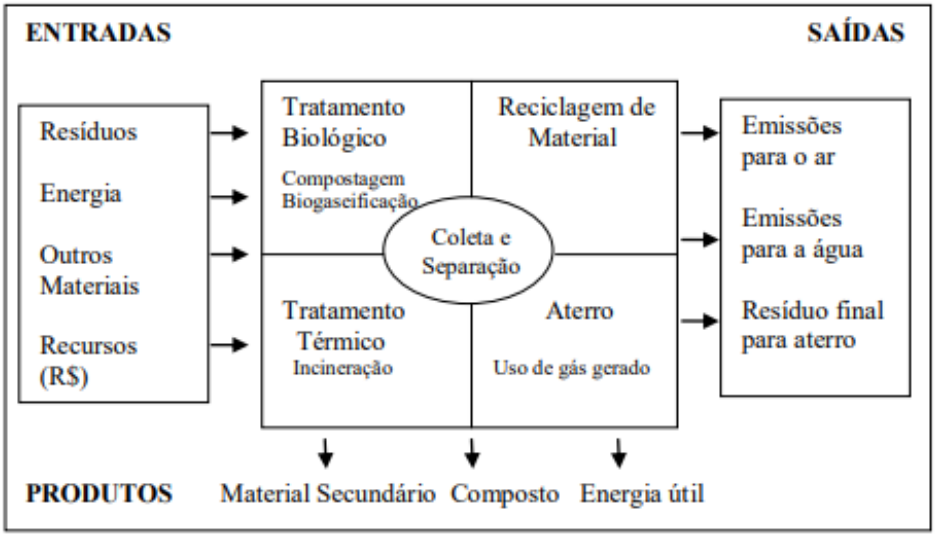


Figura 3.11 - Fronteiras do sistema para o Inventário do Ciclo de Vida dos RS (Merconi, 2015).

Para tanto, conforme representado na Figura 3.11, é fundamental estabelecer as fronteiras do sistema, a fim de determinar as etapas do processo que estão incluídas na ACV, delimitando sua extensão e o nível de detalhamento necessário (ABNT, 2009a). No sistema de gerenciamento, as entradas consistem em resíduos, energia e outros materiais, enquanto as saídas incluem materiais reciclados, compostos, energia útil, emissões para o ar e a água, e material destinado a aterros (Mersoni, 2015; Willers; Rodrigues; Silva, 2012), com cada entrada e saída sendo ponderados pela unidade funcional.

iii. Avaliação do impacto do ciclo de vida

A etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) compreende o entendimento dos impactos potenciais resultantes do sistema, bem como a interpretação da sua magnitude (Buchmann, 2018). Esta avaliação depende dos dados selecionados durante a etapa do ICV, com o aprofundamento do estudo, a seleção dos impactos a serem avaliados e a metodologia estando interligados ao proposto pelos objetivos o escopo da pesquisa (ABNT, 2009b).

A análise de impacto tem dois objetivos principais: aumentar a relevância dos dados de inventário ao fornecer informações sobre os potenciais impactos ambientais e facilitar a interpretação de forma mais gerenciável para a tomada de decisão (Ferreira, 2004).

Para que estas metas sejam alcançadas, a ISO 14.044 estabelece a realização de alguns processos, com eles se dividindo em elementos obrigatórios e opcionais (ABNT, 2009a). Dentre os elementos obrigatórios encontra-se a seleção de categorias de impacto, seus indicadores e modelos, a classificação e a caracterização. Já nos opcionais, lista-se a normalização, agregação e ponderação.

- Elementos obrigatórios

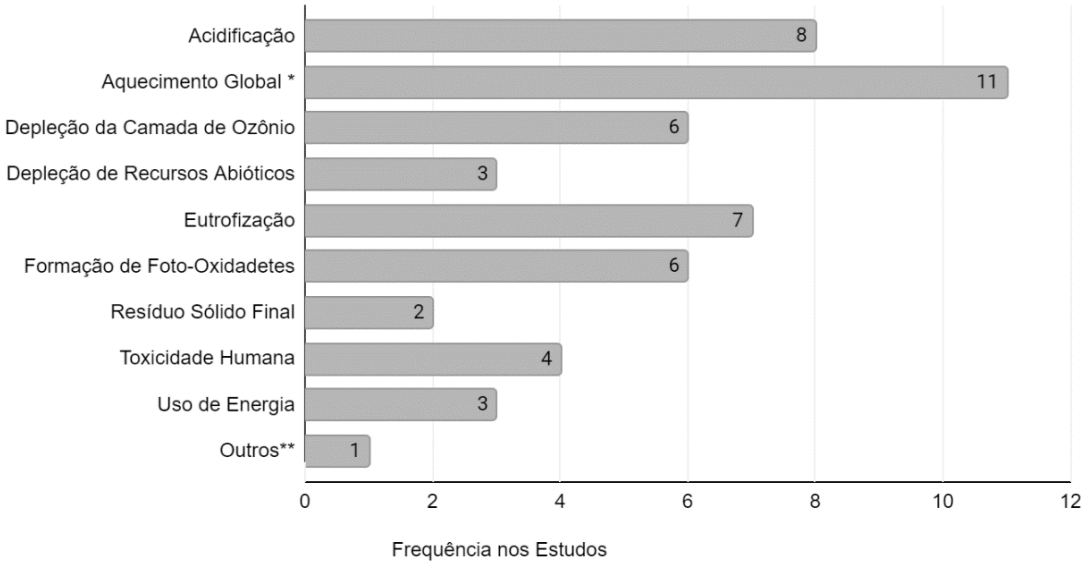
Conforme já observado, a Avaliação do Ciclo de Vida busca averiguar os impactos ambientais de um sistema. Neste cenário, para que tal ação seja possível, faz-se necessário estabelecer as categorias de impacto, eu em outras palavras, elucidar as questões ambientais das quais os resultados da análise serão associados (ABNT, 2009a).
Conforme ilustrado na Figura 3.12, o ICV é constituído por elementos, que mesmo em quantidades reduzidas, apresentam diferentes impactos ambientais e consumo de recursos, com seus fluxos mesmo que em menor quantidade podendo ter relevância ambiental significativa (Honda, 2014). Nesse contexto, Honda (2014) observa que a AICV desempenha o papel de interpretar as emissões potenciais, levando em consideração o conhecimento atual sobre as relações entre essas emissões e seus efeitos no ambiente.

Willers *et al*. (2012) observam que esta etapa é muito complexa e abrangente, com a leitura dos impactos sendo expressos a um produto específico de uma unidade de referência, com o estudado, e consequentemente seus resultados, sendo relativos às suas peculiaridades. Em consonância, a ISO 14.040 destaca que o enfoque da avaliação se dá em impactos ambientais potenciais, com resultados precisos não podendo ser estabelecidos. Isto ocorre em função de fatores tais quais a presença de incertezas inerentes à modelagem dos impactos ambientais e à consideração de que algumas resultantes também podem ocorrer no futuro. (ABNT, 2009a).

Ao todo, diferentes categorias de impacto que consideram o uso de recursos naturais, a saúde humana e consequências ecológicas podem ser utilizadas (ABNT, 2009b; Mersoni, 2015). Entretanto, para que a avaliação seja consistente, a escolha deve ser congruente com o objetivo de análise e limites do sistema, representando significância ambiental para a avaliação em questão (ABNT, 2016; Arduin, 2013) .

Após a seleção das categorias de impacto torna-se possível avançar para os elementos de classificação e caracterização, que consistem respectivamente na correlação dos resultados do inventário com as categorias escolhidas paro o estudo; e realização dos cálculos nos quais são feitas a conversão dos resultados para unidades comuns (ABNT, 2009b). Para tanto, parâmetros que contribuem para uma mesma base, tais como emissões de gases que colaboram com as mudanças climáticas, são agrupados com suas grandezas sendo computadas por meio do potencial, tal qual o de aquecimento global (Mersoni, 2015; Reichert e Mendes, 2014). Nesta etapa, conforme exemplificado pela figura 3.12 busca-se entender quais dados são importantes para cada impacto, com alguns podendo estar correlacionados à diferentes bases, tal como o Nox que influencia tanto nos efeitos de acidificação como nos de eutrofização (Mersoni, 2015).

Figura 3.12- Categorias de impacto utilizadas em diferentes estudos com temática em RSU



Aquecimento Global* inclui os estudos que utilizaram o termo “mudanças climáticas”. Outros** engloba as categorias de impacto citadas em apenas 1 dos estudos, sendo elas: ecotoxidade, enriquecimento de nutrientes, saúde humana cancerígenos, saúde humana não cancerígeno, disposição e aterro de materiais recicláveis orgânicos, disposição e aterro de recicláveis secos, ocupação terrestre e summer smog.

Tabela 3.3 - Categorias de impacto e indicadores ambientais para a AICV (de Ferreira, 2004; Mersoni, 2015; Oliveira, 2020)

Categoria de impacto	Escala	Problema Ambiental	Indicador	Resultado do indicador (exemplo)
Aquecimento Global	Global	Emissão de gases que contribuem para o aquecimento global	Gases causadores do efeito estufa, como CO_2, CH_4, N_2O	Kg de CO_2 equivalente em 50, 100 ou 500 anos
Acidificação	Regional/ Local	Mudanças no balanço de pH solo e água por meio da formação de gases ácidos	Cargas de emissão atmosférica e aquática com potencial de acidificação como Nox; Amônia, SO_2	Kg de SO_2 equivalente
Eutrofização	Local	Diminuição do nível de oxigênio dissolvido nos corpos receptores	Cargas de nutrientes que podem causar eutrofização, como Amônia, Nitrato, Fosfato, Nox e DQO	Kg de PO_4^- equivalente

Para além, há diferentes métodos de caracterização, com estes modelos podendo ter variações em relação a questão técnicas, (tais como escala e fontes de dados), assim como conceituais (escolha das categorias de impacto). Neste cenário, eles podem apresentar dois conjuntos de categorias (Oliveira, 2020):

i. Ponto Médio *(midpoint)* – analisa as substâncias e como elas podem afetar o ambiente antes de chegarem ao ponto final do impacto, sendo por este motivo caracterizadas como indicadores de impacto potencial. Engloba categorias como toxidade humana, acidificação e eutrofização (Figura 3.13).
ii. Ponto Final *(endpoint)* – observa diretamente os danos finais ao ambiente e como podem afetar a saúde, ecossistema e recursos naturais. Para tal, observa um potencial dano, o que pode representar incertezas, mas facilitar na interpretação dos resultados.

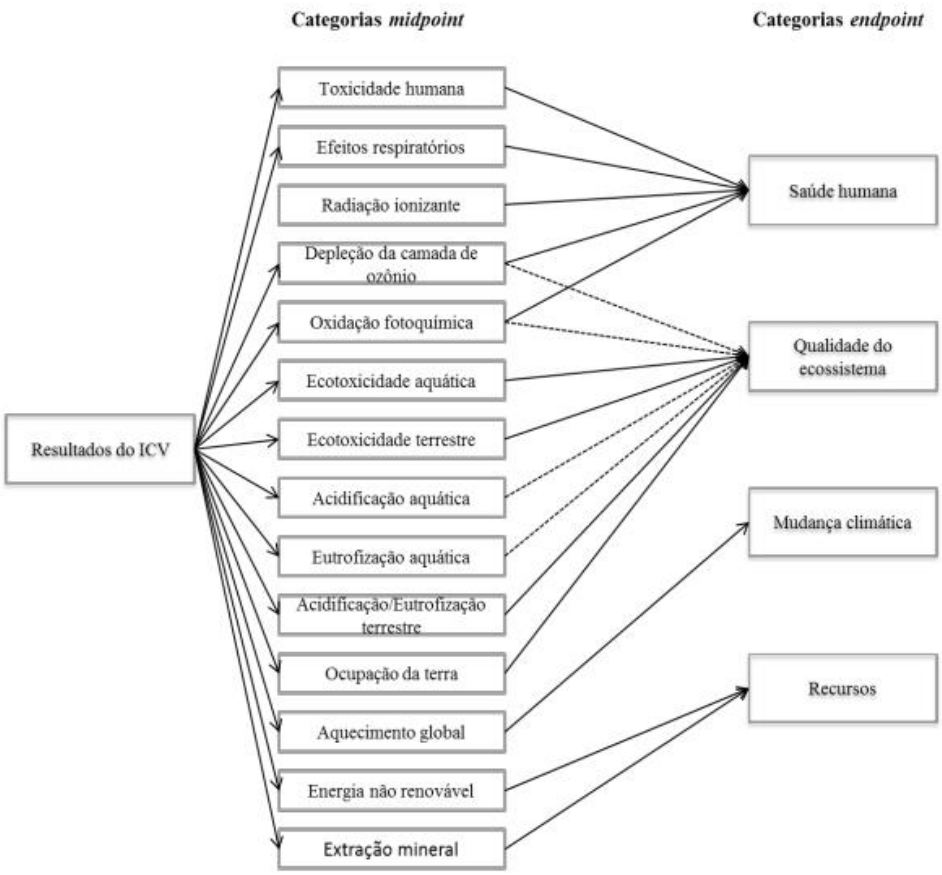


Figura 3.13 – Exemplos de categorias midpoint e endpoint
(Mendes, 2013)

Existem várias abordagens para realização da AICV, como indicado pela Tabela 3.4. No entanto, os diferentes métodos disponíveis ainda estão sendo desenvolvidos, de modo que, com exceção das categorias de impactos globais, não existe uma modelagem ideal e que resulte em caracterizações totalmente precisas (Honda, 2014; Mattos *et al.*, 2022ª) por meio de diferentes estudos, observaram que métodos *midpoint* são mais adotados, com destaque ao CML.

No geral, esses impactos estão ligados a duas formas de emissões: diretas e indiretas. As emissões diretas surgem de processos específicos, sem levar em conta outras etapas do ciclo do produto, como a queima de combustível diesel no transporte. Já as emissões indiretas estão relacionadas ao ciclo de vida dos itens consumidos, como as atividades necessárias para produzir o combustível (Gallo Junior *et al.*, 2018; Andrade, 2010).

Tabela 3.4 – Métodos para a avaliação e impactos na ACV
(Mendes *et al.*, 2015; Oliveira, 2020; Nobrega, 2019)

Método	Características	Categorias de impacto
CML 2002	Instruções baseadas na ISO, com abordagem midpoint e desenvolvido por meio da revisão de outros modelos a nível mundial O manual fornece fatores de caracterização para mais de 1.500 resultados diferentes de ICV.	Depleção de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, depleção de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática (água doce, marinha) e terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização.
Eco-Indicador 99	Método endpoint. Visa simplificar a interpretação e ponderação dos resultados da ACV por meio do cálculo de pontuações únicas (eco indicadores).	Mudança climática, depleção do ozônio e consumo de recursos minerais e fósseis, carcinogênicos, inaláveis orgânicos e inorgânicos, radiação ionizante e ecotoxicidade, acidificação e eutrofização, o uso da terra, com alguns tendo escopo de aplicação para locais específicos.
ReCiPe	Adaptação dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000 que integra e harmoniza as abordagens midpoint e endpoint em uma estrutura comum e consistente.	Mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática de água doce, eutrofização aquática marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, e aquática (água doce, marinha) radiação ionizante, uso do solo agrícola, uso do solo urbano, transformação de terra natural, esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce
IPCC	Realiza a estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), com os resultados sendo expressos em termos do potencial de aquecimento global para um horizonte temporal (20, 50, 1000 anos) em kg CO2-eq. O escopo geográfico desse indicador é global.	Mudanças climáticas/ aquecimento global.

- Elementos Opcionais

A depender do objetivo e escopo, algumas informações e elementos além dos descritos anteriormente serão necessários (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Dentre eles, tem-se:

i. Normalização: se refere ao cálculo da escala dos resultados em relação a uma referência, ou seja, indica quão significativo o resultado é em relação aos outros indicadores de análise, podendo ser útil, por exemplo, na verificação de inconsistências (ABNT, 2009b).

ii. Agrupamento: consiste na atribuição de categorias de impactos em conjuntos, por meio de características semelhante (entradas e saídas) ou por prioridade (baixa, média e alta) (ABNT, 2009b; Coltro, 2007).

iii. Ponderação: consiste na conversão numérica dos diferentes indicadores das categorias de impacto, com os resultados variando de acordo com as especificidades da avaliação (ABNT, 2009b).

A adoção destes elementos dependerá do nível de detalhamento e limites estabelecidos pelo estudo (ABNT, 2009a). Para Coltro (2007), recomenda-se a utilização de modelos de ponto médio e que abranjam os elementos obrigatórios (seleção, classificação e caracterização), não sendo indicado os elementos adicionais, visto que foram desenvolvidos com base em padrões internacionais, não sendo muito adequados para estudos brasileiros.

iv. Interpretação

Representando uma das últimas etapas da ACV, a interpretação do ciclo de vida possui o objetivo de avaliar os resultados e propiciar os significados do estudo (Oliveira, 2020). Consiste em um procedimento iterativo, com suas conclusões devendo dispor as limitações, descobertas e recomendações baseadas nas diversas fases do estudo (Ferreira, 2004).

Com o objetivo de atingir esse propósito, esta etapa deve englobar: i) a identificação dos resultados relevantes obtidos nas etapas anteriores, ii) a verificação da integridade, sensibilidade e coerência, garantindo que os dados necessários estejam completos e considerando possíveis incertezas, e iii) as conclusões e recomendações, assegurando que

os resultados estejam em conformidade com os objetivos e o escopo do estudo (ABNT, 2009b e Ferreira, 2004). Contudo, algumas restrições podem influenciar na interpretação dos resultados, tais como a coleta e a obtenção de dados confiáveis e subjetividade das escolhas e definições (ABNT, 2009b; Oliveira, 2020).

4. METODOLOGIA

4.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo visa apresentar o procedimento metodológico adotado no decorrer do estudo. Assim, entendendo o papel dos resíduos sólidos urbanos na geração de GEE, e que as formas de gerenciamento podem influenciar positivamente ou negativamente nos índices de emissão, a metodologia deste estudo foi desenvolvida de modo a possibilitar o entendimento de como as etapas do sistema de coleta seletiva de RSU do Distrito Federal influenciam a GEE.

