

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCAS CAVALCANTE FONTES
LUCAS TAVARES VASSOLER

Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo Comparativo entre os impactos dos perfis de reciclagem do Brasil, Estados Unidos, Reino Unido e Austrália, na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa, aplicados à realidade do consórcio municipal COMAGSUL em Pernambuco.

São Carlos, SP
2023

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Estudo Comparativo entre os impactos dos perfis de reciclagem do Brasil, Estados Unidos, Reino Unido e Austrália, na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa, aplicados à realidade do consórcio municipal COMAGSUL em Pernambuco.

Alunos: Lucas Cavalcante Fontes e Lucas Tavares Vassoler
Orientador: Prof. Dr. Guilherme Henrique Duarte de Oliveira

Monografia apresentada ao curso de graduação em
Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo

São Carlos, SP

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

F683a	<p>Fontes, Lucas Cavalcante</p> <p>Análise das emissões de gases de efeito estufa no manejo de resíduos sólidos urbanos : um estudo comparativo entre os impactos dos perfis de reciclagem do Brasil, Estados Unidos, Reino Unido e Austrália, na redução das emissões de gases de efeito estufa, aplicados à realidade do consórcio municipal COMAGSUL em Pernambuco / Lucas Cavalcante Fontes, Lucas Tavares Vassoler; orientador Guilherme Henrique Duarte de Oliveira. -- São Carlos, 2023.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.</p> <p>1. Redução de emissões. 2. Gases de efeito estufa (GEE). 3. Metodologia WARM. 4. Metodologia MDL. 5. Resíduos sólidos urbanos (RSU). I. Vassoler, Lucas Tavares. II. Título.</p>
-------	---

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Lucas Cavalcante Fontes e Lucas Tavares Vassoler**

Data da Defesa: 01/12/2023

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. Guilherme Duarte de Oliveira (Orientador(a))


APROVADOS

Prof. Dr. Valdir Schalch

APROVADOS

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Cordoba

APROVADOS


Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente aos nossos pais, por terem nos ajudado em toda essa jornada desde o início da nossa graduação, nos melhores e piores momentos, sempre nos dando apoio e suporte em tudo que fosse necessário.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Guilherme Henrique Duarte de Oliveira, que nos auxiliou desde o início desta empreitada, foi fundamental para escolha e execução desse trabalho, contribuindo muito para nossa formação profissional.

À nossa turma da ambiental, 017 e 018, por todos os momentos dentro e fora da graduação, foram de grande ajuda para conseguirmos passar todos esses anos, e conquistar essa vitória hoje.

A todos nossos amigos e colegas de trabalho das extracurriculares que passamos, ENGAJ, SEA, Operação Natal, Iniciativas Mercado, pelas experiências e aprendizados.

À Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, todos os docentes da Graduação de Engenharia Ambiental.

E um agradecimento especial, para os nossos irmãos da República Feudo, que foi nosso lar desde que chegamos em São Carlos, e que nos fez perceber o que é ter uma segunda família, nos bons e maus momentos, e que com certeza foram fundamentais para conseguirmos entregar este trabalho hoje.

Nossos mais sinceros agradecimentos.

Resumo

Este trabalho abordou um desafio crítico no contexto da gestão de resíduos sólidos e mudanças climáticas: a mensuração do impacto da reciclagem na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Para atingir esse objetivo, duas metodologias foram aplicadas: a Metodologia WARM da Environmental Protection Agency (EPA) e a Metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Ademais, buscou-se avaliar a eficácia dessas metodologias na realização da tarefa proposta, realizando também, uma análise comparativa entre estas. O contexto das mudanças climáticas, aliado à crescente preocupação com a gestão de resíduos sólidos, torna essa pesquisa particularmente relevante. A primeira parte do estudo consistiu na aplicação dessas duas metodologias, envolvendo a coleta de dados relacionados às gerações de resíduos sólidos urbanos para um cenário base, escolhido como o atual cenário da reciclagem de resíduos sólidos urbanos nos municípios de Altinho, Lagoa dos Gatos, Belém de Maria, Bonito e Agrestina, municípios esses que compõem o consórcio municipal COMAGSUL, e, a posterior criação de cenários alternativos que buscam simular o impacto relativo a um aumento da abrangência da reciclagem, tendo como base para sua criação, os perfis de gerenciamento de resíduos sólidos de diferentes países. A Metodologia WARM do EPA é uma abordagem baseada em análises de ciclo de vida que se concentra em emissões diretas e indiretas, enquanto a Metodologia MDL é uma ferramenta reconhecida internacionalmente para projetos de redução de emissões. A comparação dos resultados obtidos com essas abordagens permitiu uma avaliação crítica de sua eficácia na mensuração do impacto da reciclagem, apontando para uma maior representatividade da realidade ao se utilizar a metodologia WARM. Além disso os resultados finais auxiliaram na construção de um ranking de potencial de redução de emissões para os materiais considerados no estudo, concluindo quais materiais devem ser priorizados no processo de reciclagem, sendo estes o papel e o metal, e, que quanto maior o nível de reciclagem, maior as emissões evitadas, independentemente do material. O presente estudo é relevante para a conscientização pública sobre a importância da reciclagem na mitigação das mudanças climáticas e na gestão sustentável de resíduos sólidos. Além disso, contribuirá para aprimorar políticas e práticas relacionadas à reciclagem e à promoção de uma sociedade mais sustentável. Os resultados desta pesquisa podem servir como um guia para um futuro onde a reciclagem e a cooperação desempenham um papel central na construção de um ambiente mais harmonioso e igualitário.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Redução de emissões; Gases de Efeito Estufa (GEE); Metodologia WARM; Metodologia MDL; Resíduos sólidos urbanos (RSU);.

ABSTRACT

This work aimed to address a critical challenge in the context of solid waste management and the fight against climate change: measuring the impact of recycling on the reduction of Greenhouse Gas Emissions (GHG). To achieve this goal, two distinct methodologies, the Environmental Protection Agency's (EPA) WARM Methodology and the Clean Development Mechanism (CDM) Methodology, were applied. Additionally, this research sought to assess the effectiveness of these methodologies in accomplishing the proposed task, conducting a comparative analysis between them. The context of climate change, coupled with the growing concern for solid waste management, makes this research particularly relevant. The first part of the study involved applying these two methodologies, involving the collection of data related to the generation of urban solid waste for a baseline scenario, chosen as the current scenario of urban solid waste recycling in the municipalities of Altinho, Lagoa dos Gatos, Belém de Maria, Bonito, and Agrestina, which constitute the municipal consortium COMAGSUL. Subsequently, alternative scenarios were created to simulate the impact of expanding recycling, based on waste management profiles from different countries. The EPA's WARM Methodology is a life cycle analysis-based approach that focuses on direct and indirect emissions, while the CDM Methodology is an internationally recognized tool for emission reduction projects. Comparing the results obtained with these approaches allowed for a critical evaluation of their effectiveness in measuring the impact of recycling, indicating a greater representativeness of reality when using the WARM methodology. Furthermore, the final results contributed to the construction of a ranking of emission reduction potential for the materials considered in the study, concluding that paper and metal should be prioritized in the recycling process. It was also found that higher recycling levels result in greater emissions avoided, regardless of the material. This study is relevant for public awareness regarding the importance of recycling in mitigating climate change and the sustainable management of solid waste. Additionally, it will contribute to improving policies and practices related to recycling and promoting a more sustainable society. The findings of this research can serve as a guide for a future where recycling and cooperation play a central role in building a more harmonious and egalitarian environment.