Para tal, desenvolveu-se uma metodologia pautada em cinco fases, sendo elas:

i. Formulação do problema: no qual foram apresentados diferentes esferas e fatores do gerenciamento de RSU e as possíveis etapas de tratamento.

ii. Definição do modelo de análise: dada sua versatilidade em avaliar as emissões de GEE, selecionou-se o método de Avaliação do Ciclo de Vida como a ferramenta de análise.

iii. Definição do escopo: após caracterizar a coleta seletiva do Distrito Federal, delimitou-se o escopo, cenários, fronteiras da pesquisa, processo para coleta de dados e as abordagens de cálculo para estimar os diferentes consumos e emissões de GEE.

iv. Inventário e avaliação de impactos: no qual foi apresentado os dados e os cálculos de consumo e de cargas ambientais de cada sistema, além da caracterização das emissões por meio de fatores de equivalência.

v. Interpretação dos resultados: destinada à análise e reflexão sobre os resultados e conclusões obtidos ao longo da pesquisa, destacando-se especialmente ações com potencial para a redução de gases feito estufa.

4.2. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Conforme demonstrado nas seções anteriores, a gestão dos RSU envolve uma série de etapas interdependentes que requerem a adoção de alternativas e técnicas para que os

resíduos sejam tratados e dispostos de maneira adequada e sustentável (MENGUE *et al.*, 2015).

Em meio a este contexto de gerenciamento, torna-se essencial para os gestores, analistas e etc. a incorporação de ferramentas que possibilitem a análise dos impactos ambientais decorrentes de cada etapa dos processos utilizados.

Assim, ao adotar a ACV como método de análise, buscou-se seguir os procedimentos apontados pela ISO 14.040 e ISO 14.044, além de indicações provenientes de estudos de ACV com enfoque em resíduos sólidos urbanos (sessão 3.5.1).

4.2.1. Definição dos Cenários

Conforme mencionado anteriormente, o conceito de resíduos sólidos é complexo. Os produtos, antes de se tornarem resíduos, passam por diversas etapas, desde a produção, transporte e aprimoramento até atingirem a fase de utilização, sendo posteriormente considerados sem utilidade e, consequentemente, descartados.

Com o material tornando-se resíduo sólido, um novo ciclo se inicia. Os resíduos compostos por papéis, metais, plásticos, compostos orgânicos, vidros e derivados são acondicionados, coletados, transportados, tratados e separados. Os materiais passíveis de tratamento são reaproveitados em diferentes processos, enquanto os rejeitos são encaminhados para a disposição final. Paralelamente, novos ciclos iniciam-se, com os resíduos separados podendo ser processados e reintegrados à cadeia produtiva, incorporados em novos produtos e ciclos de vida.

Desta forma, considerando a complexidade e os objetivos desta pesquisa, a análise foi desenvolvida com base nas frentes de gerenciamento do Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal (SLU), que se faz responsável pelas fases de coleta até a disposição dos resíduos. Assim, buscou-se no decorrer do processo, observar desde a fase de coleta dos resíduos até a destinação em aterros, com as fases de processamento, comercialização e transporte dos resíduos triados sendo desconsideradas, uma vez que essas funções recaem sobre os responsáveis pela separação dos resíduos, não havendo disponibilidade de dados ou conhecimentos dos fluxos.

Assim, entendendo que os contratos de coleta seletiva e triagem de RSU do Distrito Federal estão se aproximando do término, resultando na elaboração de novos acordos que

poderão gerar mudanças no sistema, neste trabalho foram elaborados três cenários com o propósito de avaliar os impactos decorrentes das fases do gerenciamento da coleta seletiva. Cada cenário foi construído considerando as possíveis variações das emissões de gases de efeito estufa (GEE), tendo como premissa as emissões primárias do sistema, englobando tanto aquelas diretas quanto indiretas relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis e eletricidade, compostagem de compostos orgânicos (cenário 2) e da disposição final. Essa abordagem multifuncional visou proporcionar uma análise abrangente, incorporando diversas dimensões do sistema em estudo, permitindo assim uma melhor compreensão dos impactos ao longo do ciclo de vida.

- Cenário 1

Para ao primeiro cenário buscou-se caracterizar o atual sistema. Para tal, o enfoque do estudo pautou-se nas etapas de transporte, tratamento dos resíduos nas IRRs (instalações de recuperação de resíduos) e disposição final de rejeitos no Aterro Sanitário de Brasília. Nas fases de transporte foram consideradas os consumos necessários para realizara coleta em cada (porta a porta e ponto a ponto), os deslocamentos dos resíduos das RAs até as IRRs e o transporte do rejeito das IRRs aos transbordos e depois para ao aterro (Figura 4.1). No decorrer do sistema, estabeleceu-se que 70% do montante total de resíduos coletados são encaminhados para o aterro, enquanto os restantes (30%) são retirados do fluxo de análise na forma de materiais passíveis de reaproveitamento.

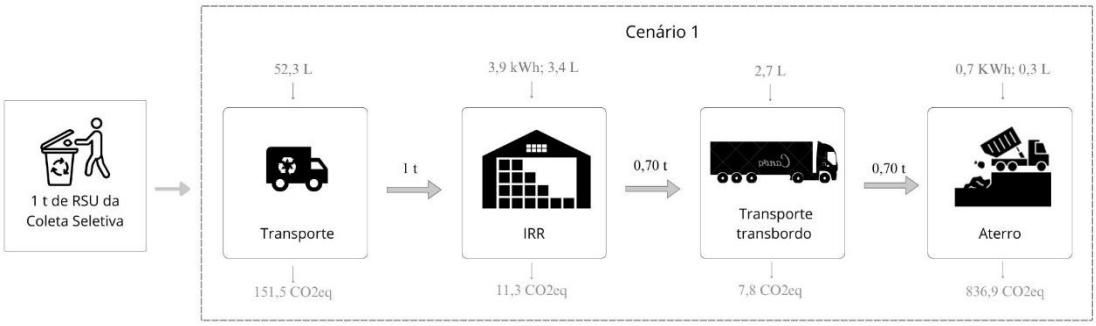


Figura 4.1- Diagrama Cenário 1

- Cenário 2

Entendendo que a fração orgânica dos resíduos sólidos é biodegradável, podendo ter como resultante um composto fertilizante ou condicionador do solo (PILISSÃO, 2023), além do que é estabelecido pela PNRS, que visa desviar o máximo possível de resíduos

da disposição final em aterros, o cenário 2 foi construído visando identificar as alterações nas emissões de gases de efeito estufa ao desviar a matéria orgânica para a realização da compostagem.

Assim, no cenário 2 a avaliação concentrou-se nos consumos e emissões relacionados às fases de transporte, operações das instalações de recuperação de resíduos (IRR), aterro e unidade de compostagem (Figura 4.2). Para tal, considerou-se que 63% dos resíduos triados foram destinados ao aterro, com a redução ocorrendo devido ao encaminhamento de 91% dos resíduos orgânicos para a unidade de compostagem, representando cerca de 7% do total de resíduos ao longo do fluxo. Em relação ao restante dos resíduos (30%), assim como no cenário 1, considerou-se que saíram do fluxo como materiais passíveis de reaproveitamento, sendo essa fração excluída das análises.

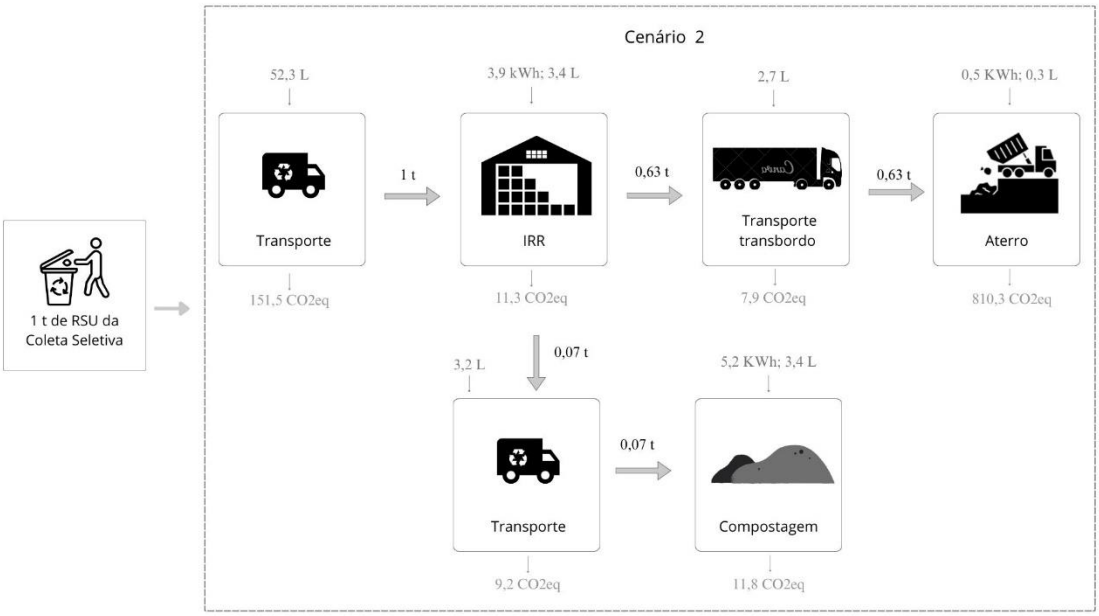


Figura 4.2- Diagrama Cenário 2

- Cenário 3

As diversas etapas da coleta seletiva enfrentam desafios, como baixa eficiência e contaminação de materiais, o que dificulta a comercialização e impacta a quantidade de rejeitos destinados ao aterro sanitário, como evidenciado diferentes estudos (Conke, 2015; MMA, 2022; da Silva, 2017; SLU, 2022; Zaneti e Silva, 2017).

Para superar esses obstáculos, o SLU vem implementando ações e iniciativas, como a mobilização da comunidade e programas de educação ambiental para aprimorar a

qualidade e quantidade de resíduos passíveis de reaproveitamento, juntamente com projeções de melhorias nas estações de triagem visando a redução de rejeitos e o aumento de materiais recuperáveis (SLU, 2023).

Com o intuito de compreender as mudanças que essas ações podem resultar, desenvolveu-se o cenário 3. Nele, mantêm-se as mesmas etapas consideradas no cenário 1, mas com um enfoque específico no aumento do aproveitamento dos resíduos coletados, através da redução dos rejeitos destinados ao aterro, com a análise concentrando-se nos impactos dessa alteração, com especial atenção para as emissões de gases de efeito estufa provenientes do processo de aterramento.

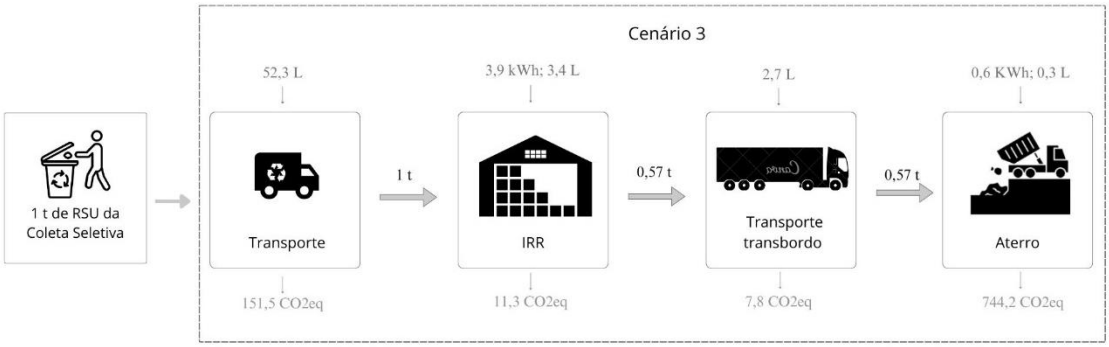


Figura 4.3 – Diagrama Cenário 3

Para tanto, conforme ilustrado pela Figura 4.3, foram examinados todos os consumos e emissões associados ao processo de transporte, assim como às operações das IRRs e do aterro. Em relação à quantidade de resíduos coletados, manteve-se a mesma entrada de materiais observados nos cenários anteriores, com as alterações do cenário 3 sendo introduzidas após o processo de separação. Desta maneira, este cenário considerou-se:

- Aprimoramento na recuperação de plástico, papel e metal resultando em um maior aproveitamento desses materiais (13%);
- Redução dos resíduos encaminhados para a disposição final, com 57% do volume total coletado sendo aterrado.
- Aproveitamento de 43% dos resíduos coletados. Como esses resíduos saem dos limites de análise, os impactos associados não foram quantificados.

4.2.2. Objetivos e escopo

Neste estudo, a realização da ACV teve por objetivo avaliar a geração de gases efeito estufa proveniente de diferentes cenários do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos da coleta seletiva no Distrito Federal (DF).

Visando esse propósito, foi adotada como unidade funcional (UF) e, coincidentemente, como fluxo de referência uma tonelada de resíduos sólidos urbanos (RSU) da coleta seletiva nas instalações de recuperação de resíduos, com as entradas e saídas de gases de efeito estufa (GEE) sendo estimadas com base nessa taxa de referência. Os dados empregados foram obtidos tanto de fontes primárias quanto secundárias, com as principais fontes sendo oriundas do sistema, de trabalhos e equipes do Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal.

Além disso, entende-se que os resíduos sólidos passam por várias fases até serem devidamente gerados. Este processo pode ser iniciado de diferentes maneiras, como nos processos de extração de matéria-prima, na produção de materiais ou produtos, seguido pela utilização desses materiais e pelo descarte que resulta na formação do resíduo, dando origem a novos ciclos, como o de destinação final, processamento e reintegração dos materiais separados à cadeia produtiva, e a criação de novos produtos.

Dessa forma, considerando as diversas etapas relacionadas aos resíduos, foi estabelecido, para este estudo, o limite de análise do "portão ao túmulo", com a avaliação iniciando no momento em que o material se torna resíduo até o instante em que é levado para a disposição final. Como os resíduos reaproveitados compõem um novo ciclo, essa etapa não foi considerada nos limites do sistema.

Desta maneira, como ilustrado pela Figura 4.4 as fronteiras do sistema incluíram: o transporte de RSU das regiões administrativas do Distrito Federal que participaram da coleta seletiva; a operação das unidades de recuperação de resíduos; o processo de compostagem que ocorre na Unidade de Compostagem da Ceilândia; o transporte entre as estações de transbordo; e o Aterro Sanitário de Brasília.

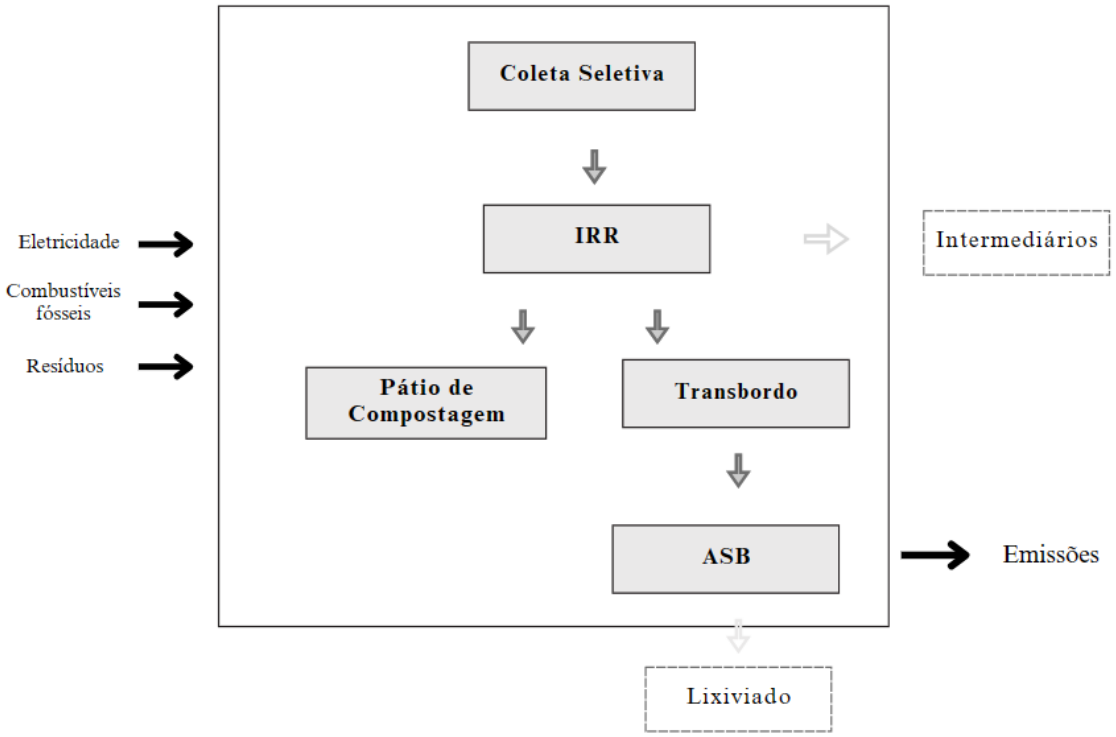


Figura 4.4 – Limites do sistema

Para as entradas, foram consideradas os resíduos gerenciados em cada etapa que permeia o limite do sistema, assim como o consumo de combustíveis fosseis e de eletricidade requisitados pelos equipamentos e transporte. Para tal, adotou-se o método de avaliação de impacto de impacto do IPCC.

Para além, etapas como a de tratamento do lixiviado e processamento dos materiais recicláveis por meio de intermediários (atravessadores, comerciantes, indústrias) não foram considerados, devido a limitações de dados e estudos disponíveis (lixiviados) e a grande variabilidade do mercado de recicláveis.

4.2.3. Construção do Inventário do Ciclo de Vida

Para realização do inventário foram consideradas desde as etapas de transporte até a disposição final dos resíduos, assim como as atividades resultantes do operacional das IRRs, estações de transbordo, unidade de compostagem e do aterro sanitário. Nas categorias de impacto, observou-se o potencial de aquecimento global. Para tal, conforme indicado a seguir, tornou-se indispensável a caracterização e definição dos métodos de quantificação de alguns parâmetros.

i. Caracterização dos resíduos

Cada região administrativa possui composições e acondicionamento próprios, com quantidade e tipo de materiais descartados variando de uma localidade para a outra (ANEXO I) (SLU, 2022). Estas características influenciam nos processos que ocorrem nas IRRs, assim como na quantidade de rejeitos que serão destinados para a disposição final no aterro sanitário, influenciando os consumos de combustível, eletricidade e emissões de GEE.

Dessa forma, a fim de garantir uma interpretação coesa, cada localidade foi examinada individualmente, levando em consideração sua representatividade em cada etapa da análise e a unidade funcional, conforme ilustrado pela Figura 4.5.

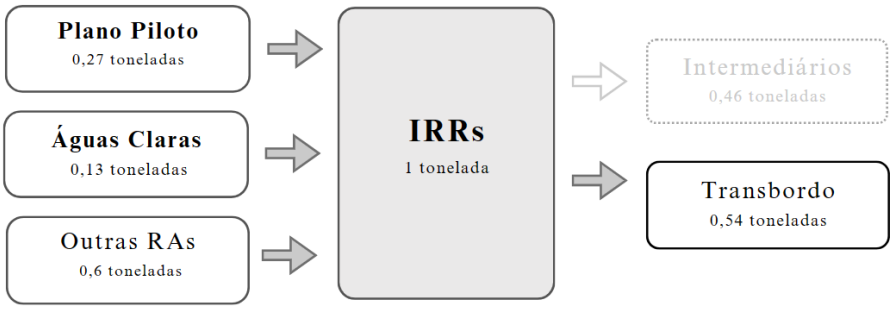


Figura 4.5 – Exemplo de distribuição da unidade funcional no decorrer de cada processo

Considerações adicionais foram realizadas para a gravimetria, havendo ajustes de um cenário para o outro. Assim, para os materiais provenientes da coleta e que dão entrada nas IRRs, foram considerados estudos gravimétricos do período seco de 2022 disponibilizados pela SLU. Para as regiões que não foram abrangidas nas amostras avaliadas em 2022, adotou-se dados de estudos anteriores ou valores de regiões vizinhas que possuem as características próximas (como mesmo circuito de coleta, tamanho e renda da população).

Para a caracterização dos rejeitos que vão para o aterro, adotou-se a mesma fonte de dados citada anteriormente. Considerando que os dados gravimétricos estavam disponíveis apenas para alguns galpões, a composição das demais localidades foi estimada a partir dos valores de uma IRR que dispunha de dados. Nesse sentido, foi observada a equivalência das gravimetrias de entrada nos galpões, as RAs que os abastecem e a

infraestrutura das IRRs, adotando-se os valores dos galpões mais equivalentes em relação aos fatores analisados.

No cenário 2, que contempla o desvio da matéria orgânica para a unidade de compostagem da Ceilândia, foi efetuada uma correção na composição dos orgânicos do rejeito, seguida por uma normalização, assegurando que a soma de todas as frações equivalha a 100%.

Já no cenário 3, para estimar a fração de materiais que poderiam ser desviados dos rejeitos, adotou-se o estudo conduzido pela Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT, 2022) no qual, através da comparação de diferentes cenários e da composição dos resíduos sólidos urbanos, identificou a fração dos materiais presentes nos RSU que apresentam características propícias para a reciclagem, conforme indicado pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Taxa de aproveitamento
(ANCAT 2022, adaptado)

Material	Taxa de Aproveitamento
Alumínio	13,0%
Papel	69,2%
Vidro	24,8%
Plástico	20,3%
Pet	21,7%
Lata de aço	9,4%

Ao empregar esses dados, procedeu-se à modificação das composições do rejeito, seguida de sua normalização.

ii. Consumo de combustível

O transporte desempenha um papel fundamental na gestão de resíduos sólidos urbanos, tendo em vista sua influência significativa nas emissões de dióxido de carbono (Franco e Steiner, 2022). A avaliação do consumo de combustível é um aspecto crucial, uma vez que as emissões atmosféricas provenientes dos transportes são geradas pela queima de combustíveis fósseis nos motores dos veículos utilizados (Silva e Contreras, 2020).

Em termos gerais, o consumo de combustíveis depende da massa dos resíduos transportados e da distância percorrida, com o fator de consumo de cada veículo variando, por exemplo, com relação ao tempo de uso, quantidade de resíduos transportados, qualidade do combustível, topografia da via e do tipo de transporte adotado (caminhão baú, caminhão compactador, carreta) (Campos *et al*., 2011). Deste modo, foram adotados os fatores de consumo apresentados pela literatura, com o cálculo de consumo de combustível fóssil sendo realizado por meio da seguinte expressão:

$$Ctransporte = (1 + \alpha) * (f1 * \sum Pi * Dij\ trajetória1 + f2 * \sum Pj * Dj\ trajetória2)$$

Equação 4.1

Conforme indicado pela equação, o consumo de combustível (Ctransporte, L/ano) é determinado levando em conta:

. α: fator de proporcionalidade do consumo de combustível no trajeto de volta,
. f1 (L/t.km): fator de consumo de combustível do caminhão.
. f2 (L/t.km): fator de consumo de combustível utilizado no segundo deslocamento,
. Pi, (t/ano): quantidade total de resíduos sólidos coletados em cada região administrativa,
. Dij, (km): distância percorrida durante a coleta seletiva,
. Pj, (t/ano): quantidade de rejeitos enviados para as IRRs,
. Dj, (km): deslocamento da RA até a IRR.

O mesmo método foi utilizado para calcular o consumo de combustível relacionado aos deslocamentos entre as IRRs, unidade de compostagem, transbordo e aterro. A identificação das origens e destinos dos resíduos baseou-se em dados do Sistema de Gestão de Informações (SGI), bem como informações provenientes dos relatórios e estudos do SLU de 2022 e 2023. Ao definir as rotas, consideraram-se os circuitos de coleta seletiva monitorados pelo SLU, que se dividem nos serviços prestados por empresas terceirizadas (denominadas Coleta Seletiva) e por associações e cooperativas de catadores de materiais recicláveis (chamadas de coleta seletiva inclusiva), ativas no período de julho de 2022 a junho de 2023, conforme disponibilizado pelo Geoportal SLU (2023). Além disso, foram incorporadas ferramentas de análise disponíveis no software ArcGIS Pro. Em relação à definição dos fatores de consumo de combustível de cada veículo, adotou-se os padrões de emissão de veículos europeus, conforme apontados na Tabela 4.2., a qual estabelece as emissões de poluentes de veículos automotores que circulam na União Europeia,

Dado que equipamentos movidos a combustíveis fósseis também são utilizados nas operações das IRR, na unidade de compostagem e no aterro, adotou-se a seguinte expressão para calcular os consumos destes equipamentos:

$$C\ operação = \Sigma fj * Ptunidades$$

Equação 4.2

Sendo:

. C operação (L/ano): o consumo total de diesel pelas unidades.

. Fj (L/t): o fator de consumo de combustível específico de cada unidade

. Pt (t/ano): é a quantidade de resíduos gerenciada

Os fatores de consumo relativos às Equação 4.1e Equação 4.2 estão reunidos na Tabela 4.2.

iii. Consumo de Eletricidade

O setor de energia é responsável pela emissão de gases devido à queima de combustíveis e às emissões fugitivas. Durante a queima de combustíveis, sejam eles primários ou secundários (dados já publicados na literatura), ou nas emissões fugitivas no qual ocorrem vazamentos e evaporação sem aproveitamento energético, são liberados gases como CO_2, CH_4 e N_2O que representam um impacto significativo no cenário geral das emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2022).

Ao explanar sobre os elementos que podem compor os sistemas de gestão de RSU, observa-se que parte dos equipamentos utilizados nas unidades de recuperação requererem energia elétrica para funcionamento. Assim, para realizar a estimativa do consumo total de energia elétrica foi adotada a seguinte expressão:

$$C\ eletricidade = \sum_{unidades} fce * Pt$$

Equação 4.3

do qual:

. Celetricidade, (kWh / ano): representa o consumo total de energia elétrica,

. fce, (kWh/t de resíduos gerenciados) consumo específico de eletricidade em cada unidade avaliada,

. Pt, (t/ano): a quantidade de resíduos gerenciados na unidade

Os fatores de emissão correspondentes ao consumo de eletricidade estão elucidados na Tabela 4.2.

iv. Emissões de GEE associados ao consumo de combustível e eletricidade

Após determinar os consumos associados a cada etapa, procedeu-se ao cálculo das emissões de GEE resultantes do consumo de diesel e eletricidade. Para determinar as emissões relacionadas aos equipamentos movidos a diesel, foram considerados os três principais gases: dióxido de carbono (CO2), metano (CH4) e óxido nitroso (N2O), excluindo as emissões provenientes do processo de produção do diesel.

Os cálculos foram realizados utilizando a seguinte expressão:

$$Ei = \beta i * Ctotal$$

Equação 4.4

onde:

. Ei (kg/ano): a emissão do poluente i,

. Bi (kg/L de diesel): o fator de emissão específico do poluente i,

. C_{total} (L/ano): o consumo total de diesel em cada situação avaliada.

Para determinar os fatores de emissão, foram analisados dados dos contratos de coleta e triagem (SLU, 2022a) e registros provenientes das rotas de coleta (COGEO/SLU, 2023), no qual revelou-se que todos os veículos (caminhões compactadores de até 15 t, caminhões carretas com mais de 15 t e caminhões tipo *roll-on-roll-off*) deveriam estar em conformidade com os limites de emissão do PROCONVE 5 (ou EURO 3). Assim, com base nestas informações e por falta de maiores especificações, dado a alta gama de veículos utilizados, adotou-se como fatores de emissão dados presentes de estudos de ACV em RSU e da base de dados ECOINVENT 3.7.

Já as emissões decorrentes do consumo de eletricidade foram calculadas utilizando a Equação 4.5, com a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) equivalente liberada na atmosfera devido à produção de energia elétrica sendo determinada com base no fator de emissão obtido por meio da análise de despacho do Ministério da Ciência, Tecnologia,

$$Ee = e * Celetricidade$$

Equação 4.5

Onde,

. Ee (kg/ano): a emissão de CO2 devido a produção de energia elétrica,

. e (kg/kWh): o fator de emissão específico da produção de energia elétrica;
. Celetricidade (kWh/ano): consumo total de energia elétrica em cada cenário avaliado.
Os fatores de emissão correspondentes às emissões estão sintetizados na Tabela 4.2.

v. Compostagem

A compostagem é um processo de degradação aeróbia em que microrganismos decompõem compostos orgânicos, e geram como uma das resultantes, gases tais como CH_4 e N_2O, com as emissões associadas a esse processo variando a depender da fração dos insumos tratados (da Silva, 2020; de Souza et al., 2020).

Visando entender as emissões advindas dos resíduos orgânicos quando submetidos à compostagem, adotou-se a expressão proposta por Boldrin et al., (2011) que calcula quantidade de emissões gasosas contendo carbono, conforme indicado pela seguinte equação:

$$Car = M_t * \sum_{f=1}^{n} (m_f * TS_f * C_f * VS_{deg,f})$$

Equação 4.6

Onde,

. Car, (kg de C): quantidade de carbono que se torna gasoso,
. M_t, (kg): massa de resíduos,
. m_f (0-1): fração de resíduos ,
. TS, (0-1): fração de resíduo seca,
. C_f (0-1): quantidade de carbono (fração de TS) na fração de resíduo,
. $SV_{degrad,}$ (0-1): taxa de degradação.

Em sequência, como 1% do carbono consumido é convertido em metano (IPCC, 2006), para estimar a quantidade emitida adotou-se:

$$CH_4 = \frac{Car * \frac{16}{12}}{100}$$

Equação 4.7

Na compostagem uma fação do nitrogênio contido no material é decomposto, levando à emissão de gases, tal qual o óxido nitroso (N_2O). Assim, com o objetivo de estimar as principais emissões provenientes desse processo, adotou-se o mesmo método de Borges et al., (2021), sendo:

$$Emissões\ de\ N_2O = \sum(M *. EF) * 10^{-3}$$

Equação 4.8

no qual:

. Emissões de N_2O (Gg de N_2O): emissões totais de N_2O no ano do inventário,
. M (kg de resíduos sólidos orgânicos): massa de resíduos orgânicos tratados biologicamente,
. EF (g N_2O /kg de resíduos tratados): fator de emissão da compostagem

Os fatores de emissão correspondentes ao tratamento estão sintetizados na Tabela 4.2.

vi. Disposição final

A disposição final em aterros sanitários se refere a última etapa do gerenciamento dos resíduos sólidos, e consiste em uma das fases mais desencorajadas, porém necessária em função da alta geração de materiais não reinseridos no ciclo produtivo (Brasil, 2010; Souza et al., 2019).

Como um todo, ao se utilizar este tipo de disposição os rejeitos aterrados ficam propícios à proliferação de bactérias e arqueias anaeróbias que realizam a decomposição dos resíduos resultando na produção de biogás (altamente rico em metano) e de outros gases, como dióxido de carbono (CO_2) e compostos orgânicos voláteis não metânicos, com a emissão de biogás dependendo de diversos fatores, como as condições climáticas da região, a eficiência da camada de cobertura e do sistema de captação de gases e da composição gravimétrica dos resíduos aterrados (Borba *et al*., 2018; Souza *et al.*, 2019).

Assim, considerando a significativa fração de materiais da coleta seletiva levados para a disposição final, tornou-se imperativo estimar as emissões decorrentes dos rejeitos encaminhados para o Aterro Sanitário de Brasília.

Neste sentido, este estudo aferiu as emissões por meio do modelo de decaimento de primeira ordem, sugerido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006). Neste, os fatores de emissão são estimados com base na quantidade de resíduos da coleta seletiva depositados no aterro e na composição gravimétrica, além do tempo de operação do aterro. Como um todo a estimativa das emissões é feita considerando os principais gases envolvidos, como o metano (CH_4), conforme indicado pela equação abaixo,

$$Emissões_{CH_4} = \varphi * (1 - f) * GWP_{CH_4} * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * COD_f * FCM * \sum_{x=1}^{y} \sum_{j} W_{x,j} * COD_j * (1 - e^{-kj})$$

Equação 4.9

Com os parâmetros envolvidos sendo:

. φ: o fator de correção para incertezas do modelo,

. f: a fração de metano (CH_4) capturada e queimada,

. GWP: o potencial de aquecimento global do CH_4,

. OX: o fator de oxidação,

. F: a fração em volume de CH_4 no biogás emitido pelo aterro,

. CODf: fração de carbono orgânico degradável que podem degradar efetivamente dentro do aterro

. FCM: o potencial de produção de CH_4 para aterros anaeróbicos,

. CODj: a fração biodegradável de carbono por categoria de resíduos sólidos.

vii. Fatores de consumo e emissão utilizados para a construção do ICV

Considerando as etapas de cálculo mencionadas anteriormente, foi necessário adotar diferentes fatores correspondentes a cada fase de entrada e saída. Com o objetivo de apresentar todos os valores adotados de uma vez, foi elaborada a Tabela 4.2, que detalha o processo, o valor, a unidade de medida e a fonte dos dados utilizados.

Tabela 4.2 – Fatores de consumo e emissão de GEE

Origem	Descrição	Valor	Unidade	Fonte
Transporte	Consumo de diesel – caminhão compactador 15 m^3	0,15	L/ t km	Merrild *et al.*, 2012
	Consumo de diesel – caminhão carroceria abertura fixa	0,13	L/ t km	Merrild *et al.*, 2012
	Consumo diesel - carreta (27 m^3)	0,03	L/ t km	Merrild *et al.*, 2012
IRR	Consumo de eletricidade	2 - 10	kWh/t	Calculado
	Consumo de diesel	3,4	L/ t	Merrild *et al.*, 2012
Compostagem	Consumo de eletricidade	5	kWh/t	Calculado
	Consumo de diesel	3,4	L/ t	Leme, 2010
Aterro	Consumo de eletricidade	1	kWh/t	Calculado
	Consumo de diesel	0,281	L/ t	Leme, 2010
Eletricidade	Emissões de CO_2 na geração de eletricidade	0,376	kg CO2/kWh	Brasil, 2023
Queima de diesel	Emissões de CO_2	2,86	kg/L diesel	Brasil, 2013
	Emissões de CH_4	0,216	g/L diesel	CETESB, 2018
	Emissões de N_2O	0,1083	g/L diesel	CETESB, 2018
Fatores de equivalência (mudanças climáticas – GWP100)	CO2 para CO_2-eq	1	CO_2 eq	FGVces, 2022
	CH4 para CO_2-eq	28	CO_2 eq	FGVces, 2022
	N2O para CO_2-eq	265	CO_2 eq	FGVces, 2022

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA COLETA SELETIVA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO DISTRITO FEDERAL

A atual gestão de resíduos sólidos urbanos no Distrito Federal visa promover a integração da comunidade nas atividades de coleta e separação dos resíduos, bem como descentralizar o tratamento dos mesmos. Isso envolve a implementação de diferentes medidas, tais como a instalação de unidades de recuperação de resíduos, a regulamentação de associações e cooperativas de catadores e a adoção da coleta seletiva (SLU, 2022).

Focando no processo de coleta seletiva, no DF os resíduos são separados de forma bipartida (recicláveis ou não recicláveis), com os materiais recicláveis sendo coletados de diferentes RAs e encaminhados para galpões onde são realizadas as etapas de triagem, com o tipo de material a ser separado variando de acordo com sua qualidade e com o mercado de recicláveis no referido período (Silva, 2017; SLU, 2023).

Atualmente, este serviço está segmentado em duas modalidades, nomeadas de coleta seletiva e coleta seletiva inclusiva[3]. A coleta seletiva é conduzida pelas empresas privadas, que também realizam a coleta convencional, principalmente por meio de caminhões compactadores. Com parte destes equipamentos possuindo braço munck, estas empresas realizam a coleta de áreas urbanas com predominância de prédios e condomínios que utilizam contêineres para a disposição dos resíduos (SLU, 2023).

Por outro lado, a coleta seletiva inclusiva é realizada por cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis, contratadas principalmente para atuar em regiões administrativas com habitações unifamiliares e com disposição dos resíduos porta a porta, devido aos veículos, já que a coleta das cooperativas é realizada por meio de caminhões

[3] Algumas cooperativas também recebem doações de terceiros. Como essa ação não consta como atividade obrigatória, os materiais recebidos não são obrigatoriamente pesados e ficam fora dos registros de entrada. No entanto, ao serem triados, as doações se misturam com os demais resíduos, sendo pesados juntamente com os materiais destinados à venda ou com o rejeito. Isso pode resultar em uma discrepância entre os resíduos que entram e saem de cada IRR, podendo levar a um desequilíbrio do balanço de massa do sistema (SLU, 2023a).

do tipo *roll-on-roll-off* ou de carrocerias abertas (SLU, 2023). Os caminhões adotados estão ilustrados por meio da Figura 5.1.