Keywords: Climate Change; Emission reduction; Greenhouse Gas Emissions (GHG); WARM Methodology; CDM Methodology; Urban solid waste (USW).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Início do artigo de Eunice Foote publicado em novembro de 1856 no American Journal of Science and Arts.

Figura 2 - Trecho do artigo de 1856 em que Foote mostra um aumento de temperatura maior para o dióxido de carbono e faz hipótese sobre o significado disso para o clima da Terra.

Figura 3 - Vários indicadores complementares de um clima global em mudança. Cada linha representa uma estimativa derivada independentemente da alteração no elemento do clima.

Figura 4 - Alteração na temperatura da superfície ao longo de 1901–2012, conforme determinado pela tendência linear para três conjuntos de dados.

Figura 5 - Fluxograma simplificado da metodologia adotada.

Figura 6 - Composição gravimétrica dos resíduos do aterro sanitário do COMAGSUL.

Figura 7 - Percentual das subcategorias de plásticos.

Figura 8 - Gravimetria dos RSU reciclados no Brasil.

Figura 9 - Gravimetria dos RSU no Brasil

Figura 10 - Emissões referentes ao cenário base e alternativo ruim associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.

Figura 11 - Emissões referentes ao cenário base e alternativo mediano associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.

Figura 12 - Emissões referentes ao cenário base e alternativo bom associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.

Figura 13 - Emissões referentes ao cenário base e alternativo ruim associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.

Figura 14 - Emissões de GEE por tipo de plástico.

Figura 15 - Comparação das emissões envolvidas na produção e das emissões evitadas pelo processo de reciclagem segmentadas por material.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de RSU dispostas no aterro do COMAGSUL em 2014 e geração per capita.

Tabela 2: Dados de entrada referente aos resíduos reciclados do COMAGSUL

Tabela 3: Potencial de redução das emissões de CO₂e dos plásticos decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base do COMAGSUL.

Tabela 4: Potencial de redução das emissões de CO₂e do papel decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

Tabela 5: Potencial de redução das emissões de CO₂e dos metais decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

Tabela 6: Potencial de redução das emissões de CO₂e do vidro decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

Tabela 7: Dados de consumo de plástico por tipo de polímero na Austrália

Tabela 8: Resultado dos cálculos para se obter a nova porcentagem por tipo de plástico

Tabela 9: Resultados da segmentação por tipo de polímero para o contexto Australiano

Tabela 10: Dados de consumo mundiais de plástico por tipo de polímero

Tabela 11: Resultados da segmentação de polímeros para os cenários Bom - Reino Unido, Médio - Estados Unidos e Ruim - Brasil.

Tabela 12: Métricas de ferro reciclado mundialmente

Tabela 13: Métricas de alumínio reciclado mundialmente

Tabela 14: Porcentagem a ser aplicada para segmentação dos metais nos cenários alternativos

Tabela 15: Massa estimada dos resíduos gerados nos municípios em estudo em toneladas, com base na gravimetria obtida por meio de volume amostral.

Tabela 16: Massa estimada dos resíduos plásticos gerados nos municípios em estudo em toneladas, com base na gravimetria obtida por meio de volume amostral.

Tabela 17: Materiais, identificados por Tipo de Material, utilizados na criação de um cenário base para a metodologia WARM.

Tabela 18: Compatibilização das tipologias de resíduos avaliadas na caracterização gravimétrica dos RSU do COMAGSUL e tipologias de dados de entrada da Metodologia WARM.

Tabela 19: Alocação final das massas utilizadas para cada material no cenário base.

Tabela 20: Alocação final das massas convertidas para short tons utilizadas para cada material no cenário base.

Figura 21: Empreendimentos em operação no estado de Pernambuco.

Tabela 22: Porcentagem da eletricidade líquida gerada dentro das fronteiras de cada estado em 2021.

Tabela 23: Dados de Climatologia Média Mensal para o município de Altinho, considerando série histórica com mais de 30 anos de dados observados.

Tabela 24: Distância do centro de geração ao aterro sanitário (km).

Tabela 25: Distâncias, em milhas, aplicadas na metodologia WARM.

Tabela 26: Adaptações realizadas para padronização dos materiais apresentados pela ABRELPE e SNIS.

Tabela 27: Consolidação dos dados percentuais de reciclagem a serem utilizados para o cenário Brasileiro.

Tabela 28: Massas referentes ao cenário Brasileiro finalizadas.

Tabela 29: Massas referentes ao cenário Brasileiro convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Tabela 30: Porcentagem reciclada de cada material nos EUA no ano de 2018.

Tabela 31: Porcentagem reciclada de cada subcategoria de plástico nos EUA no ano de 2018.

Tabela 32: Massas referentes ao cenário Americano da metodologia WARM.

Tabela 33: Massas referentes ao cenário Americano convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Tabela 34: Resíduos de Embalagens e Reciclagem, separados por material, Reino Unido 2021 (em milhares de toneladas e taxa em porcentagem).

Tabela 35: Massas referentes ao cenário do Reino Unido da metodologia WARM.

Tabela 36: Massas referentes ao cenário do Reino Unido convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Tabela 37: Reciclagem de Materiais na Austrália 2018-19 (toneladas)

Tabela 38: Massas referentes ao cenário Australiano da metodologia WARM.

Tabela 39: Massas referentes ao cenário Australiano convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Tabela 40: Resumo das variáveis utilizadas nas fórmulas dos materiais para mensuração das emissões evitadas.

Tabela 41: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} se a reciclagem de plástico no COMAGSUL chegasse aos níveis que temos na Austrália.

Tabela 42: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Reino Unido.

Tabela 43: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Estados Unidos.

Tabela 44: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Brasil.

Tabela 45: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} se a reciclagem de papel no COMAGSUL chegasse aos níveis que temos na Austrália.

Tabela 46: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de papel recuperado pelo Reino Unido.

Tabela 47: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de papel recuperado pelo Estados Unidos.

Tabela 48: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de papel recuperado pelo Brasil.

Tabela 49: Potencial de redução das emissões de CO₂eq decorrentes do volume de metais recuperados pela Austrália.

Tabela 50: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de metais recuperados pelo Reino Unido.

Tabela 51: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de metais recuperados pelos Estados Unidos.

Tabela 52: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de metais recuperados pelo Brasil.

Tabela 53: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pela Austrália.

Tabela 54: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Reino Unido.

Tabela 55: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Estados Unidos.

Tabela 56: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Brasil.

Tabela 57: Quantidade de emissão evitada de CO₂eq para o plástico a partir da quantidade reciclada.

Tabela 58: Emissões evitadas de CO₂eq por tipo de polímero para cada cenário proposto

Tabela 59: Economia de energia elétrica com a reciclagem de alguns materiais

Tabela 60: Ranking de emissões de CO₂eq evitadas a partir dos resultados da metodologia MDL

Tabela 61: Valores de emissões evitadas correspondentes a quantidade de gasolina evitada e carros abastecidos

Tabela 62: Emissões decorrentes do cenário base Brasileiro

Tabela 63: Emissões decorrentes do cenário alternativo Brasileiro.