Figura 5.1 – Caminhões utilizados na coleta seletiva

(Agência Brasília, 2020; Carvalho, 2022; CNB, 2022)

Legenda: i. Caminhão compactador com braço munck; ii.caminhão roll-on-roll-off; iii. Caminhão de carrocerias abertas

De todo modo, os resíduos coletados são encaminhados para Instalações de Recuperação de Resíduos (IRR)[4], onde os catadores das cooperativas e associações realizam a separação manual. Conforme relato do SLU (2023), os primeiros contratos com cooperativas e associações de catadores foram iniciados em 2016, sendo expandidos ao longo dos anos, com o SLU mantendo atualmente 22 contratos destinados à coleta seletiva inclusiva e 20 contratos de triagem.

Quanto aos galpões, o SLU mantém dois centros de triagem, cuja gestão é compartilhada, além de quatro IRRs próprias. Outros 10 galpões também são utilizados, disponibilizados por meio das administrações regionais, alugados (pelo SLU ou cooperativas) ou por cessão de uso (SLU, 2023).

[4] Neste trabalho, os termos IRR, galpões e CTR são utilizados como sinônimos.

Conforme apresentado durante uma reunião com membros do SLU (2023), as 16 instalações possuem uma infraestrutura diversificada, podendo estar equipados com esteiras de elevação, esteiras horizontais, prensas, balanças; como também sistemas de reaproveitamento de água, hortas, instalações para beneficiamento de plástico, isopor e papelão, áreas verdes e de estocagem de material, além de espaços dedicados a escritórios, banheiros e refeitórios.

No entanto, há também cooperativas que operam em galpões mais simples, contendo de modo geral uma área coberta e mesas para a disposição dos resíduos a serem triados (SLU, 2023a). Informações mais detalhadas podem ser encontradas no Anexo I.

Seguindo o processo, como resultante da triagem, obtém-se materiais recicláveis, compostos orgânicos e rejeitos que são encaminhados para comercialização, doações e transbordo/ aterro sanitário (SLU, 2022).

Conforme apontado em estudos, o gerenciamento de RSU recicláveis no DF é importante visto a existência do mercado de recicláveis, o incentivo do SLU e possibilidade de mudanças nas áreas social, ambiental e econômica (Silva, 2017), além do previsto pela PNRS, que veta encaminhar materiais passíveis de recuperação para o aterro sanitário (Berguenmayer; Silva; Beserra, 2020). Entretanto, mesmo após um período em que a CS está sendo implementada, os efeitos positivos se mostram pouco visíveis dada a quantidade de rejeitos resultantes deste processo (Zaneti e Silva, 2017).

Conforme pode ser observado por meio de dados de 2022, a afirmação de Zaneti e Silva (2017) ainda se mostra verdadeira. Como um todo, cada uma das IRRs recebeu resíduos de diferentes regiões administrativas, com o Plano Piloto, Águas Claras, Taguatinga, Guará e Ceilândia possuindo maior representatividade na geração de resíduos. Durante o ano, foram processadas 42.505,49 toneladas de resíduos seletivos, o que corresponde a aproximadamente 6% do total coletado em 2022 (Figura 5.2).

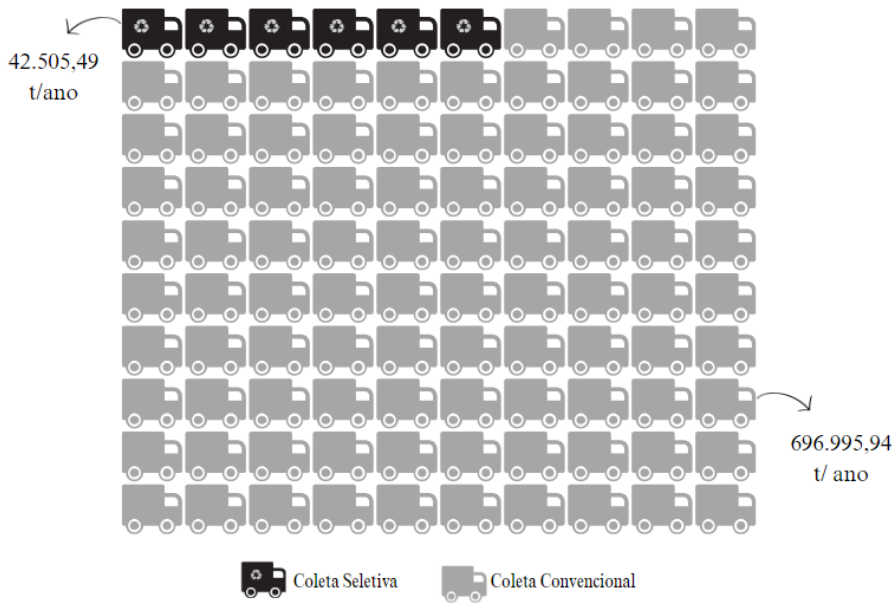


Figura 5.2 – Representatividade das coletas convencional e seletiva no ano de 2022. (SLU, 2022d)

Após a separação dos materiais da coleta seletiva, cerca de 22.939,13 toneladas de rejeitos foram destinadas ao aterro, resultando em uma taxa de 54% de material descartado. Por outro lado, 19.566,01 toneladas de materiais foram vendidas e destinadas à reciclagem, representando um aproveitamento de 46 % (SLU, 2022).

5.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

5.2.1. Apresentação dos dados

A partir de consultas no Sistema de Gestão Integrado (SGI / SLU) foram obtidos os dados referentes às quantidades de resíduos coletados e seus locais de destino para o período de julho de 2022 a junho de 2023. Após uma análise minuciosa dos registros identificados, optou-se por retirar do estudo os resíduos encaminhados para o galpão da Asa Sul, pois os valores registrados poderiam representar também dados da coleta convencional. Além disso, observou-se que neste período, nem todo material coletado foi registrado no

sistema[5]. Isto significa que os valores utilizados no decorrer do trabalho estão abaixo dos indicados pelos relatórios publicados pelo SLU[6].

A quantidade de resíduos coletados assim como as RAs de origem e galpões de destino estão representados pela Tabela 5.1. Como um todo, identificou-se 26.824 toneladas de resíduos provenientes de 30 RAS. Como não foram utilizados os valores dos resíduos encaminhados para o galpão da Asa Sul, as coletas do Plano Piloto, Octogonal/ Sudoeste e parte do Cruzeiro não foram contabilizadas. Este quantitativo contempla ambas as modalidades de coleta seletiva do Distrito Federal (coleta seletiva e coleta seletiva inclusiva), adotando-se a nomenclatura "coleta seletiva" apenas para melhor fluidez do texto.

Tabela 5.1 – Toneladas de resíduos provenientes da coleta seletiva por RA - jul/2022 a jun/2023
(SGI/ SLU, 2023)

RA Origem	RSU (t/ano)	Destino	RA Origem	RSU (t/ano)	Destino
Águas Claras	6.203	CTR 1 e 2	Park Way	52	CTR 1 e 2
Arniqueira	229	CTR 1 e 2	Planaltina	511	CTR 1 e 2
Brazlândia	554	IRR Brazlândia	Recanto das Emas	629	CTR 1 e 2
Candangolândia	42	Cooperativa Renascer	Riacho Fundo	513	IRR PSul
Ceilândia	3.809	IRR PSul	Riacho Fundo II	90	IRR PSul; CTR 1 e 2
Cruzeiro	4	CTR 1 e 2	Samambaia	364	Coop. Recicle a Vida; IRR PSUL
Fercal	24	CTR 1 e 2	Santa Maria	312	Cooperativa R3; CTR 1 e 2; SIA B

[5] A partir dos relatórios do SLU (SLU, 2022d, 2023b), notou-se que para o período de análise (julho 2022-junho2023) foram registradas 46.338t de RSU da coleta seletiva, com 1.493t correspondendo ao galpão localizado na Asa Sul. Já pelos dados do SGI, para o mesmo período contabilizou-se 32.238t de resíduos d coleta seletiva, com 5.414t correspondendo ao galpão da Asa Sul.

[6] A quantidade de resíduos provenientes da coleta seletiva inclusiva pode ser obtida por meio de pesagens em locais que possuem balanças fixas, com os valores obtidos sendo registrados no SGI. Paralelamente, os quantitativos também podem ser encontrados a partir de sistemas de balança embarcada provenientes dos próprios equipamentos, com os registros não sendo necessariamente lançados no sistema de gestão integrado (SGI) (SLU, 2023a).

RA Origem	RSU (t/ano)	Destino	RA Origem	RSU (t/ano)	Destino
Gama	1.936	CTR 1 e 2	São Sebastião	7	Cooperativa ECOLIMPO
Guará	4.692	CTR 1 e 2	SCIA	21	CTR 1 e 2
Itapoã	3	IRR Paranoá	SIA	23	CTR 1 e 2; SIA B
Jardim Botânico	343	IRR SCIA Definitivo; IRR PSUL e IRR Paranoá	Sobradinho	79	Sobradinho
Lago Norte	6	Cooperativa CRV	Sobradinho II	525	CTR 1 e 2; Sobradinho
Lago Sul	23	CTR 1 e 2	Taguatinga	4.426	IRR PSul
Núcleo Bandeirante	52	Cooperativa Renascer	Varjão	2	CRV
Paranoá	316	IRR Paranoá; IRR Sobradinho	Vicente Pires	1.034	CTR 1 e 2
Total			**26.824**		

Seguindo os procedimentos indicados na metodologia, obteve-se a média da composição gravimétrica dos resíduos coletados, conforme ilustrado pela Figura 5.3. De modo geral, observa-se que embora os resíduos da coleta seletiva apresentem uma maior proporção de materiais como papel e plástico, ainda há uma quantidade significativa de orgânicos e rejeitos.

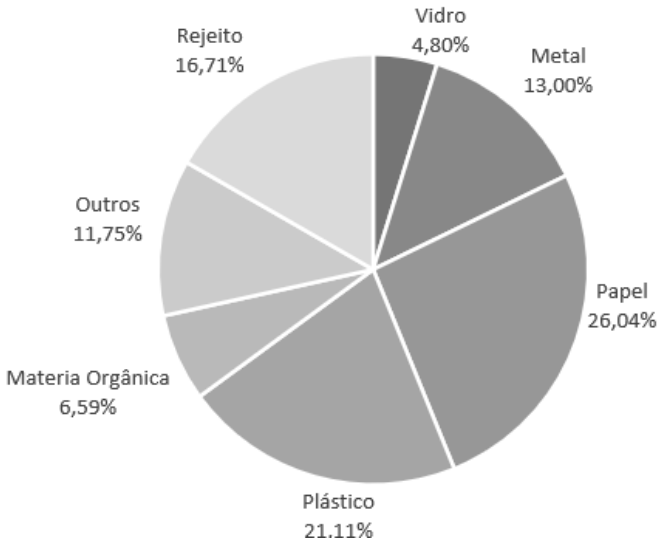


Figura 5.3– Composição gravimétrica de resíduos da coleta seletiva do Distrito Federal (SLU, 2022b)

Para estimar a quantidade de rejeito que sai de cada IRR com destino ao transbordo e posteriormente, para o aterro, adotou-se para cada galpão a média das frações indicadas pelos relatórios do SLU de 2022 e 2023 (SLU, 2022d, 2023b), atentando-se para utilizar apenas as frações correspondentes ao período de análise do estudo.

Tabela 5.2 – Quantidade e destino dos rejeitos descartados pelas IRR

IRR	Resíduos triados (t/ano)	Rejeito (t/ano)	Transbordo de destino
Coop. Recicle a Vida	346	47,6	Ceilândia
Cooperativa CRV	8	3	Sobradinho
Cooperativa ECOLIMPO	7	1,2	Asa Sul
Cooperativa R3	33	6	Gama
Cooperativa Renascer	94	0,6	Asa Sul
CTR 1 e 2	15.596,00	13.781,40	Asa Sul
IRR Paranoá	159	26,3	Sobradinho
IRR PSul	8.878,00	4.905,90	Ceilândia
IRR SCIA Definitivo	107	58,2	Asa Sul
IRR SIA B	21	2,2	Asa Sul
Brazlândia	554	13,5	Brazlândia
Sobradinho	1021	311,8	Sobradinho
Total	**26.824**	**18.899**	**5 transbordos**

Conforme ilustrado pela Tabela 5.2, sai dos galpões um total de 18.899 toneladas de rejeitos, sendo as CTR 1 e 2, IRR PSUL e IRR SIA Definitivo as localidades com menor aproveitamento dos resíduos. Como cada cenário observou diferentes situações, ao seguir os procedimentos indicados na metodologia, obteve-se composições gravimétricas variadas para a saída de rejeito em cada cenário, conforme indicada pela Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Composição gravimétrica dos rejeitos para os diferentes cenários
(*SLU, 2022; ** Elaborado pela autora).

Tipo	Classe	Cenário 1*	Cenário 2**	Cenário 3**
Vidro	Vidro Branco, Verde, Âmbar e Outros	1,36%	1,46%	1,18%
Metal	Alumínio	0,49%	0,53%	0,49%
	Ferroso	2,39%	2,56%	2,76%
	Outros	0,74%	0,79%	0,85%
	Latinhas	0,08%	0,09%	0,09%
Plástico	PET	1,65%	1,77%	1,49%
	Duro	2,92%	3,13%	2,69%
	Mole	1,12%	1,20%	1,02%
	Filme	7,99%	8,55%	8,35%

Tipo	Classe	Cenário 1*	Cenário 2**	Cenário 3**
Papel	Colorido	0,29%	0,31%	0,10%
	Branco	1,50%	1,60%	0,53%
	Misto	6,68%	7,15%	2,37%
	Papelão	1,60%	1,71%	0,57%
	Jornais, Panfletos e Revistas	5,79%	6,20%	2,06%
Matéria Orgânica	Restos de Comida e Podas	7,17%	0,63%	8,28%
Outros	Embalagem Longa Vida	5,60%	5,99%	6,46%
	Isopor	1,08%	1,15%	1,24%
	Tecido, Roupas, Borracha e Couro	6,94%	7,43%	8,01%
	Madeira	4,60%	4,92%	5,30%
	Especiais	0,01%	0,01%	0,01%
Rejeito	Areias, Pedra, contaminantes biológicos (fraldas, papel higiênico, absorventes)	39,99%	42,82%	46,14%
Total		100%	100%	100%

Seguindo a variação gravimétrica, realizou-se o ajuste da quantidade de rejeitos resultantes de cada cenário. Conforme indicado pela Tabela 5.4, no cenário 1, todo material não comercializado foi destinado ao aterro, representando um total de 18.889 t/ano. No cenário 2, como foi considerado a destinação da fração orgânica para a unidade de compostagem, a quantidade de rejeitos diminui, totalizando em 16.9533 t/ano de resíduos aterrados. Já no cenário 3, ao considerar um maior aproveitamento dos materiais, resultou-se em 15.301 t/ano de rejeitos aterrados.

Tabela 5.4 – Quantitativo de resíduos nas diferentes etapas

Fase	Cenário 1 (t/ano)	Cenário 2 (t/ano)	Cenário 3 (t/ano)
Coleta	26.824	26.824	26.824
Compostagem	-	1.946	-
Aterramento	18.889	16.953	15.301
Comercialização	7.925	7.925	11.523

Por meio dos dados do SGI/SLU também foi possível levantar as origens, os responsáveis pela coleta e os destinos. Partindo desta informação e com o auxílio do software ArcGIS Pro, encontrou-se as distâncias percorridas nas diferentes etapas e cenários.

Conforme indicado pela Tabela 5.5, ao observar a fase inicial, encontrou-se um total de 5.202,5 km/viagem percorridos durante a coleta seletiva e coleta seletiva inclusiva, e 704,7 km/ viagem de deslocamento das RAs até os galpões de origem.

Tabela 5.5 – Deslocamento durante a coleta e até a IRR correspondente

RA	Deslocamento durante a coleta (km)	Deslocamento até a IRR (km)
Águas Claras	101,5	11,8
Arniqueira	63,6	28,8
Brazlândia	103,9	2,2
Candangolândia	18,9	4,8
Ceilândia	971,9	5,8
Cruzeiro	19,5	6,2
Fercal	0,1	31,8
Gama	352,3	34,1
Guará	227,4	8,7
Itapoã	134,0	7,9
Jardim Botânico	219,0	122,9
Lago Norte	90,5	8,4
Lago Sul	254,9	17,1
Núcleo Bandeirante	35,2	41,9
Paranoá	64,9	28,7
Park Way	124,1	20,1
Planaltina	325,2	108,4
Recanto das Emas	275,9	23,9
Riacho Fundo	51,8	19,2
Riacho Fundo II	89,7	37,1
Samambaia	184,4	23,0
Santa Maria	250,6	39,2
São Sebastião	117,1	2,2
SCIA	37,6	5,0
SIA	16,3	4,8
Sobradinho	216,7	12,3
Sobradinho II	196,5	15,1
Taguatinga	519,2	9,9
Varjão	1,4	0,9
Vicente Pires	138,5	22,5
Total	**5.202,5**	**704,7**

Quanto ao destino dos rejeitos, a partir do contato com membros da equipe do SLU, entendeu-se que tanto as cooperativas como as empresas são responsáveis pelo transporte do rejeito proveniente dos resíduos do qual coletou. Vide contrato, as cooperativas possuem a possibilidade de encaminhar os rejeitos para o local mais próximo, seja aterro ou unidades de transbordo, enquanto as empresas devem levar para o aterro. Entretanto,

a partir do momento em que os resíduos chegam nos galpões, são acondicionados e triados sem haver separação por região de origem ou por responsável pela coleta (SLU, 2023a).

Entendendo que a qualidade, fração de materiais e consequentemente a geração de rejeitos variam por diferentes fatores, optou-se em considerar que todos os rejeitos são levados para o local mais próximo, sem distinção do responsável pela coleta. Após determinar os transbordos mais próximos de cada IRR, conforme indicado pela Tabela 5.6, encontrou-se um total de 114,3 km percorridos de uma localidade a outra.