Tabela 64: Emissões decorrentes do cenário base Americano

Tabela 65: Emissões decorrentes do cenário alternativo Americano.

Tabela 66: Emissões decorrentes do cenário base do Reino Unido.

Tabela 67: Emissões decorrentes do cenário alternativo do Reino Unido

Tabela 68: Emissões decorrentes do cenário base Australiano.

Tabela 69: Emissões decorrentes do cenário alternativo Australiano

Tabela 70: Contabilização comparativa das emissões geradas e evitadas para os cenários Base e Alternativos.

Tabela 71: Simulação do impacto na redução de emissões, obtidos por meio de diferentes níveis de reciclagem, para cada material abordado nos cenários trabalhados anteriormente.

Tabela 72: Ranking de emissões evitadas por material para cada metodologia

Tabela 73: Ranking de emissões evitadas por cenário para cada metodologia.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Contexto Histórico das Emissões de GEE.....	18
3.3. Reciclagem - Perspectiva Histórica, Legislativa e Operacional.....	25
3.4. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE.....	27
3.5. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE (MDL).....	29
3.6. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE (WARM).....	32
4. METODOLOGIA.....	34
4.1. Mapeamento.....	35
4.2. Metodologia MDL.....	39
4.2.1. Cálculo das emissões de GEE a partir das massas de RS reciclados.....	41
4.2.1.1. Plástico.....	42
4.2.1.2. Papel.....	43
4.2.1.3. Metais.....	44
4.2.1.4. Vidro.....	45
4.2.2. Adaptações necessárias para se obter a segmentação dos materiais Plástico e Metais.....	47
4.3. Waste Reduction Model (WARM).....	52
4.3.1.1. Criação do Cenário Base.....	53
4.3.1.2. Caracterização da matriz energética.....	62
4.3.1.3. Composição da Matéria-prima.....	65
4.3.1.4. Captação e aproveitamento dos gases gerados no aterro.....	65
4.3.1.5. Condições de Umidade.....	66
4.3.1.6. Digestão em Reatores.....	67
4.3.1.7. Transporte de Resíduos.....	67
4.4. Cenários Alternativos.....	69
4.4.1. Coleta de dados para o cenário Brasil - Ruim.....	70
4.4.1.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.....	75
4.4.1.2. Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária.....	75
4.4.1.3. Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária.....	75
4.4.2. Coleta de dados para o cenário EUA - Médio.....	77
4.4.2.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.....	78
4.4.2.2. Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária.....	79
4.4.2.3. Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária.....	80
4.4.3. Coleta de dados para o cenário Reino Unido - Bom.....	82
4.4.3.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.....	84
4.4.3.2. Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária.....	84
4.4.3.3. Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária.....	84
4.4.4. Coleta de dados para o cenário Austrália - Excelente.....	86
4.4.4.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.....	88
4.4.4.2. Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária.....	89
4.4.4.3. Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária.....	89
4.4.4.4. Categoria 4: Outras Adaptações.....	90

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
5.1. Resultados da metodologia MDL.....	92
5.1.1. Plástico.....	93
5.1.1.1. Cenário Excelente - Austrália.....	93
5.1.1.2. Cenário Bom - Reino Unido.....	93
5.1.1.3. Cenário Médio - Estados Unidos.....	94
5.1.1.4. Cenário Ruim - Brasil.....	94
5.1.2. Papel.....	95
5.1.2.1. Cenário Excelente - Austrália.....	95
5.1.2.2. Cenário Bom - Reino Unido.....	95
5.1.2.3. Cenário Médio - Estados Unidos.....	96
5.1.2.4. Cenário Ruim - Brasil.....	96
5.1.3. Metais.....	97
5.1.3.1. Cenário Excelente - Austrália.....	97
5.1.3.2. Cenário Bom - Reino Unido.....	97
5.1.3.3. Cenário Médio - Estados Unidos.....	98
5.1.3.4. Cenário Ruim - Brasil.....	98
5.1.4. Vidro.....	99
5.1.4.1. Cenário Excelente - Austrália.....	99
5.1.4.2. Cenário Bom - Reino Unido.....	99
5.1.4.3. Cenário Médio - Estados Unidos.....	100
5.1.4.4. Cenário Ruim - Brasil.....	100
5.2. Discussão da metodologia MDL.....	101
5.2.1. Discussão Geral.....	104
5.3. Resultados e Discussão (WARM).....	105
5.3.1. Emissões de GEE (Cenário Brasil):.....	106
5.3.2. Emissões de GEE (Cenário EUA):.....	108
5.3.3. Emissões de GEE (Cenário Reino Unido):.....	110
5.3.4. Emissões de GEE (Cenário Austrália):.....	112
5.3.5. Emissões de GEE (Comparação):.....	114
5.3.6. Análise Geral.....	117
5.4. Resultados e Discussão (MDL - WARM).....	121
5.5. Resultados e Discussão (Geral).....	124
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
7. RECOMENDAÇÕES.....	127
7.1. WARM.....	127
7.2. MDL.....	128
7.3. Geral.....	128
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

1. INTRODUÇÃO

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) representam um dos maiores desafios ambientais da nossa era, com raízes que remontam ao surgimento da Revolução Industrial no século XVIII. A Revolução Industrial, marcada por avanços tecnológicos e a transição para uma economia movida a combustíveis fósseis, trouxe consigo um crescimento industrial explosivo. No entanto, esse período também marcou o início de um aumento substancial das emissões de GEE, devido à queima de carvão, petróleo e gás, bem como ao desmatamento em grande escala. Essas emissões desencadearam mudanças climáticas globais de magnitude sem precedentes, afetando o clima e os ecossistemas do planeta.

A compreensão cada vez maior dos impactos devastadores dessas emissões levou ao reconhecimento da necessidade de medidas para reduzi-las. Esse reconhecimento resultou em esforços progressivos para enfrentar o desafio climático, culminando com a adoção do Protocolo de Quioto em 1997 e o Acordo de Paris em 2015, que estabeleceram metas e compromissos globais para a redução das emissões de GEE. No entanto, o caminho para conter essas emissões e mitigar as mudanças climáticas permanece complexo e multifacetado.

Nesse contexto, a gestão de resíduos sólidos emergiu como um elemento-chave na busca por soluções sustentáveis. Embora as preocupações com resíduos sólidos existam desde tempos antigos, o século XX testemunhou a urbanização em larga escala e o aumento exponencial da produção de resíduos. Essa transformação levou a uma compreensão crescente de que a forma como a sociedade lida com seus resíduos têm implicações diretas nas emissões de GEE. A decomposição anaeróbia de resíduos em aterros sanitários libera metano, um GEE de efeito mais intenso que o gás carbônico. O reconhecimento do impacto ambiental de práticas inadequadas de gestão de resíduos sólidos incentivou a busca por alternativas.

Nesse cenário desafiador, a reciclagem de resíduos sólidos surgiu como uma resposta eficaz aos desafios ambientais e sociais. A reciclagem não apenas oferece uma solução ambientalmente responsável para o tratamento de resíduos, mas também contribui significativamente para a redução das emissões de GEE. A prática da reciclagem reduz a necessidade de aterros sanitários e incineração, minimizando a liberação de gases de efeito estufa. Além disso, a reciclagem economiza recursos naturais e reduz a demanda por matérias-primas virgens, diminuindo assim a pegada ambiental.

Este trabalho tem como objetivo explorar a intersecção desses três elementos - as emissões históricas de GEE, o desenvolvimento da gestão de resíduos sólidos e a prática da

reciclagem. O foco é a mensuração do impacto da reciclagem na redução das emissões de GEE. Para atingir esse objetivo, serão aplicadas duas metodologias distintas: a Metodologia WARM (*Waste Reduction Model*) da *Environmental Protection Agency* (EPA) e a Metodologia MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC).

A Metodologia WARM, desenvolvida pela EPA dos Estados Unidos, oferece uma abordagem específica para a avaliação da redução de emissões de GEE resultante da reciclagem de resíduos sólidos urbanos. Ela é baseada na experiência e pesquisa da EPA em relação ao gerenciamento de resíduos e suas implicações ambientais, considerando a composição dos resíduos e a localização geográfica.

Por outro lado, a Metodologia MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) está ligada ao Protocolo de Quioto e representa uma abordagem internacional para projetos de redução de emissões. Essa metodologia visa incentivar projetos sustentáveis em países em desenvolvimento, contribuindo para a redução das emissões globais de GEE. O MDL estabelece diretrizes abrangentes para a avaliação do impacto ambiental, levando em consideração o ciclo de vida dos produtos e serviços.

A comparação entre essas metodologias não se limita à sua aplicação, mas se estenderá à avaliação crítica de sua eficácia na mensuração do impacto da reciclagem. Essa comparação será fundamental para o aprimoramento das ferramentas de avaliação de impacto ambiental e para uma compreensão mais profunda do papel essencial da reciclagem no contexto das mudanças climáticas.

A relevância deste estudo reside em sua contribuição para a conscientização pública sobre a importância da reciclagem na mitigação das mudanças climáticas e na gestão sustentável de resíduos sólidos. Além disso, este trabalho visa aprimorar políticas e práticas relacionadas à reciclagem, promovendo uma sociedade mais sustentável. Os resultados desta pesquisa podem servir como um guia para um futuro em que a reciclagem desempenha um papel crucial na construção de um ambiente mais harmonioso e igualitário.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este trabalho visa aprofundar o entendimento da relevância da reciclagem como fator crucial na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Particularmente, busca-se analisar, de maneira quantitativa, o potencial de redução de emissões que a reciclagem oferece, utilizando as metodologias WARM (*Waste Reduction Model*) do *Environmental Protection Agency* (EPA) e MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) como ferramentas de mensuração.

2.2. Objetivos Específicos

- Selecionar um cenário de reciclagem de resíduos sólidos urbanos, baseado nas condições de um município real, a fim de se obter dados concretos e próximos da realidade ao final das análises;
- Propor quatro cenários que representam níveis graduais de reciclagem de resíduos sólidos urbanos no consórcio municipal real do cenário base, sendo estes referentes a uma baixa taxa de reciclagem, uma taxa de reciclagem mediana, uma taxa de reciclagem alta e uma taxa de reciclagem muito alta;
- Aplicar e comparar as Metodologias WARM e MDL, para a quantificação de emissões de GEE nos diferentes cenários propostos;
- Avaliar quantitativamente o impacto da reciclagem na redução de emissões de GEE;
- Avaliar a eficácia das metodologias utilizadas quanto ao seu potencial de quantificar as emissões de GEE;
- Realizar uma análise comparativa entre as duas metodologias utilizadas, considerando critérios técnicos de sua aplicação, e, os resultados obtidos por cada uma;

- Oferecer *insights* sobre o impacto obtido ao se reciclar diferentes materiais, trazendo avaliações individuais quanto ao potencial de redução de emissões de GEE que cada material possui ao ser reciclado;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Contexto Histórico das Emissões de GEE

A compreensão do contexto histórico das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) é fundamental para avaliar os desafios atuais relacionados às mudanças climáticas e a urgente necessidade de ação global. Isso posto, é fundamental para a compreensão plena dos tópicos que serão abordados neste trabalho que se introduza os principais conceitos acerca dos GEE.

Os GEE são substâncias químicas presentes na atmosfera que têm a capacidade de reter parte do calor solar, criando um "efeito estufa" natural que mantém a Terra em uma temperatura adequada para a vida (WWF, 2023).

Entre os principais GEE, destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), sendo que esses gases podem ser gerados por meio de processos naturais, tais como a respiração e decomposição de plantas, o lançamento de gases presentes nos oceanos, atividades vulcânicas que possuem a capacidade de lançar enormes quantidades de gases na atmosfera, entre outras fontes (ICOS, 2023).

No entanto, o termo "efeito estufa" se tornou associado a um fenômeno problemático quando atividades humanas intensificaram a concentração desses gases na atmosfera.

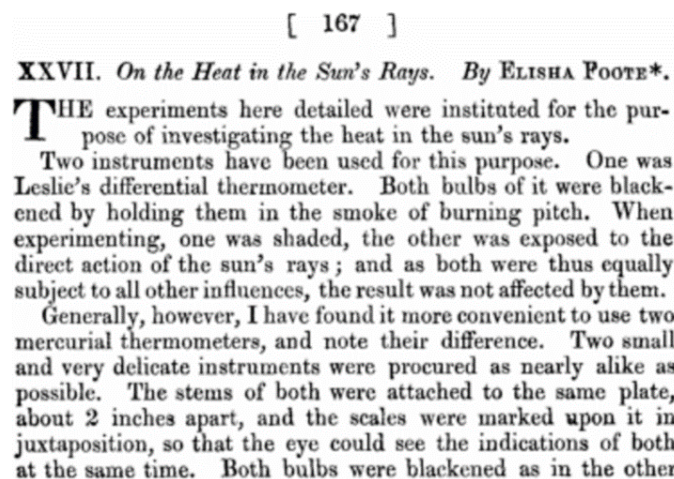
A história das emissões de GEE remonta à segunda metade do século XVIII, com a eclosão da Revolução Industrial na Inglaterra. Esse período de intensas transformações marcou uma transição significativa na forma como a sociedade ocupava o solo e produzia e consumia energia, impulsionando a ascensão do carvão como principal fonte de combustível, sendo este substituído posteriormente pelo uso crescente de petróleo e gás (CARVALHO, 2008).

Esses combustíveis fósseis, anteriormente inexplorados em grande escala, propiciaram o desenvolvimento de máquinas a vapor, locomotivas e indústrias, catalisando uma era de crescimento econômico acelerado. Porém, juntamente a todas essas mudanças, responsáveis por alterar radicalmente a forma com que as sociedades interagiam com o ambiente a sua volta, as emissões líquidas provenientes das alterações do uso dos solos, somadas a queima de carvão e a crescente emissão de CO_2 decorrente desses processos, tornaram-se algumas das principais contribuintes para a intensificação do efeito estufa, retendo o calor solar na atmosfera e elevando as temperaturas da Terra (IPCC, 2021).