Tabela 5.6 – Deslocamento entre IRR e transbordo

IRR	Transbordo	Distância (km)
Coop. Recicle a Vida	Ceilândia	6,52
Cooperativa CRV	Sobradinho	14,05
Cooperativa ECOLIMPO	Asa Sul	20,63
Cooperativa R3	Gama	9,98
Cooperativa Renascer	Asa Sul	9,47
CTR	Asa Sul	10,40
IRR Paranoá	Sobradinho	17,93
IRR PSul	Ceilândia	0,22
IRR SCIA Definitivo	Asa Sul	9,47
IRR SIA B	Asa Sul	12,02
Brazlândia	Brazlândia	0,23
Sobradinho	Sobradinho	3,33

A próxima etapa foi determinar os deslocamentos dos transbordos até o aterro sanitário de Brasília (ASB), encontrado um total de 154,7 km percorridos (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Deslocamento do transbordo ao aterro

Transbordo - Aterro	Distância (km)
Asa Sul	32,4
Brazlândia	32,8
Ceilândia	10,4
Gama	25,1
Sobradinho	54,0

Como o cenário 2 considera o transporte da fração orgânica para a realização da compostagem, estimou-se também a distância entre as IRRs e a unidade de compostagem localizada na Ceilândia, encontrando uma distância total de 343,8 km.

Tabela 5.8 – Deslocamento da IRR até unidade de compostagem

IRR	Distância (km)
Coop. Recicle a Vida	6,3
Cooperativa CRV	35,8
Cooperativa ECOLIMPO	48,7
Cooperativa R3	31,7
Cooperativa Renascer	20,8
CTR 1 e 2	42,2
IRR Paranoá	48,0
IRR PSul	0,0
IRR SCIA Definitivo	18,5
IRR SIA B	19,4
IRR Brazlândia	27,7
IRR Sobradinho	44,7

5.2.3. Consumo de combustível fóssil

Neste estudo considerou-se o consumo de combustível fóssil decorrente dos deslocamentos entre as instalações e da coleta e as provenientes da operação de cada unidade.

Conforme indicado pela Tabela 5.9, ao estimar o consumo de combustível dos diferentes deslocamentos, foi possível identificar uma maior contribuição proveniente da primeira etapa, que consiste nos deslocamentos realizados durante a coleta seletiva de cada RA e dos percursos das RAs até os galpões. Como essa etapa não se altera, em ambos os cenários se obteve um consumo de 1.404.211,2 L/ano. Já para as demais etapas, nota-se uma variação de um cenário para o outro, destacando o cenário 2, como o único a possuir uma etapa de deslocamento das IRRs até a unidade de compostagem.

No terceiro cenário, observou-se uma melhoria na recuperação de plástico, papel e metal, resultando em um aumento de 13% no aproveitamento desses materiais, havendo uma redução na quantidade de resíduos destinados à disposição final, com 57% do volume total coletado sendo direcionado para aterros.

Tabela 5.9 – Consumo de combustível para as diferentes trajetórias

Etapa	Cenário 1 (L/ano)	Cenário 2 (L/ano)	Cenário 3 (L/ano)
Coleta seletiva - Deslocamento – IRR	1.404.211	1.404.211	1.404.211
IRR - Compostagem	.	6.178	.
IRR - Transbordo - Aterro	51.158	46.194	42.148

A partir dos consumos de combustíveis calculou-se as emissões de dióxido de carbono, metano e oxido nitroso para cada cenário. Por meio dos fatores de potencial de aquecimento global (GWP) (IPCC, 2018), estimou-se a quantidade de CO_2 equivalente para os gases estudados. A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5.10 - Emissões provenientes do consumo de combustível de cada percurso

	Cenário 1	**Cenário 2**	**Cenário 3**
Dióxido de carbono - CO_2 (kg/ano)	4.162.356,8	4.165827,7	4.136.587,4
Metano - CH_4 (kg/ano)	8.802,1	8.809,4	8.747,6
Óxido nitroso - N_2O (kg/ano)	41.768,4	41.803,2	41.509,8
Emissão total (kg CO_2 eq/ano)	4.212.927,3	4.122.661,5	4.186.844,8

Seguindo os passos indicados pela metodologia, também se estimou o consumo de combustível que ocorre dentro de cada unidade. No caso das IRRs, considerou-se apenas aquelas que possuem equipamentos movidos a combustível fóssil. Para além, por falta de dados específicos, adotou-se fatores de consumo indicados pela literatura, com o fator de 3,4 L/t sendo utilizado para determinar o consumo das IRRs e da unidade de compostagem (Merrild; Larsen; Christensen, 2012) e o de 0,281L/t para o aterro (Leme, 2010).

Os consumos encontrados podem ser vistos por meio da Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Consumo de combustível nas unidades operacionais

Etapa	**Cenário 1**	**Cenário 2**	**Cenário 3**
IRRs (L/ano)	30.184,9	30.185	30.184,9
Unidade de Compostagem (L/ano)	-	6.617	-
Aterro (L/ano)	5.310,7	4.764	4.299,6

Por fim, a partir destes consumos calculou-se as emissões dos principais gases com potencial de aquecimento global e o CO_2 equivalente conforme indicado pela Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Emissões provenientes do consumo de combustível nas unidades operacionais

GEE	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Dióxido de carbono - CO_2 (kg/ano)	101.517,5	118.878,5	98625,71
Metano - CH_4 (kg/ano)	214,7	251,4	208,6
Óxido nitroso - N_2O (kg/ano)	1.018,7	1.192,9	989,7
Emissão total (kg CO_2 eq/ano)	102.750,9	120.322,9	99.824,0

5.2.4. Consumo de eletricidade

Observando o consumo elétrico e o total de resíduos registrados para este período, encontrou-se um fator de consumo energético variando de 2 a 10 KWh/t, a depender da unidade operacional. Estes valores também foram aplicados às localidades que não possuíam os dados necessários para a realização da estimativa, com a adequação sendo feita com base na infraestrutura e no total de resíduos gerenciados em cada local.

Com base no fator de consumo, foi possível determinar os de consumo de eletricidade para cada cenário, conforme apresentado na Tabela 5.13. Ao analisar a tabela, nota-se que, independentemente do cenário, os consumos de eletricidade pelas IRRs permanecem constantes. Essa consistência se deve à quantidade inalterada de resíduos triados em ambos cenários, com as alterações só ocorrendo após o processo de separação.

Tabela 5.13 - Consumo de eletricidade

Etapa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
IRRs (KWh/ano)	105.177,8	105.177,8	105.177,8
Unidade de Compostagem (KWh/ano)	-	10.104,0	-
Aterro (KWh/ano)	13.125,9	8.355,5	7.158,6

Em sequência foi determinado as emissões de CO_2. Para tal, adotou-se o fator de emissão de 0,376 kg/kWh, estimado para o período de análise por meio dos dados disponibilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2023). As emissões de cada cenário podem ser observadas por meio da Tabela 5.14.

Tabela 5.14- Emissões de CO_2 decorrentes do consumo de eletricidade

Etapa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
IRRs (Kg CO_2/ano)	39.549,5	39.549,5	39.549,5
Unidade de Compostagem (Kg CO_2/ano)	.	3.799,4	.
Aterro (Kg CO_2/ano)	4.935,7	3.141,9	2.691,8

5.2.5. Compostagem

Para determinar as emissões provenientes da compostagem, primeiro foi necessário levantar alguns parâmetros. Como a composição gravimétrica do DF não realiza uma distinção entre a fração de retos de alimentos e podas, adotou-se os valores do banco de dados do Ecoinvent, (2020). Os demais parâmetros foram retirados do estudo de Da Silva, (2020).

Os parâmetros adotados, assim como as estimativas de emissões de carbono e metano decorrentes do processo podem ser observados por meio da Tabela 5.15. Como um todo, nota-se que para um total de 1.946,3 toneladas de resíduos são emitidos 840 kg de metano ao ano, equivalendo a 23.512 kg de CO_2.

Tabela 5.15 – Degradação da Matéria Orgânica no processo de compostagem (*Ecoinvent, 2020; de **Da Silva, 2020; ***Calculado)

Parâmetro	Resíduo de alimentos	Podas	Total
Fração de resíduo seca *	23%	52%	-
Quantidade de carbono na fração de resíduo *	47%	43%	-
Taxa de degradação *	40%	40%	-
Fração de resíduos entrando na compostagem **	83%	17%	-
Massa de resíduos (kg) ***	1.615.372	330.859	1.946.231
Quantidade de Carbono que se torna gasoso (t de C) ***	57.974	5.011	62.986
CH_4 (kg/ano) ***	773	67	840
CO_2 eq (kg/ano) ***	21.644	1.871	23.515

Os cálculos também realizados para estimar as emissões de oxido nitroso. Conforme indicado pela Tabela 5.16, a partir do processo de compostagem foram emitidos 467,10 g de N_2O, equivalendo a 123.780 kg de CO_2/ano.

Tabela 5.16 – Emissão de N_2O no processo de compostagem

Parâmetro	Valor
RSU tratado (Kg/ano)	1.946.231,44
Fator de emissão (g N_2O/kg)	0,24
emissão N_2O (g)	467,10
Fator de emissão CO_2 eq (g)	265,00
emissão de CO_2 (kg/ano)	123.780

5.2.6. Disposição final

Para estimar as emissões de metano provenientes do aterro, adotou-se para cada parâmetro os seguintes valores:

Tabela 5.17 – Parâmetros para determinação da emissão de metano no aterro (*Beltrão *et al*., 2011 , **IPCC, 2018)

Parâmetro	Valor
ϕ	0,9*
f	0*
GWP	28**
OX	0,1*
F	50%*
DOCf	0,5*
MCF	1*

Acerca da fração de carbono orgânico degradável contida no resíduo e da taxa de deposição no aterro, adotou-se as seguintes proposições:

Tabela 5.18 – DOCj e K para os diferentes tipos de matérias (IPCC, 2018)

Material	DOCj	k
Madeira e produtos de madeira	43%	0,035
Celulose, papel e papelão	40%	0,07
Alimentos, desperdício de alimentos, bebidas e tabaco	15%	0,4
Têxteis	24%	0,07
Resíduos de jardim, quintal e parque	20%	0,17
Vidro, plástico, metal, outros resíduos inertes	0%	0

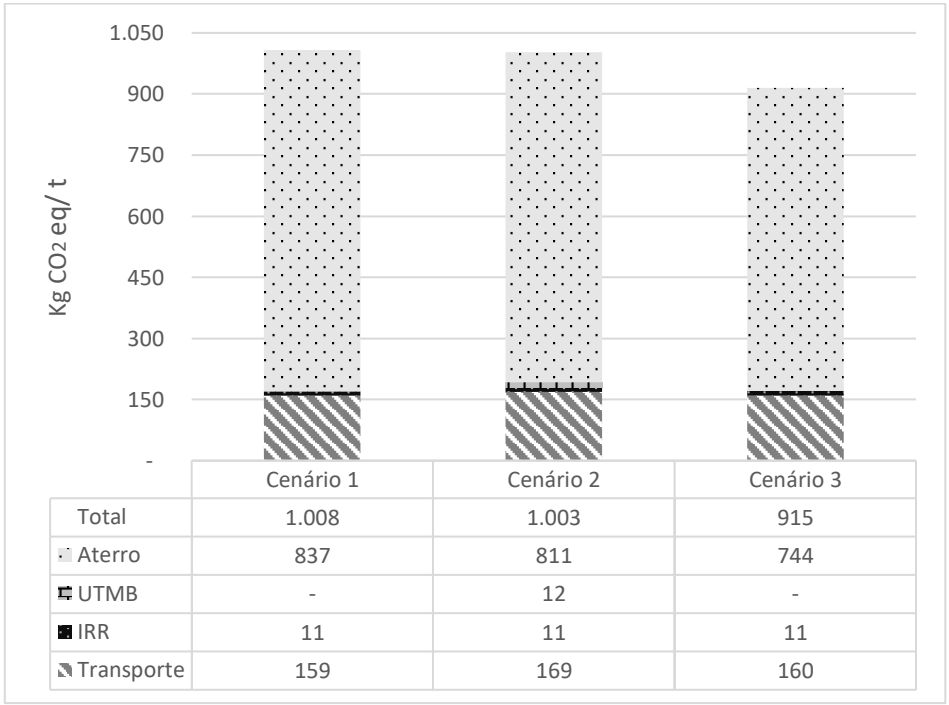
Como resultante, obteve-se para o período de 100 anos as emissões indicadas pela tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Emissões decorrentes do aterramento de resíduos

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Resíduo aterrado	18.899,3	16.953,1	15.301,0
Emissões de CH_4	752,2	654,1	541,5
Emissão de CO_2 (kg/ano)	15.796.720,1	13.736.737,9	11.371.674,9

5.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Após a conclusão dos cálculos, os resultados foram ajustados para a unidade funcional de 1 tonelada de RSU da coleta seletiva, com as emissões sendo expressas em função do dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq). Assim, conforme ilustrado pela Figura 5.3, ao considerar a contribuição dos cenários para a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), observa-se que o cenário 1, que representa o atual sistema de gerenciamento da CS, apresentou-se como a situação menos favorável, enquanto o cenário 3 destacou-se como o mais eficiente.



	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Total	1.008	1.003	915
Aterro	837	811	744
UTMB	-	12	-
IRR	11	11	11
Transporte	159	169	160

Figura 5.4 - Balanço da contribuição dos cenários para a emissão de GEE (1 tonelada de RSU)

Analisando individualmente cada fase, independentemente do cenário, o aterro emergiu como a etapa de maior geração de emissões, seguido pelo transporte. Em relação aos consumos, independentemente do cenário avaliado, o transporte se destaca como a fase

que mais consome energia, respondendo por 86% do consumo total (nos cenários 1 e 3). A participação relativa dos consumos é subsequentemente composta pelas IRR, que representam aproximadamente 11%, seguidas, por fim, pelo aterramento, contribuindo com os menores consumos, totalizando 3%.

No caso do cenário 2, as taxas de consumo apresentaram uma leve alteração com a inclusão da compostagem. Nesse contexto, o transporte representa 77% do consumo total, as IRRs contribuem com 10%, a compostagem com 11%, e os aterros com 2%. Estas informações podem ser visualizadas pela Figura III.1.

Em sequência, adotando também a unidade funcional de 1 tonelada de RSU da coleta seletiva, realizou-se o levantamento das entradas e saídas resultantes do Inventário do Ciclo de Vida, ilustrado pela Tabela 5.20. Adicionalmente, foi elaborado um resumo das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq) vinculadas às entradas de cada cenário, conforme destacado no Anexo II.

Tabela 5.20 - Balanço de entradas e saídas no tratamento de 1 tonelada de RSU da coleta seletiva em cada cenário

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Entradas			
Energia			
Diesel (L)	58,7	65,5	58,7
Eletricidade (KWh)	4,6	9,6	4,4
Saídas			
Emissões atmosféricas			
Dióxido de Carbono (kg)	168,4	190,5	169,8
Metano (g)	52,5	52,7	48,1
Óxido nitroso (g)	6,4	7,1	6,4

Ao analisar as emissões resultantes, tornou-se visível que, em todos os cenários, o dióxido de carbono foi o gás de maior representatividade. Da mesma forma, no que se refere ao consumo de energia, o diesel apresentou os maiores valores de consumo. Considerando os processos do gerenciamento, essa situação ocorreu principalmente em função dos percursos para realização da coleta seletiva, dos deslocamentos das regiões administrativas até as IRRs e em fator das distâncias percorridas de uma unidade operacional a outra.

Em contrapartida, ao analisar o consumo elétrico, constatou-se que este componente figura como um dos fatores de menor impacto nos diferentes cenários estudados. Essa

constatação era antecipada, uma vez que os equipamentos presentes nos galpões apresentam um baixo consumo energético, se comparados a instalações com maior infraestrutura.

Essa inferência leva a reflexões acerca do consumo específico de eletricidade encontrado por este estudo e o adotado em outras pesquisas. Por exemplo, Mohareb *et al.* (2008), encontraram um valor de 25 KWh/t, enquanto ao realizar as estimativas com base em informações das próprias IRRs, o consumo específico de eletricidade em cada unidade de triagem do Distrito Federal variou de 2 a 10 KWh/t, com os valores mais elevados sendo característicos de galpões dotados de maior infraestrutura, equipadas com esteiras de elevação, esteiras horizontais, prensas, balanças, e instalações para o beneficiamento de plástico, isopor e papelão.

Essa observação ressalta a importância de ponderar sobre a utilização de fatores de consumo e parâmetros provenientes de outras pesquisas. Neste estudo, como exemplo, foram atoados fatores de consumo de diesel para unidades operacionais e a fração de podas e resíduos de alimentos presentes na fração orgânica. Em sua totalidade, percebe-se que tais valores não se confirmam na prática do gerenciamento da coleta seletiva no Distrito Federal, tendo sido adotados apenas por falta de dados mais precisos e contextualizados.

Quanto aos demais gases, observou-se que o metano e o óxido nitroso geraram emissões mais reduzidas, com seus lançamentos sendo decorrentes do consumo de diesel no transporte e na operação das unidades operacionais. Adicionalmente, estas emissões também se originaram da degradação dos resíduos provenientes da compostagem e do aterramento, com os valores mais elevados sendo provenientes, predominantemente, do aterro. Nesse contexto, ressalta-se a significativa importância de desviar resíduos da disposição final, não apenas para cumprir as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), mas também para otimizar a vida útil do aterro, mesmo que em percentuais reduzidos, e evitar a emissão dos gases característicos desse tipo de gerenciamento.

Em relação aos dados utilizados, é imprescindível ponderar sobre os impactos decorrentes da escolha da fonte de dados e da exclusão de determinadas Regiões Administrativas e galpões. Como detalhado na seção 5.2.1, o galpão da Asa Sul, bem como as coletas

realizadas nas áreas do Plano Piloto, Octogonal/Sudoeste e parte do Cruzeiro, não foram considerados, resultando em uma redução de 14.100 toneladas, representando uma diminuição na quantidade total de resíduos analisados. Essa exclusão se fez necessária para assegurar uma maior confiabilidade nos dados, contudo, é importante salientar que tal medida implica na diminuição dos fatores de consumo e emissão, impactando diretamente nas análises subsequentes.