No século XIX, o século do carvão testemunhou um aumento dramático nas emissões de GEE, resultando em concentrações atmosféricas sem precedentes (EFE, 2017). Além do CO_2 , o metano (CH_4), liberado de atividades como mineração de carvão (FAGUNDES,

2010), e o óxido nitroso (N_2O), associado a processos agrícolas (ALMEIDA, 2015) e industriais (CHROBAK, 2021), também contribuíram para o agravamento do problema. À medida que as emissões cresceram, as preocupações ambientais surgiram, trazendo consigo os primeiros cientistas a estudarem a possibilidade de aquecimento do globo, com estudos que remontam ao início da segunda metade do século XIX, como o experimento realizado pela cientista amadora Eunice Foote, uma das primeiras pessoas a constatar a possibilidade de aquecimento do planeta por meio da presença do CO_2 na atmosfera, como referenciado nas Figuras 1 e 2 (ALVIM, 2023). Com isso, ficou marcado o estabelecimento das bases da ciência climática.

Figura 1: Início do artigo de Eunice Foote publicado em novembro de 1856 no American Journal of Science and Arts.



Fonte: Foote, 1856

Figura 2: Trecho do artigo de 1856 em que Foote mostra um aumento de temperatura maior para o dióxido de carbono e faz hipótese sobre o significado disso para o clima da Terra.

Thirdly. The highest effect of the sun's rays I have found to be in carbonic acid gas.

One of the receivers was filled with it, the other with common air, and the result was as follows:

In Common Air.		In Carbonic Acid Gas.	
In shade.	In sun.	In shade.	In sun.
80	90	80	90
81	94	84	100
80	99	84	110
81	100	85	120

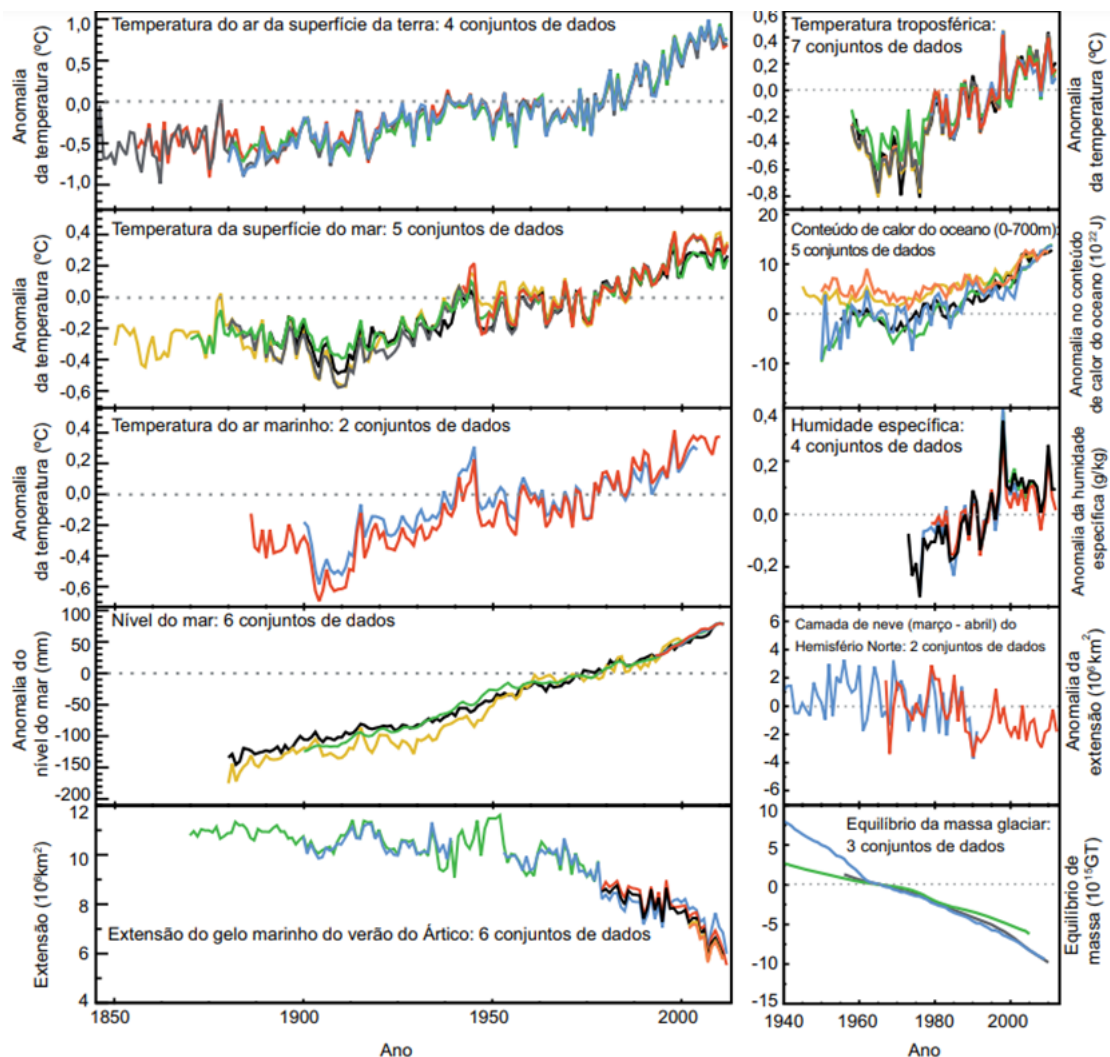
The receiver containing the gas became itself much heated—very sensibly more so than the other—and on being removed, it was many times as long in cooling.

An atmosphere of that gas would give to our earth a high temperature; and if as some suppose, at one period of its history the air had mixed with it a larger proportion than at present, an increased temperature from its own action as well as from increased weight must have necessarily resulted.

Fonte: Foote, 1856

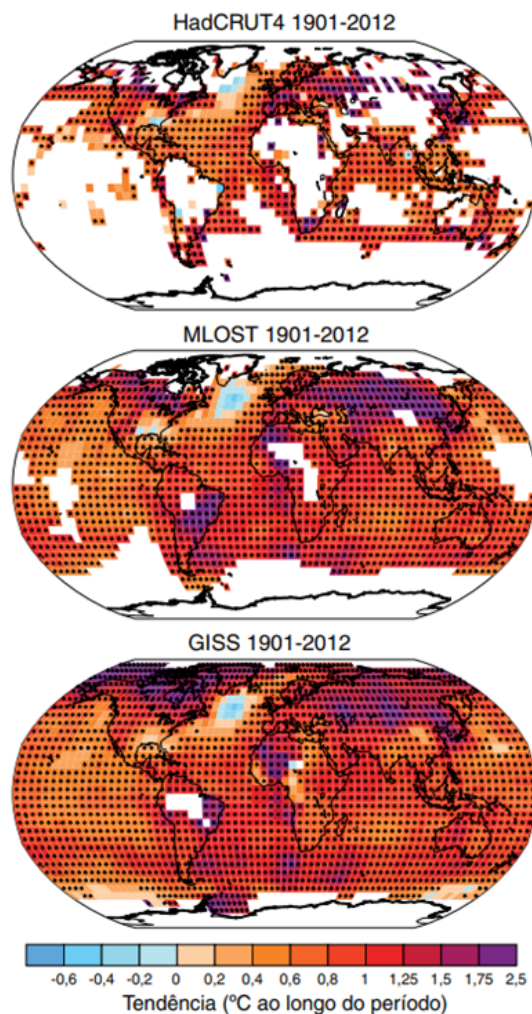
O século XX, por sua vez, testemunhou a industrialização em massa, a expansão da produção automobilística e o crescimento das cidades. Dessa forma, em meados dos anos 50, as alterações de cunho econômico e social, provenientes desse processo, levaram a uma escalada exponencial e sem precedentes das emissões de GEE, conforme o uso de combustíveis fósseis se disseminou globalmente. Com isso, esse novo perfil de emissões, resultante dos novos padrões de consumo e intensificação do modelo econômico vigente adotado pela sociedade, resultou em anomalias que afetam diversos aspectos de todo o globo, abrangendo desde o aumento da temperatura global, e consequentemente o derretimento de massas de gelo, até alterações no ciclo hidrológico e acidificação dos oceanos como apontados pelos dados do IPCC apresentados nas Figuras 3 e 4 (IPCC, 2013).