5.4. Interpretação

Elucidando as particularidades de cada situação, ao analisar o cenário 1, que representa o atual sistema de gerenciamento da coleta seletiva no Distrito Federal, notou-se que as emissões ocorreram principalmente em função da decomposição dos resíduos. Esta condição manifestou-se principalmente devido à subutilização dos resíduos, com 70% do material coletado sendo direcionado para o aterro (Figura 5.5).

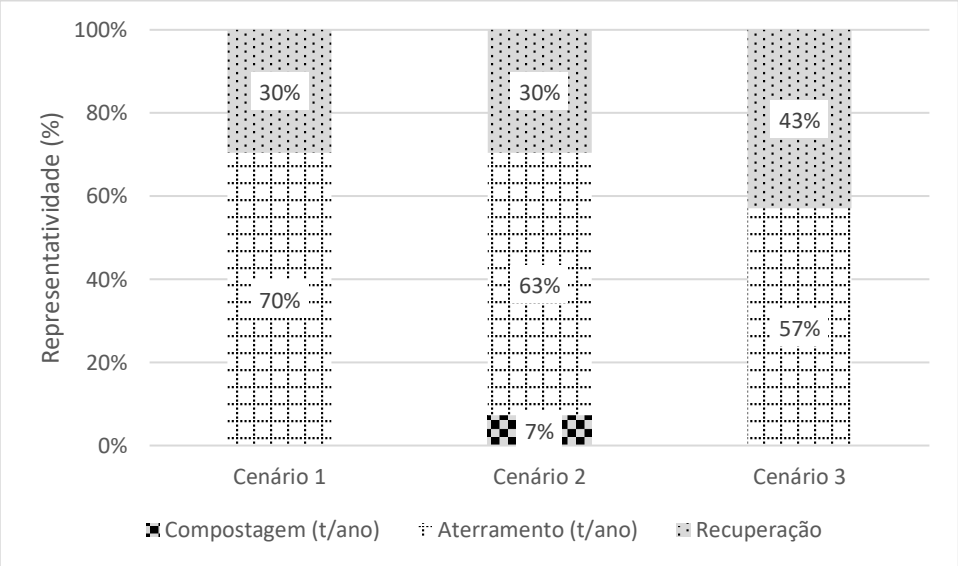


Figura 5.5 - Resíduos processados em cada etapa do fluxo

Considerando que a composição dos resíduos triados exerce influência direta nos resultados, recomenda-se, para períodos subsequentes, a implementação de ações que facilitem o recebimento de materiais com maior qualidade. Além disso, sugere-se a realização de atualizações nas unidades de triagem, visando garantir uma separação mais eficaz dos resíduos. Essas medidas são cruciais para melhorar a eficiência do sistema e minimizar as emissões decorrentes da decomposição dos materiais.

No cenário 2, que integra a prática da compostagem de resíduos orgânicos, notou-se inicialmente uma redução de 26 kg de CO_2eq nas emissões originárias do aterro, conforme ilustrado na Figura 5.3. Além disso, destaca-se que as emissões de CO_2 provenientes da degradação dos resíduos orgânicos durante o processo de compostagem, por serem resultado de processos biológicos naturais (consideradas biogênicas), não foram contabilizadas como uma contribuição líquida nas emissões de GEE.

Como resultado, comparado com a gestão atual (cenário 1), o cenário 2 demonstrou uma redução de 5 kg de CO_2 equivalente nas emissões totais associadas à disposição de resíduos, graças à implementação da fase de compostagem. No entanto, apesar dessa diminuição, é importante notar mudanças significativas nos padrões de consumo de energia, especialmente de eletricidade, relacionadas às operações da unidade de compostagem, que resultou em um aumento substancial no consumo de eletricidade em comparação com outros cenários.

O mesmo padrão é observado no transporte, com o cenário 2 representando os maiores gastos. Esse cenário é impactado pela considerável distância entre as IRRs e o pátio de compostagem, acrescentando um deslocamento de 343,8 km para destinar os resíduos orgânicos. De maneira geral, esses resultados sugerem que a prática de transportar resíduos orgânicos para a unidade de compostagem da Ceilândia não é eficiente. Isso se deve, em parte, à pequena proporção dos resíduos orgânicos em relação ao volume total coletado (7%). Além disso, a considerável distância que precisa ser percorrida para encaminhar esses resíduos resulta em um aumento significativo dos custos financeiros para a execução do serviço.

Adicionalmente, é importante ressaltar a presença de resíduos orgânicos na coleta seletiva, a qual, em sua concepção ideal, deveria ser destinada exclusivamente a materiais secos. Esse cenário suscita indagações quanto à eficácia do processo de acondicionamento de resíduos, evidenciando a urgência de uma maior atenção por parte dos gestores e da comunidade em geral.

No cenário 3, que envolveu uma otimização do aproveitamento de resíduos para fins comerciais, 57% dos materiais coletados foram destinados para o aterramento, resultando em uma redução de 13% (Figura 5.5), levando a uma diminuição mais expressiva apenas nas emissões de metano (Tabela 5.20). No entanto, é fundamental destacar que, devido

ao escopo limitado do sistema avaliado, que não engloba as contribuições provenientes da comercialização e recuperação dos resíduos, não é possível afirmar conclusivamente uma redução global nas emissões de gases de efeito estufa.

Essa constatação fica mais clara ao observar os resultados de outros estudos, como o de Nobrega *et al.* (2019), que avaliou o ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa. Este estudo indicou que a reciclagem não compensa as demais etapas do sistema de coleta seletiva devido às quantidades de CO_2 equivalente emitidas, especialmente no transporte dos resíduos. De modo abrangente, a prática da reciclagem está intrinsecamente associada a emissões significativas, originadas, em parte, pelo sistema elétrico empregado para fornecer energia e vapor no reprocessamento dos materiais. Além disso, as distâncias percorridas para destinar os materiais à reciclagem constituem um fator adicional que contribui para emissões GEE, com a magnitude desse impacto podendo se acentuar a depender da localidade em que o processo de reciclagem é executado.

Diante dessa limitação, é imperativo reconhecer a necessidade de uma análise mais abrangente que incorpore as contribuições resultantes da comercialização, visto que somente por meio de uma avaliação holística se faz possível compreender o impacto ambiental e as implicações nas emissões de gases de efeito estufa.

Ao explorar os diferentes cenários e resultados da análise, fica evidente que os principais impactos estão associados ao consumo durante o transporte e às emissões provenientes do aterro sanitário. Nesse contexto, é imperativo ponderar sobre a ineficiência da coleta seletiva, uma vez que esse serviço consegue abranger apenas 6% do volume total de resíduos sólidos gerados no Distrito Federal. Isso ressalta a importância de implementar ações específicas para compreender as razões por trás dessa baixa eficiência, além de desenvolver planos e medidas mitigadoras para reverter essa realidade.

Adicionalmente, surge a necessidade de realizar estudos que analisem a prestação desse serviço, visando identificar os impactos que outras abordagens podem trazer. Dentre as possíveis considerações, destacam-se a expansão dos locais de coleta, a substituição da coleta seletiva porta a porta e ponto a ponto por locais de entrega voluntária (PEV / LEV), ou ainda a modificação da forma de acondicionamento dos resíduos. Esta última poderia contemplar separações mais específicas do que simplesmente por resíduos secos,

englobando, por exemplo, a classificação por tipos de materiais, como vidro, metal, papel, entre outros.

Outro aspecto relevante a considerar são os motivos subjacentes à implementação da coleta seletiva. Embora esse serviço possa acarretar vários impactos positivos, é crucial obter clareza sobre as razões que o fundamentam para garantir sua prestação de maneira mais eficaz. Isso é essencial, uma vez que os materiais a serem reaproveitados dependem da funcionalidade dos resíduos após a separação, das condições do mercado de recicláveis, das práticas de reaproveitamento, entre outros fatores.

Por exemplo, dependendo da cooperativa encarregada da triagem, os resíduos podem passar por uma estação de aprimoramento, como é o caso da IRR coordenada pela cooperativa Recicle a Vida, facilitando o encaminhamento de materiais como isopor e plástico para outras regiões. Contudo, algumas cooperativas possuem infraestrutura limitada, transformando resíduos que poderiam ser aproveitados, em rejeitos.

Outra consideração relevante diz respeito às medidas de reaproveitamento, já que os resíduos podem ser coletados e separados para diversas finalidades, como reciclagem ou produção de energia. Essa reflexão destaca a necessidade de uma abordagem mais cuidadosa e ponderada ao planejar esse serviço e na definição de melhorias que podem ser implementadas por meio da atualização dos contratos de coleta e triagem. É necessário considerar individualmente cada região e galpão, uma vez que cada um apresenta particularidades únicas.

Em relação aos consumos decorrentes do transporte, ao examinar as localizações das unidades operacionais, conforme ilustrado pelo ANEXO A (Figura I.1), torna-se visível que parte das distâncias percorridas está relacionada à concentração dos galpões de triagem em determinadas regiões, como SIA e SCIA, enquanto que, ao mesmo tempo, outras regiões, como Planaltina, São Sebastião, Gama e Jardim Botânico, carecem de galpões em suas proximidades. Isso resulta em deslocamentos mais extensos, dependendo da região administrativa em que a coleta é realizada. Além disso, devido à alta quantidade de rejeitos, presença de poucas unidades de transbordo e apenas um aterro, os veículos também precisam percorrer longas distâncias para realizar a destinação final.

Neste sentido, em vista da criação de novos contratos da coleta seletiva, e consequentemente, alterações do sistema de gerenciamento adotado pelo SLU,

recomenda-se a realização de estudos para levantar uma melhor distribuição espacial das unidades operacionais, visando locais que proporcionem uma melhor logística, descentralização dos galpões e diminuições das emissões e consumos decorrentes dos transportes.

Diante disso, considerando que a escolha dos locais para a instalação dos galpões está sujeita a diversos fatores, como a disponibilidade de espaços, a conformidade com normas e padrões ambientais, e que os consumos estão condicionados a variáveis como a quantidade de resíduos transportados, o tipo de veículo, a topografia e as características das vias, elucida-se a necessidade de realizar estudos específicos para comprovar que a redução das distâncias é uma solução eficaz. Além disso, é necessário avaliar de que maneira a descentralização pode ser mais vantajosa, considerando as circunstâncias específicas de cada região.

5.4.1. Análise de Sensibilidade

No decorrer da análise o transporte se destacou como a fase de maior consumo de energia e segundo maior gerador de gases de efeito estufa (GEE). Pensando em como diferentes fatores podem influenciar neste resultado, realizou uma análise para observar possíveis alterações para esta etapa.

Conforme delineado na metodologia, a equação utilizada para estimar os consumos considera que o transporte é influenciado principalmente pela distância percorrida durante as diferentes etapas de gerenciamento, a quantidade total de resíduos sólidos transportados e o fator de consumo de combustível do caminhão.

Ao examinar as características dos caminhões utilizados no processo, constatou-se conforme citado na metodologia, que os veículos adotados se enquadram nas emissões estabelecidas pela EURO 3, equivalente à classe 5 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve 5) (SLU, 2022c). Contudo, visando reduzir os limites de emissões de poluentes por veículos leves e pesados, o IBAMA estabelece diferentes fases de adequação às emissões. Como tal, a última fase foi prevista para 2022, exigindo o atendimento ao padrão Euro VI para veículos pesados, aplicável principalmente a caminhões e ônibus (IBAMA, 2022).

Com o objetivo de compreender os impactos nas emissões de gases de efeito estufa ao adotar o padrão de emissões Euro VI para os veículos de coleta seletiva, procedeu-se à adaptação dos fatores de consumo de combustível, seguida por uma comparação com as emissões resultantes da fase de transporte do cenário 1. Utilizando a base de dados da Ecoinvent, (2020), foram identificados os fatores de consumo Euro VI para os diferentes veículos, estabelecendo-os como 0,11 para os caminhões envolvidos na coleta seletiva e no transporte de rejeitos para os transbordos, e 0,02 para as carretas que transportam os rejeitos dos transbordos para o aterro.

Após essa transformação, obteve-se um consumo de combustível de 1.082.301 litros de diesel por ano, representando uma redução de 373.069 litros de diesel por ano ao comparar com o Cenário 1. Em relação às emissões, identificou-se uma emissão de 3.132.988 kg de CO_2 equivalente por ano, traduzindo-se em uma diminuição expressiva nas emissões totais de CO_2 equivalente, com uma queda de 1.079.939 kg por ano (Tabela 5.21).

Tabela 5.21- Comparação de consumo e emissão

	Consumo (L diesel/ ano)	**Emissão (Kg CO_2 eq/ano)**
Cenário 1	1.455.370	4.212.927
Modificado	1.082.301	3.132.988
Diferença	373.069	1.079.939

Assim, a partir desta comparação, observa-se que a adoção de veículos que atendam ao padrão Euro VI não apenas entraria em conformidade com as regulamentações ambientais mais recentes, mas também ressalta a relevância e os benefícios de investir em tecnologias de veículos mais limpas e eficientes, com tal ação contribuindo de maneira significativa para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas à gestão de resíduos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O propósito deste trabalho foi realizar uma análise do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos advindos do sistema de coleta seletiva no Distrito Federal, com ênfase na quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Para atingir esse objetivo, foram delineados três cenários que investigaram os impactos de cada etapa do gerenciamento, com as estimativas de emissões e comparações dos cenários sendo realizadas por meio do método de avaliação do ciclo de vida.

Os três cenários que se dividiram em: (1) o sistema atual de gerenciamento da coleta seletiva no Distrito Federal, abrangendo transporte, triagem nas IRRs, encaminhamento para transbordo e disposição final no Aterro Sanitário de Brasília; (2) as mesmas etapas do cenário 1, com a adição da separação da fração orgânica para compostagem; e (3) mesmo sistema do cenário 1, considerando um melhor aproveitamento dos materiais triados.

Para realizar o ACV foram levantados os principais aspectos da coleta seletiva no Distrito Federal. Como um todo, notou-se que 33 das 35 RAs são atendidas, com a coleta podendo ser realizada por cooperativas de catadores ou pelas empresas terceirizadas que também prestam o serviço de coleta convencional, com a triagem sendo integralmente conduzida por cooperativas ou associações de catadores. Em relação aos rejeitos, observou-se um baixo aproveitamento dos materiais, com algumas IRRs descartando mais de 80% do que foi coletado (Tabela 5.2).

A partir da análise do inventário identificou-se que os maiores consumos estão associados à fase de transporte, sendo responsável por 86% do consumo do sistema atual, enquanto as IRR gastam 11%, reflexo de infraestruturas com baixo gasto energético ou até mesmo falta de infraestrutura e o aterro sendo responsável por 3%. Em contrapartida, as maiores emissões de GEE se concentram no aterramento dos resíduos, com esta etapa sendo responsável por 86% das emissões de gases (Figura 5.4).

Ao analisar os cenários, o Cenário 1 apresentou a situação menos favorável. No entanto, mesmo os cenários alternativos (Cenários 2 e 3), apesar de obterem resultados com menores impactos, também revelaram limitações. O Cenário 2, ao reduzir a quantidade de resíduos destinados ao aterro por meio da compostagem de resíduos orgânicos, resultou em aumento nos consumos de combustível e eletricidade (Tabela 5.20). Quanto

ao Cenário 3, que apresentou as menores taxas de emissões, em consequência da diminuição da quantidade de resíduos encaminhados para o aterro, mostra a importância de ter um maior aproveitamento dos resíduos para evitar a disposição final e reduzir as emissões de GEE proveniente dos aterros.

Entretanto, observa-se que em ambos cenários, etapas como como comercialização e reprocessamento dos resíduos triados não foram observados. Essas fases podem resultar em diferentes níveis de emissão, dependendo das características específicas desses processos, podendo altear as os resultados observados em cada cenário. Para além, em algumas estimativas, foram utilizados dados provenientes de outros estudos, os quais não refletem precisamente as condições específicas do Distrito Federal. Além disso, a fronteira do estudo não abrangeu as fases anteriores à coleta e os processos ocorridos dentro das unidades operacionais, tais como o consumo de água e a geração de esgoto e lixiviado.

Em relação a ações que podem representar melhorias para o sistema de coleta seletiva, destaca-se a necessidade de intervenção principalmente nas etapas que apresentam altos consumos e emissões, tais como transporte e aterro. Como evidenciado, a concentração das IRRs em determinados pontos resulta em deslocamentos mais extensos para o envio dos materiais. Com vistas à melhoria do sistema, torna-se essencial realizar estudos para determinar uma distribuição mais eficiente das unidades de triagem e transbordo, além da incorporação de veículos com menor emissão de gases de efeito estufa (GEE). Ações visando um melhor aproveitamento dos resíduos coletados também se mostraram importantes, sendo necessário um melhor acondicionamento para que materiais em maior quantidade e qualidade possam ser aproveitados.

Por fim, para aprofundar a compreensão sobre este tema, torna-se relevante realizar estudos que abordem a:

- Avaliação dos impactos decorrentes da melhoria da infraestrutura das unidades de triagem.
- Análise dos impactos resultantes do processo de aproveitamento e reinserção dos resíduos triados no ciclo produtivo.

- Comparação dos impactos e resultados gerados em função da adoção de diferentes modalidades de prestação do serviço, da adoção de outras formas de acondicionamento dos resíduos.

- Levantamento de uma distribuição espacial mais eficiente das unidades operacionais, buscando locais que favoreçam uma logística mais otimizada, descentralização dos galpões e redução das emissões e consumos decorrentes do transporte.

- Padronizações para a realização de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), com o intuito de desenvolver padrões e diretrizes específicos para o contexto do fim de vida dos resíduos sólidos urbanos, visando uniformizar as abordagens e facilitar comparações consistentes.

Em resumo, a persistência na condução desses estudos se mostra crucial para aprofundar o conhecimento a respeito de questões relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, proporcionando não apenas novas reflexões, mas também orientações para o desenvolvimento de políticas mais eficazes e decisões sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (2016). ABNT ISO/TR 14047 : *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto*.

ABNT. (2004). ABNT ISO/TR 14049 : *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida -* Exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 à definição de objetivo e escopo e à análise de inventário.

ABNT. (1990) .NBR 11174 (1990) - *Armazenamento de Resíduos classes II* (não inertes) e IIII (inertes). . [S.l: s.n.].

ABNT. (2009). ABNT ISO 14040 : *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. .

ABNT. (2009). ABNT ISSO 14044 : *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações.*

ABNT. (1993). ABNT ISSO 12980 : *Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos - Terminologi*a.

ABNT.(1995). NBR13463 : Coleta de resíduos sólidos.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos* (2022). Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

ABRELPE. *Panorama dos resíduos Sólidos no Brasil* (2021). Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil* - Abordagens metodológicas (2020). . [S.l: s.n.], 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Abreu, M. F. (Consultora). (2016). Estudos e proposição de logística e alternativas tecnológicas e institucionais para os serviços de coleta seletiva. Direção do SLU/DF: Contrato No SA-1710/2015 – PRODOC 914 BRZ 2016. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/alternativas_tecnologicas.pdf>. Acesso em: 14 set. 2023.

Agência Brasileira. *Moradores de Vicente Pires passam a ter coleta seletiva*. (2020). Disponível em: <https://images.app.goo.gl/tEBxoGyeQgBwav746>. Acesso em: 12 dez. 2023.

Aguiar, Enilde Santos De *et al*. Panorama da disposição de resíduos sólidos urbanos e sua relação com os impactos socioambientais em estados da Amazônia brasileira.(2021) *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, 2021.

Amaral, Cisnara Pires; Lopes, Diosnel Antonio Rodriguez. Impactos Sociais e Ambientais: a Vulnerabilidade do Sistema de Gerenciamento dos Resíduos

Sólidos Urbanos. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v. 6, n. 2, 2018.

Andrade, Ricardo Teixeira Gregório De. *A pegada de carbono como um dos indicadores de sustentabilidade para medição da responsabilidade socioambiental empresarial*: um estudo de caso na unidade sede da Petrobras em Natal-RN. (2010) Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em engenharia de Produção - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 19 nov.. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14988>. Acesso em: 18 jul. 2023.

Arduin, Rachel Horta. *Avaliação do ciclo de vida de produtos têxteis*: implicações da alocação. Dissertação (Mestrado) – (2013) Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, . Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-07032014-130543/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Barbosa, Rildo P; IBRAHIN, Francini Imene Dias. esíduos Sólidos - Impactos, Manejo e Gestão Ambiental. (2014) [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521749/pageid/19>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Barros, R. T. DE V. Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos. (2012). Belo Horizonte: *Tessitura*, v. 1. Ed.

Beltrão, Daniel; PAUL, Bettio; Miller, Richard Momsen. *O papel da compostagem de resíduos orgânicos na mitigação de emissões de metano*. (2011). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/882162>. Acesso em: 4 dez. 2023.

Berguenmayer, Andressa Martins; SILVA, Beatriz Machado de Oliveira; BESERRA, Thaís Tavares. A RENDA PER CAPITA E A RELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO DISTRITO FEDERAL. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 8, p. 54414–54427, 2020.

Berticelli, R. (2016). Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos: Perspectivas e Desafios. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 5(2).

Boldrin, A., et al. (2011). Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. Waste Management, 31(4), 619–630. Acesso em: 2 dez. 2023.

Borba, P. F. S., et al. (2018). Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(1).

Borges, R., et al. (n.d.). *Análise das emissões de GEE no gerenciamento dos RSO em restaurantes no Distrito Federal.* Disponível em: :

https://www.institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/view/195/159. Acesso em: 28 nov. 2023.

Bosco, T. C. D. (2017). *Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas*. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580392371/pageid/0. Acesso em: 19 jul. 2023.

Brasil. (n.d.). 2o *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Disponível em: http://antigo.antt.gov.br/index.php/content/view/32492/2__Inventario_Nacional_de_Emissoes_Atmosfericas_por_Veiculos_Automotores_Rodoviarios.html. Acesso em: 5 dez. 2023.

Brasil. (2020). *Lei n°14026, de 15 de julho de 2020 - Marco legal do saneamento básico*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 19 jul. 2023..

Brasil. (2010). *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 19 jul. 2023.

Brasil. (n.d.). *Método da análise de despacho*. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/metodo-da-analise-de-despacho. Acesso em: 25 jul. 2023.

Bringhenti, J. (2004). *Coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos: aspectos operacionais e da participação da população*. Tese de Doutorado - Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. Acesso em: 19 jul. 2023.

Buchmann, G. S. (2018). *Comparação dos impactos ambientais de formulações de tintas com a aplicação da avaliação do ciclo de vida*. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-10042018-142446/. Acesso em: 19 jul. 2023..

Campos, É. F., Punhagui, K. R. G., & John, V. M. (2011). *Emissão de CO2 do transporte da madeira nativa da Amazônia. Ambiente Construído*, 11(2).

Caopma. (2012). *Unidades de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos*.

Carvalho, P. H. (n.d.). *Saiba os dias e horários da coleta seletiva na sua rua*. Disponível em: https://jornaldebrasilia.com.br/brasilia/saiba-os-dias-e-horarios-da-coleta-seletiva-na-sua-rua/. Acesso em: 12 dez. 2023..

Cavalcanti, C. R., S Souza, F. C., & Alves, G. S. (2011). *Estudo do gerenciamento da coleta seletiva dos resíduos sólidos no município de Mossoró-RN*. Holos Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil, 4, 51–64..

CEMPRE. (2014). *Guia da Coleta Seletiva*. Disponível em: <https://cempre.org.br/manuais/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

CEMPRE. (2018). *Lixo Municipal - Manual do Gerenciamento Integrado*. [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <https://cempre.org.br/manuais/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

CETESB. (n.d.). *Relatórios e Publicações – Emissão Veicular*.. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 5 set. 2023.

CNB. (2022). SLU amplia coleta seletiva para mais seis regiões no DF e outras quatro que recebiam *atendimento parcial*. Disponível em: <https://cbn.globoradio.globo.com/media/audio/375615/slu-amplia-coleta-seletiva-para-mais-seis-regioes-.htm>. Acesso em: 12 dez. 2023.

Coelho, J. P. F. (2019). *Análise do sistema de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos na cidade de Teresina-PI.* Disponível em: <https://1library.org/document/y8xvgg0q-an%C3%A1lise-sistema-gest%C3%A3o-gerenciamento-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos-urbanos-teresina.html>. Acesso em: 14 maio 2023.

COGEO/SLU. (2023). *Coleta Seletiva. Coleta Seletiva*. Disponível em: <https://sigportal.slu.df.gov.br/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=6854430f522546f990c08850191ff824>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Colatusso, R. A. (2021). *Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos No Paraná: Desafios À Mitigação No Âmbito Das Mudanças Climáticas Globais*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento. Recuperado de https://www.bing.com/ck/a?!&&p=e2935a58861eb0f8JmltdHM9MTcwMjQyNTYwMCZpZ3VpZD0wNWNjOTgwZS0zNWQyLTZjZmYtMGVlOC04YjFjMzQxYzZkZjImaW5zaWQ9NTIxMg&ptn=3&ver=2&hsh=3&fclid=05cc980e-35d2-6cff-0ee8-8b1c341c6df2&psq=Colatusso%2c+2021+RSU+e+gee&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cucGVyaW9kaWNvcy51ZnByLmJyL2hhbmRsZS8xODg0LzcyMDEz&ntb=1>. Acesso em: 12 ago. 2023 , 2021

Coltro, Leda (2007). Avaliação do Ciclo de Vida-ACV. *CETEA/ITAL*, p. 7–14.

COPEL. Manual para gerenciamento de resíduos sólidos. [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=copel+MANUAL+PARA+GERENCIAMENTO+DE+RES%C3%8DDUOS+S%C3%93LIDOS&rlz=1C1VDKB_pt-PTBR1057BR1057&oq=copel+MANUAL+PARA+GERENCIAMENTO+DE+RES%C3%8DDUOS+S%C3%93LIDOS&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIGCAEQRRg80gEIMjExNWowajeoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Acesso em: 19 out. 2023.

Costa, Amanda Rodrigues Santos. (2017) *Análise da gestão dos resíduos sólidos urbanos da cidade do Recife-PE a partir de indicadores de sustentabilidade*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 5 jul. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/7715>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Dai-prá, Léa Beatriz et al. (2018). Avaliação de ciclo de vida (ACV) aplicada à gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros: uma revisão. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento,* v. 7, n. 3, 2018.

Dos santos, Mônica Daniele Neves et al.(2022). Análise do ciclo de vida na gestão de resíduo sólidos urbanos: uma revisão bibliográfica. *Revista Internacional de Ciências,* v. 12, n. 2, 2022.

ECOINVENT. (2020). Ecoinvent 3.7 - Banco de Dados.

Ekvall, Tomas et al. (2007). *What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management*. Waste Management, v. 27, n. 8, p. 989–996, 1 jan.

Epe.(2022) *Metodologia utilizada nos planos de energia e no ben*. EPE/DEA/SMA, p. 1–13.

Ferreira Evangelista, Jordanez et al. (2020) *Panorama da Geração de Resíduos Sólidos Urbanos-Rsu no Brasil e seus Impactos ao Meio Ambiente: uma Análise Comparativa de 2011 A 2018*. Ibeas, V. 3° Conresol. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/IV-021.pdf#:~:text=Em%20resumo%20as%20regi%C3%B5es%20Sul%2C%20sudeste%20e%20Centro-oeste,nordeste%20estes%20percentuais%20giram%20em%20torno%20de%2080%25.>. Acesso em: 1 maio 2023.

Ferreira, José Vicente Rodrigues. (2004*). Análise de Ciclo de Vida dos Produtos.* 2004. Acesso em: 18 jul. 2023.

FGVCES. (2022). *Nota técnica: valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa: versão 2.0. FGV Sistema de Bibliotecas*. [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/31764>. Acesso em: 14 out. 2023.

Franco, David Gabriel de Barros; Steiner, Maria Teresinha Arns.(2022). Otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos no Estado do Paraná: repensando a localização de aterros sanitários com base em modelagem matemática. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 5, 2022.

Friede, R., Reis, D. S., Avelar, K. E. S., et al. (2019). Coleta seletiva e educação ambiental: reciclar valores e reduzir o lixo. *Educação & Formação, 4*(11), 117-141.Disponível em:<

https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7146577>. Acesso em 15 out. 2023.

Galdino, Silvana De Jesus; Martins, Carlos Humberto; Silva, Eraldo Schunk. (2015) *Avaliação de um aterro controlado de resíduos sólidos urbanos através do método de iqr-valas. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 11, n. 9, 18 nov.

Gallo Junior, Humberto et al. Compensação de emissões de CO2 durante a 14A semana nacional de ciência e tecnologia no vale do Paraíba-SP. *Biofix Scientific* Journal, v. 3, n. 2, 2018.

GDF. PDGIRS (2018)- *Plano Distrital De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos*. Distrito Federal: [s.n.],. Disponível em: <https://www.so.df.gov.br/wp-conteudo/uploads/2018/03/PDGIRS.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Gomes, Waleria da Silva Nascimento; Neto, Paulo Fontes. (Resíduos sólidos urbanos: uma análise sistemática relacionada aos riscos para o meio ambiente e saúde dos catadores. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 13, n. 1, 2022.

Gonçalves-dias, Sylmara. (2015). *Consumo & resíduos: Duas faces da mesma moeda*. GV-EXECUTIVO, v. 14, n. 1, p. 38–41, 4 maio. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/gvexecutivo/article/view/49189>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Gonçalves-Dias, Sylmara Lopes Francelino; Ghani, Yumna Abdul; Cipriano, Tasso Alexandre Richetti Pires. (2015). Discussões em torno da prevenção e da política nacional de resíduos sólidos. *Ciência e Sustentabilidade*, v. 1, n. 1.

Henríquez, Aline Isabel Melo. (2016). *Análise de ciclo de vida (acv) de sistemas integrados de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos para cidades de médio porte*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

Honda, Agnes Narimatsu. (2014) *O ecodesign por meio da avaliação do ciclo de vida no processo de desenvolvimento de produto: uma proposta baseada em estudo de caso*. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações - Escola de Engenharia de São Carlos (SP), 14 nov. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-27012015-115102/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

IBAMA. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 19 out. 2023.

Ibáñez-Forés, Valeria *et al*. (2018). *Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste*

management systems in developing countries: A Brazilian case study. Waste Management, v. 72.

IBGE. Censo (2022): *População e Domicílios - Primeiros Resultados*. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/indicadores.html?localidade=BR>. Acesso em: 19 jul. 2023.

IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5 Waste. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acesso em: 19 jul. 2023.

IPCC. (2018). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventorie*. . [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste-1.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2023.

JR, Arlindo P; BRUNA, Gilda C. (2019) *Gestão urbana e sustentabilidade*. [S.l: s.n.], 2019. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788520462935/pageid/970>. Acesso em: 19 jul. 2023.

JUNIOR, Alex Air Santiago et al.(2021) *Aterro sanitário: relevância e técnicas de impermeabilização do solo. Diverso*! v. 13, n. 2.

KhandelwaL, Harshit et al. (2019). Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 209, p. 630–654, 1 fev..

Knickmeyer, Doris. (2020). Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. Journal of Cleaner Production. [S.l.]: *Elsevier Ltd*. , 1 fev.

Leme, Marcio Montagnana Vicente. (2010) *Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso*. 2010. 0–138 f. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Disponível em: <http://juno.unifei.edu.br/bim/0037110.pdf>. Acesso em: 30 out 2023.

Luiz, Bruno Vieira; Suski, (2021). Cassio Aurélio. Avaliação da geração de gases de efeito estufa em diferentes tratamentos de resíduos domiciliares. *Metodologias e Aprendizado*, v. 4,

Mattos, Flávio Vassallo et al. (2022). A gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos com base na ACV, AECV e ACVS: perspectivas e caminhos para o Brasil e países em desenvolvimento / Sustainable management of MSW with LCA, LCC and S-LCA: perspectives and paths for Brazil and developing countries. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 4, p. 22763–22774, 1 abr. 2022a.

MCTI. (2023). *Método da análise de despacho*. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/metodo-da-analise-de-despacho>. Acesso em: 2 dez. 2023.

Mendes, Natália Crespo. (2013). *Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil.* Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-15102013-085143/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Mendes, Natalia Crespo *et al*. (2013). Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production,* v. 26, n. 1, 2016.

Mengue, Deivis Machado et al. (2012). Diagnóstico e avaliação do ciclo de vida do gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos do município de Três Cachoeiras - RS. *Tecno-Lógica,* v. 19, n. 2, 2015.

Merrild, Hanna; *et al*. (2018). Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: The importance of efficient energy recovery and transport distances. *Waste Management*, v. 32, n. 5, p. 1009–1018, 1 maio 2012. Acesso em: 28 nov. 2023.

Mersoni, Cristina. (2015). *Avaliação do ciclo de vida como técnica de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no município de Garibaldi/ RS.* Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, 2015.

Michaelis. (2023). *Escopo.* Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/escopo/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Miranda, Nathallia Mercedes; *et al. (2018). Revisão de Modelos e Metodologias de Coleta Seletiva no Brasil.* Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/35137/pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

MMA. (2022). PLANARES - *Plano Nacional De Resíduos Sólidos*, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Mohareb, Adrian K.; *et al.* (2008). Modelling greenhouse gas emissions for municipal solid waste management strategies in Ottawa, Ontario, Canada. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, n. 11, p. 1241–1251, 1 set. 2008. Acesso em: 4 dez. 2023.

Morrissey, A. J.; Browne, J. (2004). Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*, v. 24, n. 3, p. 297–308, 1 jan. 2004. Acesso em: 17 jul. 2023.

Nascimento, Deyved Leonam Guimarães Do; *et al.* (2020). Visão da Análise da Gestão de Coleta e Transporte de RSU no Município de Castanhal - PA. *Research, Society and Development,* v. 9, n. 10, e 4239108090, 2020 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd - v9i10.8090. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/8090/7761>. Acesso em: 6 out. 2023.

Nascimento, Fâmela; PINTO FILHO, Jorge. (2021) Os impactos ambientais dos resíduos sólidos urbanos. *Enciclopédia Biosfera*, v. 18, n. 38, 2021.

Nascimento, Victor Fernandez *et al*. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Ambiente e Agua - *An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 10, n. 4, 28 out. 2015.

Nobrega, Claudia Coutinho et al. (2019). Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil. *Engenharia Sanitaria e Ambienta*l, v. 24, n. 5, 2019.

Oliveira, Benone Otávio Souza De. (2020). Análise de cenários de gestão dos resíduos sólidos urbanos baseado na transição de ecoeficiência, na sub-região da Amazônia ocidental, Brasil. Universidade Estadual Paulista, 2020

Park, Seejeen. (2018). Factors influencing the recycling rate under the volume-based waste fee system in South Korea. Waste Management, v. 74, p. 43–51, 1 abr. 2018.

Pereira, Suellen Silva. (2014). Desenvolvimento E Aplicação De Método Multicritério E Multidecisor Na Gestão Dos Resíduos Sólidos Urbanos Da Região Metropolitana De Campina Grande/Pb. Área De Concentração: Sociedade E Recursos Naturais. Universidade Federal De Campina Grande Centro De Tecnologia E Recursos Naturais Programa Pós-Graduação Em Recursos Naturais Doutorado Em Recursos Naturais Suellen Silva Pereira Tese De DoutoradO, 2014.

Pilissão, Yuri Lucian. (2023). Gestão integrada e sustentável de resíduos sólidos urbanos visando à recuperação energética: um estudo de caso no município de Ijuí/RS. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/247762>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Reichert, Geraldo Antônio. (2013) *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos : o caso de Porto Alegre*. Tese (Doutorado) - Universiade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre (RS), p. 301 f, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/87557>. Acesso em: 10 jul. 2023.

Reichert, Geraldo Antônio; Casagrande, Verônica.(2014) *Aplicação do modelo IWM-2 para a avaliação do ciclo de vida (ACV) no gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos do município de Porto Alegre* / RS, [S.l: s.n.], 2014. p. 1–15. Disponível em: <http://www.abes-rs.org.br/qualidade2014/trabalhos/id978.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2023.

Reichert, Geraldo Antônio; Mendes, Carlos André Bulhões. (2014) Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 3, 2014.

Rodrigues, Raryan Rafaela. (2010). Redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos urbanos através de uma coleta seletiva. Trabalho de conclusão de curso - Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix - Belo Horizonte (MG), 2010. Acesso em: 19 jul. 2023.