Figura 3: Vários indicadores complementares de um clima global em mudança. Cada linha representa uma estimativa derivada independentemente da alteração no elemento do clima.



Fonte: IPCC, 2013

Figura 4: Alteração na temperatura da superfície ao longo de 1901–2012, conforme determinado pela tendência linear para três conjuntos de dados. As áreas a branco indicam dados incompletos ou em falta. As tendências foram calculadas apenas para essas caixas da grelha com mais de 70% dos registos completos e mais do que 20% da disponibilidade de dados nos primeiros e últimos 10% do período de tempo. Os sinais de adição pretos (+) indicam onde as tendências são significativas (ou seja, uma tendência de zero fica fora do intervalo de confiança de 90%).



Fonte: IPCC, 2013

Com o avanço dos estudos científicos, e a disseminação das consequências advindas do processo de emissão de GEE, a conscientização dos impactos ambientais aumentou gradualmente, culminando na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano em 1972, um marco inicial para a cooperação global em questões ambientais.

A década de 1980 viu a formalização desse esforço com a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Esses eventos estabeleceram o cenário para tratados mais abrangentes, como o Protocolo de Quioto (1997) e o Acordo de Paris (2015), que definiram metas ambiciosas para a redução das emissões de GEE. Hoje, o contexto histórico das emissões de GEE serve como um lembrete da urgência de enfrentar as mudanças climáticas e impulsiona esforços globais para mitigar os impactos no clima, sociedade e ecossistemas.

3.2. Evolução da Gestão de Resíduos Sólidos

Para compreender a evolução da gestão de resíduos sólidos, é fundamental começar pelo entendimento do que são os resíduos sólidos e, em particular, os resíduos sólidos urbanos (RSU), considerando tanto a perspectiva legal quanto histórica, responsáveis por moldar esses conceitos.

Na perspectiva histórica, a concepção de resíduos sólidos remonta a eras antigas, quando sociedades nômades e primitivas abandonavam os restos do que haviam utilizado, ou consumido, ao se deslocarem para novas regiões, dessa forma, os resíduos deixados para trás eram logo decompostos pela ação do tempo, porém, sem que houvesse uma sobrecarga do meio ambiente nesse processo (GERESOL, 1999).

No entanto, durante a Revolução Industrial no século XIX, a urbanização acelerada levou a uma produção maciça de resíduos sólidos nas cidades, algo distante da realidade dos povos nômades da antiguidade. Esse aumento na geração de resíduos destacou a necessidade de uma abordagem mais abrangente e organizada para lidar com esses materiais (FURLAN, 2017).

A criação dos primeiros aterros sanitários, como o *Fresh Kills Landfill* em Nova York em 1948, foram um marco na gestão de resíduos sólidos, visando minimizar os riscos à saúde pública e ao meio ambiente. No Brasil, isso se tornaria realidade em meados da década de 70, com o surgimento dos primeiros aterros sanitários em solo nacional, como o caso do aterro de Lauzane Paulista, construído em 1974, em São Paulo (STUERMER, 2011).

Na perspectiva legal, a definição de resíduos sólidos é uma parte fundamental das regulamentações ambientais. Nos Estados Unidos, a Lei Nacional de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de 1965 definiu diretrizes para a gestão de resíduos sólidos e promoveu a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas de controle da poluição, sendo atualizada ao longo das últimas décadas conforme o aumento do entendimento da comunidade científica a respeito dos resíduos sólidos e suas emissões. Além disso, o mesmo período foi marcado pelo surgimento de novos mecanismos voltados a dar suporte à Lei previamente instituída, como é o caso da Lei de Recuperação e Reinvestimento Americano de 2009, responsável por abordar a reciclagem e a redução de resíduos (PICANÇO, 2019).

No contexto brasileiro, a perspectiva legislativa em relação aos resíduos sólidos é governada principalmente pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº12.305/2010) (BRASIL, 2010). No entanto, essa legislação é o resultado de uma evolução

histórica que remonta décadas. Durante boa parte do século XX, a gestão de resíduos sólidos no Brasil era caracterizada por práticas inadequadas, como lixões a céu aberto. Porém, a conscientização ambiental crescente e a pressão da sociedade para abordar os problemas decorrentes da disposição inadequada de resíduos levaram à promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010. Ela estabeleceu diretrizes para uma gestão mais responsável e sustentável dos resíduos, incluindo a promoção da reciclagem e a redução da disposição em aterros sanitários.

No âmbito internacional, o Protocolo de Quioto em 1997 estabeleceu compromissos para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), considerando principalmente a obrigatoriedade da adesão por parte dos países desenvolvidos, visando criar um mecanismo que, além de beneficiar o planeta, auxiliasse economicamente os países em desenvolvimento, “retribuindo” suas contribuições para com a redução, ou não intensificação, nas emissões de GEE (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2023).

Um dos mecanismos elaborados e instaurados, decorrentes do protocolo de Quioto foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ferramenta criada com o intuito de auxiliar o processo de redução de emissões de GEE guiando os países que fizerem o seu uso a alcançarem um desenvolvimento sustentável (MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE GOIÁS, 2023). Sua adoção por parte do Brasil resultou em grandes esforços para a redução de emissões de GEE decorrentes do funcionamento de aterros sanitários, sendo que, em 2016, pelo menos 14,8% das atividades de projetos de MDL, o que totalizava 50 projetos, correspondiam a projetos com foco voltado a aterros sanitários, equivalente a uma redução estimada de cerca de 88.066.690 tCO₂eq (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2016).

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por sua vez representam uma categoria específica de resíduos sólidos originados em áreas urbanas, abrangendo cidades e regiões metropolitanas. No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), estabelecida em 2010, delineia diretrizes fundamentais para a gestão dos RSU, estipulando uma abordagem de responsabilidade compartilhada entre governos, setor empresarial e sociedade.

Esses resíduos, provenientes das atividades cotidianas nas zonas urbanas, abrangem uma variedade de materiais que exigem estratégias específicas para sua coleta, tratamento e destinação. Dentre os componentes dos RSU, encontram-se materiais orgânicos, plásticos, metais, papéis, vidros e outros subprodutos resultantes das atividades domésticas, comerciais e industriais.