Santos, E. L. X., Ataides, A. L., Silva, V. L., et al. (2020). Coleta seletiva e reciclagem: estudo de caso na cidade de Goiás – GO. In *II Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica da FAI* (p. 65). ISBN: 978-65-5941-043-9. Disponível em: <https://fai.edu.br/wp-content/uploads/2022/11/Anais-II-JICTFAI-2020-FINAL.pdf#page=65>. Acesso em 30 set. 2023.

Santos, Mônica Daniele Neves *et al.* Análise do ciclo de vida na gestão de resíduo sólidos urbanos: uma revisão bibliográfica. *Revista Internacional de Ciências,* v. 12, n. 2, p. 126–140, 31 ago. 2022.

Saueressig, Gislaine Gabriele; *et al.* (2021). Papel das cooperativas de reciclagem no retorno de Resíduos Sólidos Urbanos à indústria Role of recycling coops in the return of Urban Solid Wastes to the industry Article. *Revista em Agronegocio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 2, 2021.

SEEG. (2023). *Análise Das Emissões De 2023 1970-2022 Gases De Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas Climáticas Do Brasil 1970-2022.* [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/SEEG_gases_estufa_2023_v2-1.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2023.

SEGOV. (2023*). Administrações Regionais* – Secretaria de Estado de Governo do Distrito Federal. Disponível em: <https://segov.df.gov.br/category/administracoes-regionais/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

SGI/ SLU. (2023) Consulta de Pesagens.

Silva, Ana Carla Netto Da. (2020). *Análise do Ciclo de Vida do Resíduo Sólido Orgânico na Usina de Tratamento Mecânico Biológico da Ceilândia no Distrito Federal*. [Distrito Federal] 2020. 116 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2020). Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/31310>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Silva, Fernanda Lemos Da. (2017). *Hierarquização de alternativas para o gerenciamento de Resíduo Sólido Urbano reciclável no Distrito Federal*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Universidade de Brasília, 13 jul. 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31067>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Silva, Gleidson Oliveira Da. (2016). *Sustentabilidade urbana e gestão de resíduos sólidos : o caso do Distrito Federal.* Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Ciências Ambientais). Universidade de Brasília, 8 jul. 2016. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/22922>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Silva, Luana de Assis; *et al.*(2015). *Avaliação do ciclo de vida do processo biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos para geração de energi*a. Life cycle assessmentof the anaerobic digestion process of municipal solid waste for power generation., v. 10, n. 1, p. 125–140, jun. 2015. Disponível em: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=108544587&lang=es&site=ehost-live>.

Silva, Victor Alexsander Oliveira; CONTRERAS, Francisco. (2020). Proposta de otimização do transporte de resíduos sólidos urbanos coletados no Distrito Federal. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 41, p. 153, 1 maio 2020.

SINIR. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br/mapas/gestao-residuos-solidos/>. Acesso em: 19 jul. 2023.

SLU. (2023b*). Características da Coleta Seletiva e dos Galpões de Recebimento e Triagem de Resíduo*s. [S.l: s.n.].

SLU. (2023e). *Chamamento Público em Andamento* – SLU. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/chamamentopublico/>. Acesso em: 28 nov.

SLU (2023d). *Coleta seletiva*. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/coletaseletiva/>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SLU. (2022b). *Composição gravimétrica período seco de 2022 - resíduos provenientes da coleta seletiva e coleta seletiva inclusiva.*

SLU. (2023c). Contratos de Triagem e Coleta Seletiva. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/contratos-do-ano-2022/>. Acesso em: 13 out. 2023.

SLU. Faturas de Consumo Energético das Unidades Operacionais. 2023b.

SLU. (2022). *Relatório anual 2022*. Distrito Federal: [s.n.], 2022d. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/wp-content/uploads/2023/07/RELATORIO-ANUAL-SLU-2022.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

SLU. (2023ª). *Relatório Semestral* (JAN-JUN). [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.slu.df.gov.br/relatorios/>. Acesso em: 24 jun. 2023.

SNIS. *Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos* - 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel/rs>. Acesso em: 19 jul. 2023.

SNS. (2021). Roteiro Para encerramento de Lixões - Apoio para tomada de decisões. Secretária Nacional de Saneamento - Ministério de Desenvolvimento Regional. [s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-

programas/saneamento/protegeer/06.RoteiroparaEncerramentodeLixoes.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2023a. , 2021

SNS. (2021b).Roteiro para redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no manejo de rsu Como aumentar. Brasília/DF: [s.n.]. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/07.RoteiroparaReducaodasEmissoesdeGasesdeEfeitoEstufaGEEnoManejodeRSU.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2023.

Soler, F., & Filho, C. R. S. (2019). Gestão de Resíduos Sólidos: o que diz a lei (4a ed.). Recuperado em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595450455/pageid/0

Souza, A. R. D., et al. (2019). Análise do potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro e simulação de emissões de gases do efeito estufa em diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos urbanos em Varginha (MG). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(5), 887–896. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/tyKR6PW6G4QYhqfLHhpZggs/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 18 jul. 2023.

Souza, L. A. D., et al. (2020). Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos. Revista Brasileira de Meio Ambiente, 8(3), 194–212. Disponível em: <https://revistabrasileirademeioambiente.com/index.php/RVBMA/article/view/390>. Acesso em: 28 nov. 2023.

Souza, M. T. S. D., Paula, M. B. D., & Souza-Pinto, H. D. (2012). O papel das cooperativas de reciclagem nos canais reversos pós-consumo. *Revista de Administração de Empresas*, 52(2).

Souza, H. D. O., & Moraes, G. G. B. L. (2021). Os desafios de efetividade jurídica socioambiental na transição do Aterro Controlado da Estrutural para Unidade de Recebimento de Entulho. *Revista de Estudos Empíricos em Direito*, 8.

Szigethy, L., & Antenor, S. (2021). R*esíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos*. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos.

Telles, D. D. (2022). *Resíduos sólidos: gestão responsável e sustentável*. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555061055/epubcfi/6/32[%3Bvnd.vst.idref%3Dx02_cap05_anexos_Telles-3]!/4[x02_cap05_anexos_Telles-3]/2/2/1:0[%2Ccap]>. Acesso em: 19 jul. 2023.

Vergara, S. E., Damgaard, A., & Horvath, A. (2011). Boundaries matter: Greenhouse gas emission reductions from alternative waste treatment strategies for California's municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 87–97.

Vieira, G. S. (2019). *Pegada Ecológica na Política Governamental para Gestão Ambiental do Serviço Público: estudo de caso da Unidade Prisional de Ceres-Goiás*, Brasil. Centro Universitário de Anápolis..

Von Bahr, B., & Steen, B. (2004). Reducing *epistemological uncertainty in life cycle inventory*. *Journal of Cleaner Production*, 12(4), 369–388.3.

Willers, C. D., Rodrigues, L. B., & Silva, C. A. (2012). Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. *Production*, 23(2).

Zaneti, Izabel Criistina Bruno Bacellar; Silva, Gleidson Oliveira. (2017). Sustentabilidade urbana e gestão de resíduos sólidos: o caso do Distrito Federal. 2017, [S.l: s.n.], 2017. p. 10. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/251/0> Acesso em: 19 jul. 2023..

Zanta, Viviana Maria; Ferreira, Cynthia Fantoni Alves. (2016). *Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266446543_Gerenciamento_Integrado_de_Residuos_Solidos_Urbanos>. Acesso em: 19 jul. 2023.

I. ANEXO A

A seguinte tabela apresenta informações sobre os equipamentos em cada Instalação de Recebimento e Triagem (IRR) e, em alguns casos, especificidades locais. Esses dados foram obtidos durante uma reunião realizada em 29 de maio de 2023 com membros do SLU responsáveis pela gestão das cooperativas. Em alguns casos, as informações sobre as localidades não estavam disponíveis, seja por falta de conhecimento ou porque o SLU não é responsável pela gestão do galpão.

Tabela I.1 – Descrição da infraestrutura das IRRs

IRR	**Descrição**
Cooperativa Recicle a Vida	Possui 2 Esteiras Horizontais, 2 Esteiras de Elevação, 1 Balança, Estação de Reaproveitamento de Água, Beneficiamento do Plástico e Triturador de Vidro
Cooperativa CRV	Possui pouca infraestrutura, com os resíduos sendo triados em mesas. A depender da quantidade recebida, encaminha parte dos resíduos para outras cooperativas triarem
Cooperativa ECOLIMPO	SLU não detinha informações sobre a infraestrutura.
Cooperativa R3	Possui pouca infraestrutura, com os resíduos sendo triados em mesas.
Cooperativa Renascer	SLU não detinha informações sobre a infraestrutura.
CTR1 e 2	Possui 4 Esteiras Horizontais, 4 Esteiras de Elevação, 4 Prensas.
IRR Paranoá	Possui Esteira Horizontal, Prensa.
IRR PSul	Possui 2 Esteiras Horizontais, 2 Esteiras de Elevação, Escritório - Armazenam papelão em bags; sistema elétrico ruim desde a entrega; tinham uma empilhadeira que incendiou. Possui 1 pá carregadeira e 1 empilhadeira.
IRR SCIA Definitivo	3 Esteiras Horizontais, 3 Esteiras de Elevação, 4 Prensas. Também possui uma empilhadeira.
IRR SIA B	SLU não detinha informações sobre a infraestrutura.
IRR Brazlândia	Esteira Horizontal, Prensa.
IRR Sobradinho	Não é controlado pelo SLU; não possui maiores informações

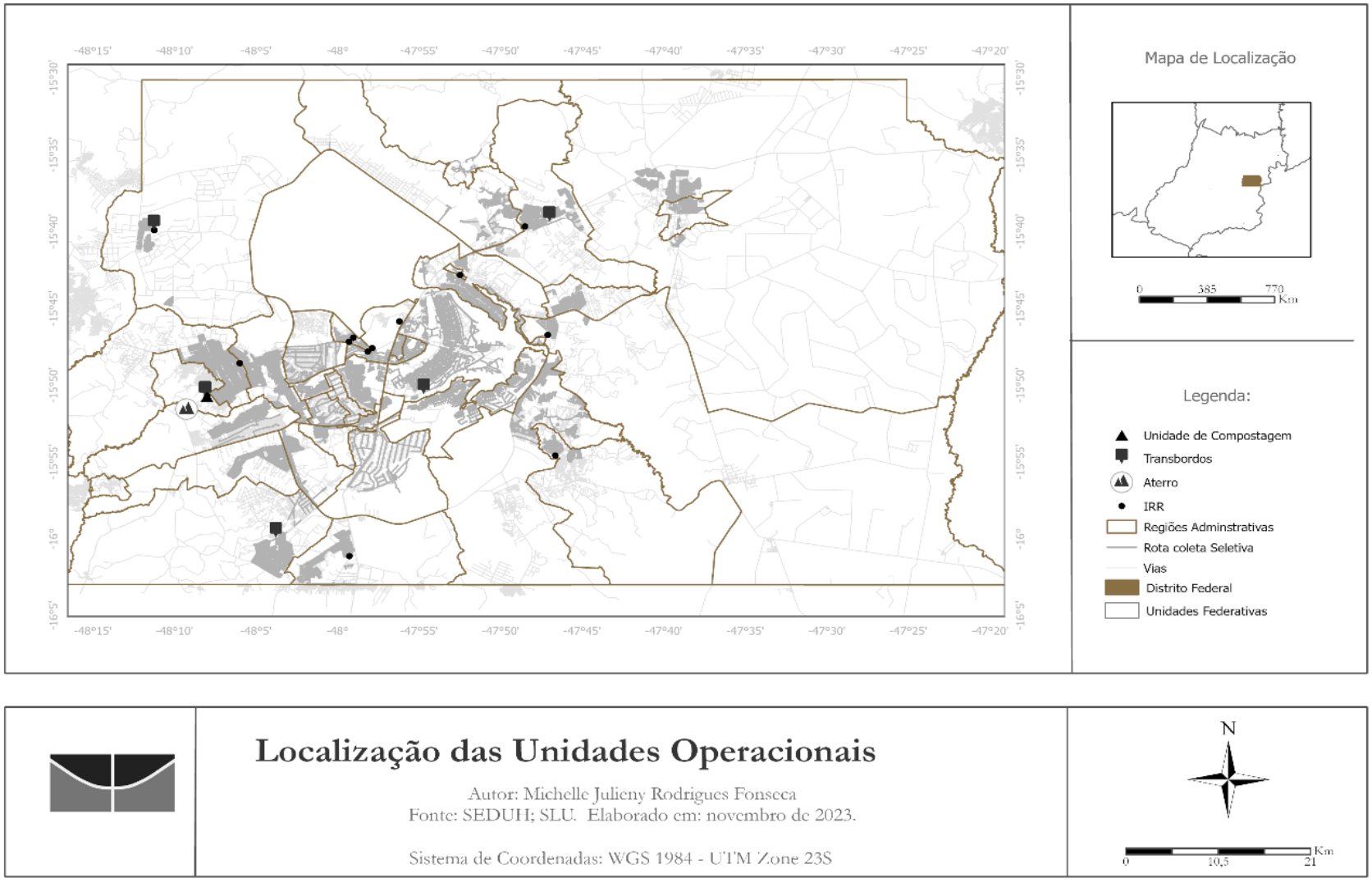


Figura I.1 – Localização das unidades operacionais

II. ANEXO B

Quadros resumo das emissões de CO_2 equivalente de cada cenário.

Tabela II.1 - Emissões de CO_2 eq cenário 1 (1 t/RSU coleta seletiva)

Processo	Etapa	Entrada	Emissão total de CO2 eq (kg/t)
Transporte	Coleta Seletiva	52,3	151,5
	Deslocamento IRR - Unidade de Compostagem	-	-
	Deslocamento IRR - Aterro	2,7	7,8
IRR	Consumo de eletricidade	3,9	1,5
	Consumo de diesel	3,4	9,8
UTMB - Ceilândia	Consumo de eletricidade	-	-
	Consumo de diesel	-	-
	Compostagem	-	-
Aterro	Consumo de eletricidade	0,7	0,3
	Consumo de diesel	0,3	0,8
	Decomposição do resíduo	1,0	835,8

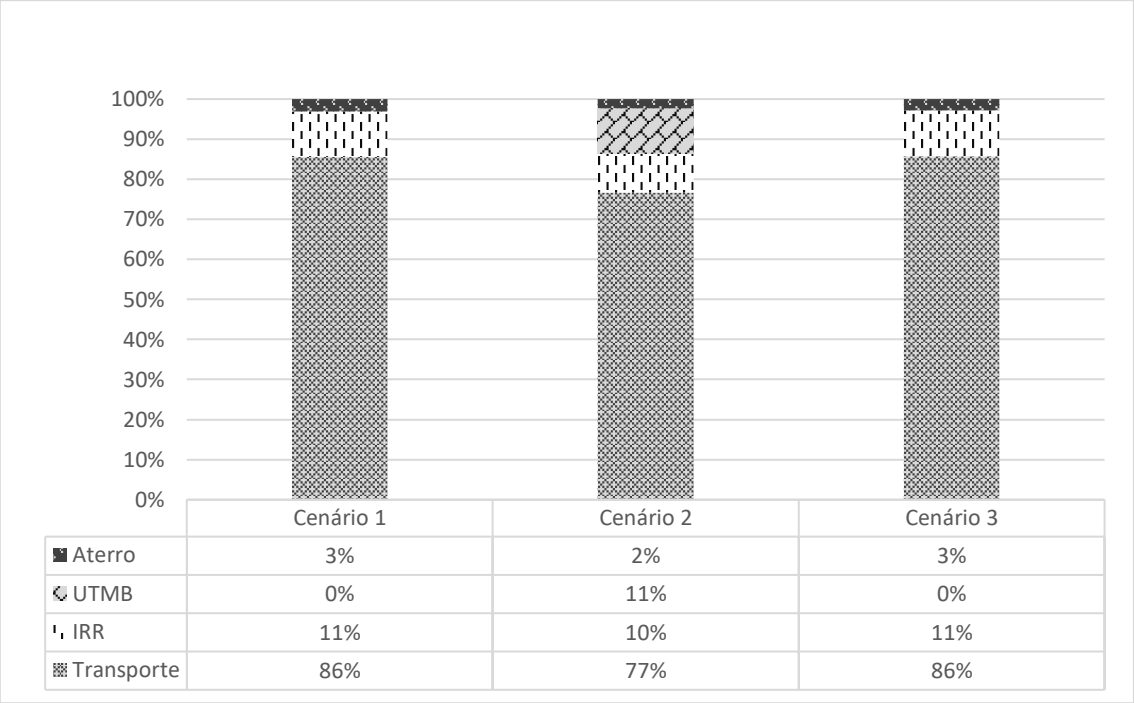
Tabela II.2 - Emissões de CO_2 eq cenário 2 (1 t/RSU coleta seletiva)

Processo	Etapa	Entrada	Emissão total de CO2 eq (kg/t)
Transporte	Coleta Seletiva	52,3	151,5
	Deslocamento IRR - Deslocamento IRR - Unidade de Compostagem	3,2	9,2
	Deslocamento IRR - Aterro	2,7	7,9
IRR	Consumo de eletricidade	3,9	1,5
	Consumo de diesel	3,4	9,8
Unidade de Compostagem	Consumo de eletricidade	5,2	2,0
	Consumo de diesel	3,4	9,8
	Compostagem	1,0	75,7
Aterro	Consumo de eletricidade	0,5	0,2
	Consumo de diesel	0,3	0,8
	Decomposição do resíduo	1,0	810,3

Tabela II.3 - Emissões de CO_2 eq cenário 3 (1 t/RSU coleta seletiva)

Processo	Etapa	Entrada	Emissão total de CO2 eq (kg/t)
Transporte	Coleta Seletiva	52,3	151,5
	Deslocamento IRR - UTMB	-	-
	Deslocamento IRR - Aterro	2,8	8,0
IRR	Consumo de eletricidade	3,9	1,5
	Consumo de diesel	3,4	9,8
UTMB - Ceilândia	Consumo de eletricidade	-	-
	Consumo de diesel	-	-
	Compostagem	-	-
Aterro	Consumo de eletricidade	0,6	0,2
	Consumo de diesel	0,3	0,8
	Decomposição do resíduo	1,0	743,2

III. ANEXO C



	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aterro	3%	2%	3%
UTMB	0%	11%	0%
IRR	11%	10%	11%
Transporte	86%	77%	86%

Figura III.1– Representatividade do consumo de eletricidade e diesel em cada etapa