A legislação brasileira, alinhada com padrões internacionais de gestão ambiental, propõe a implementação de ações como a coleta seletiva, visando a segregação eficiente dos diferentes tipos de resíduos. Além disso, o marco legal estimula a busca por soluções sustentáveis na gestão de RSU, promovendo a redução, reutilização e reciclagem desses materiais.

A relação entre a legislação, a história e os resíduos sólidos, incluindo os RSU, é fundamental para entender como a gestão desses materiais evoluiu ao longo do tempo. A legislação estabelece diretrizes para a gestão adequada, e a perspectiva histórica nos ajuda a compreender a crescente complexidade e a conscientização ambiental que impulsionaram mudanças na gestão de resíduos sólidos, incluindo esforços para reduzir emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionadas à sua gestão. A evolução da definição legal e histórica de resíduos sólidos e RSU estabelece as bases para a evolução da gestão de resíduos sólidos e a promoção de soluções mais sustentáveis em conformidade com regulamentações e considerando a complexidade e desafios em constante evolução.

3.3. Reciclagem - Perspectiva Histórica, Legislativa e Operacional

Na busca por uma gestão mais sustentável de resíduos sólidos, diversas estratégias têm sido adotadas para minimizar o impacto ambiental. Entre essas abordagens, destacam-se a redução do consumo, a reutilização de materiais e, de forma crucial, a reciclagem.

A redução do consumo envolve a conscientização sobre o consumo excessivo e a implementação de práticas que visam diminuir a geração de resíduos desde sua origem. Isso inclui a escolha de produtos com embalagens sustentáveis, a preferência por produtos duráveis e a adoção de práticas de consumo consciente. Ao reduzir a quantidade de resíduos gerados, essa estratégia atua diretamente na fonte do problema.

A reutilização, por sua vez, enfoca a extensão da vida útil dos produtos. Incentiva-se a utilização repetida de itens, seja através da reparação, reforma ou simplesmente utilizando-os para diferentes fins. A reutilização contribui não apenas para a redução da quantidade de resíduos, mas também para a conservação de recursos naturais, uma vez que a produção de novos bens é minimizada.

No centro dessas estratégias, encontra-se a reciclagem, uma prática histórica que ganhou destaque contemporâneo. A reciclagem envolve a coleta, separação e processamento de materiais descartados, transformando-os em novos produtos. Além de reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros, a reciclagem contribui significativamente para a

conservação de recursos naturais, uma vez que materiais reciclados muitas vezes exigem menos energia em sua produção em comparação com materiais virgens.

A prática da reciclagem possui raízes históricas profundas que remontam a civilizações antigas, como os romanos que reutilizavam materiais como cerâmica e metais (ALBERGE, 2020). No entanto, a reciclagem moderna, tal como a entendemos, tem sua origem mais proeminente na Revolução Industrial, que marcou o início da produção em massa e do consumo de bens. O aumento exponencial na produção de resíduos decorrente do crescimento industrial levou à necessidade de encontrar maneiras mais eficazes de lidar com o descarte de materiais.

O movimento da reciclagem ganhou força no século XX, com crescente conscientização ambiental, evidenciada principalmente nas décadas de 1960 e 1970, impulsionado por eventos como o Dia da Terra em 1970. A conscientização sobre os problemas ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos sólidos levou ao desenvolvimento de sistemas de coleta seletiva e ao estabelecimento de aterros sanitários (NERC, 2019).

A legislação desempenha um papel fundamental na promoção da reciclagem e na regulação da gestão de resíduos sólidos. Diversos países têm implementado regulamentações e leis que visam incentivar a reciclagem e minimizar o impacto ambiental da disposição de resíduos. Um exemplo notável é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil, promulgada em 2010 (BRASIL, 2010). A PNRS estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a gestão sustentável de resíduos sólidos, incluindo a promoção da reciclagem. Segundo a mesma, os resíduos sólidos podem ser definidos como,

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

Além disso, acordos internacionais, como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, têm estabelecido metas e compromissos globais para a redução de emissões de gases de efeito estufa, que incluem a gestão adequada de resíduos. A reciclagem desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que reduz a emissão de gases de efeito estufa associada à produção de materiais virgens.

A operacionalização da reciclagem por sua vez envolve diversos atores, desde o cidadão comum que faz a separação de resíduos em casa até as empresas de coleta seletiva, cooperativas de reciclagem e indústrias que processam materiais reciclados (SANTOS, 2016). A coleta seletiva desempenha um papel central, permitindo a separação dos materiais recicláveis dos resíduos comuns.

As cooperativas de reciclagem têm um papel significativo na cadeia de reciclagem, oferecendo oportunidades de emprego e renda para muitas comunidades, além de desempenhar um papel importante na triagem e preparação dos materiais recicláveis para venda às indústrias. No entanto, essas cooperativas muitas vezes enfrentam desafios relacionados à capacitação e à melhoria de suas operações (SOUZA, 2012).

As indústrias de reciclagem desempenham um papel crucial na transformação dos materiais reciclados em produtos finais. A eficiência das operações de reciclagem industrial é fundamental para maximizar o valor dos materiais reciclados e reduzir a demanda por matérias-primas virgens (SEBRAE, 2023).

Nesse contexto, a revisão bibliográfica demonstra a complexidade e a importância da reciclagem como uma abordagem sustentável para a gestão de resíduos sólidos, com raízes históricas, respaldo legal e uma cadeia operacional que envolve diversos agentes.

3.4. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE

A quantificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) tornou-se uma prioridade global à medida que as preocupações com as mudanças climáticas cresceram. Nesta seção, serão exploradas diferentes metodologias utilizadas para mensurar o impacto das emissões de GEE, abordando brevemente sua evolução histórica até os dias atuais, com foco nos modelos Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o *Waste Reduction Model* (WARM).

As metodologias para mensuração do impacto das emissões de GEE evoluíram consideravelmente ao longo das últimas décadas. Durante a primeira metade do século XX, a preocupação com as emissões de GEE era limitada, com uma compreensão rasa quanto aos impactos das atividades humanas no clima global. No entanto, a crescente conscientização e a necessidade de enfrentar as mudanças climáticas resultaram em um rápido desenvolvimento de métodos de mensuração mais precisos e abrangentes.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é uma das metodologias mais significativas no contexto da mensuração de emissões de GEE. Criado como parte do

Protocolo de Quioto em 1997, o MDL tinha como objetivo permitir que países desenvolvidos cumprissem suas metas de redução de emissões financiando projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento (MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE GOIÁS, 2023). Esses países podem vender as reduções de emissões de GEE, as denominadas Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) para os países desenvolvidos, auxiliando-os a reduzir suas emissões de GEE e atingir seus objetivos do Protocolo de Quioto (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, 2023). O Brasil se destacou na implementação de projetos de MDL, especialmente em relação à gestão de resíduos sólidos. Projetos de captura e utilização do biogás gerado em aterros sanitários contribuíram para uma redução significativa das emissões de metano, um GEE altamente potente (CETESB, 2006). Esses projetos não apenas reduziram as emissões, mas também geraram benefícios socioeconômicos e ambientais, incluindo a geração de energia limpa e a melhoria das condições de trabalho em cooperativas de reciclagem.

O Modelo de Avaliação de Ciclo de Vida desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (WARM) é outra abordagem importante para avaliar o impacto das emissões de GEE. Ele se concentra na avaliação do ciclo de vida de produtos e processos, identificando as emissões de GEE em todas as etapas, desde a extração de matérias-primas até o descarte. Isso possibilita a avaliação completa do impacto ambiental, ajudando a identificar áreas de melhoria na redução de emissões (EPA, 2023). Pelo fato de seu desenvolvimento se dar por uma entidade Estadunidense, a metodologia WARM é adaptada ao cenário americano, dessa forma, seu funcionamento se dá pela adoção de fatores específicos dessa macro região, tornando seu uso segmentado para grupos pertencentes a essa nacionalidade.

Podem ser comentadas também as metodologias de mensuração de pegada de carbono, metodologias que, atualmente, estão mais avançadas do que nunca, com uma vasta gama de ferramentas e abordagens disponíveis. Além disso, a mensuração de emissões diretas e indiretas tornou-se uma prática comum em empresas e organizações em todo o mundo, como parte de seus esforços para reduzir sua pegada de carbono.

Essas metodologias desempenham um papel crucial na promoção de ações eficazes para combater as mudanças climáticas. Elas não apenas fornecem dados precisos sobre as emissões de GEE, mas também ajudam a identificar oportunidades para mitigação e a tomar decisões informadas para reduzir o impacto ambiental. A evolução dessas metodologias reflete a crescente urgência de lidar com as mudanças climáticas e a necessidade de ações

concretas para reduzir as emissões de GEE em todo o mundo.

3.5. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE (MDL)

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um dos instrumentos de flexibilização criados pelo Protocolo de Quioto para ajudar os países que o ratificaram a atingir suas metas de redução de emissões de GEE. Em resumo, o MDL, conforme definido no Artigo 12 do Protocolo, permite que os países em desenvolvimento negociem no mercado global cada tonelada de CO₂ equivalente (tCO₂e) que deixarem de emitir ou removerem da atmosfera. Isso cria um incentivo adicional para a redução das emissões em todo o mundo (MOREIRA, 2008).

O Protocolo estipula que os países do Anexo I (nações desenvolvidas com metas de redução de emissões), devem determinar suas metas de redução de GEE em colaboração com os principais emissores em seus territórios. Isso é feito com base nas metas atribuídas a eles pelo Protocolo e distribuídas posteriormente pelo governo local por meio de seu plano nacional de alocação de emissões. Com a introdução do MDL, as empresas que não conseguirem ou optarem por não reduzir suas emissões podem adquirir Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) de países em desenvolvimento que tenham realizado projetos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Elas podem utilizar esses certificados para cumprir parte de suas obrigações, embora o uso desse mecanismo seja limitado a uma parcela de seus compromissos de redução (MENEGUELLO, 2007).

Existem critérios para que um projeto seja elegível como um “Projeto de MDL”, implica em participação voluntária e requer contribuição para o objetivo final da Conferência das Partes. Projetos elegíveis devem gerar benefícios adicionais e sustentáveis para o país onde são implementados, com resultados mensuráveis a longo prazo na mitigação das mudanças climáticas. Eles precisam da aprovação do país anfitrião e atender a critérios mínimos. Por outro lado, o MDL exclui certos tipos de projetos, como conservação florestal e mudanças não relacionadas ao reflorestamento. Além disso, projetos envolvendo energia nuclear e geração não sustentável não são elegíveis (CORDEIRO et al., 2010).

O processo para um projeto no âmbito do MDL envolve várias etapas. Inicialmente, a empresa proponente deve criar o Documento de Concepção do Projeto (DCP). Em seguida, a metodologia descrita no DCP deve ser validada pela Entidade Operacional Designada. A Autoridade Nacional Designada deve aprovar o projeto. Após essa aprovação, o projeto é registrado no Conselho Executivo do MDL. A empresa proponente é responsável pelo

monitoramento do projeto, enquanto a Entidade Operacional Designada realiza a verificação e certificação das reduções de emissões resultantes do projeto. Finalmente, o Conselho Executivo do MDL emite as Reduções Certificadas de Emissão (RCE) (CORDEIRO et al., 2010).

A redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs) resultante das atividades de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é calculada com base nas emissões da linha de base. Um dos requisitos para a elegibilidade do projeto é a existência de uma metodologia aprovada pelo Conselho Executivo do MDL (CE-MDL), que inclua, entre outros aspectos, a fórmula de cálculo da linha de base (LIMA. G.C.G., 2012).

A metodologia AMS-III.A.J. - Redução de emissões pelo uso de material reciclado em vez de matéria-prima - aprovada pelo CE-MDL - aborda a redução de emissões de GEE resultante das atividades de recuperação e reciclagem de materiais, transformando-os em um novo produto final ou em insumos para outras cadeias produtivas (UNFCCC, 2011).

Conforme a metodologia em questão, a reciclagem de um material possibilita sua reintrodução na cadeia produtiva, eliminando certas atividades necessárias para obter o mesmo insumo a partir da matéria-prima virgem extraída da natureza. Essa reintrodução do material no processo produtivo resulta em economia de eletricidade, combustíveis fósseis e recursos naturais.

A redução das emissões decorrente da reciclagem dos materiais é calculada pela diferença entre as emissões da linha de base e as emissões do projeto proposto, levando em consideração as emissões fugitivas, conforme a Equação 1 definida pela metodologia AMS-III.A.J.

$$RE_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

RE_y = Redução das emissões no ano y (tCO_{2eq})

BE_y = Emissões da *baseline* no ano y (tCO_{2eq})

PE_y = Emissões do projeto no ano y (tCO_{2eq})

LE_y = Emissões fugitivas no ano y (tCO_{2eq})

É importante destacar que as emissões relacionadas ao transporte do material, desde os pontos de coleta até as unidades de reciclagem, e posteriormente da reciclagem para a indústria, são tratadas como equivalentes às emissões que ocorreriam na ausência do projeto. Em outras palavras, se não houvesse o projeto de reciclagem, a indústria precisaria adquirir

essa matéria-prima de seus fornecedores, resultando no transporte inevitável até uma unidade de processamento (UNFCCC, 2011).

A Equação 1 engloba as "emissões fugitivas", que se referem às emissões de GEEs ocorridas fora dos limites físicos da atividade do Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), desde que sejam mensuráveis e atribuíveis à atividade do projeto. O conceito de limite do projeto não está relacionado à geografia, mas abrange todas as emissões de GEEs sob controle dos participantes do projeto, desde que sejam significativas e razoavelmente atribuíveis a essas atividades (FRONDIZI, 2009).

Ao incluir as emissões fugitivas no cálculo da linha de base, todos os impactos negativos potenciais das atividades do projeto em termos de emissões de GEEs são considerados. Seiffert (2009) exemplifica emissões fugitivas como os GEEs que escapam em aterros sanitários por meio de encaixes de tubulações, fissuras em taludes, eixos de bombas, entre outros. Apesar de indesejadas, essas emissões podem ser previstas, mensuradas, monitoradas e atribuídas à atividade do projeto. Contudo, se o volume de emissões fugitivas for substancialmente alto, o projeto pode não ser viável no contexto do MDL.

Como discutido anteriormente, a linha de base (BE) procura representar de maneira razoável as emissões antrópicas de GEE que ocorreriam na ausência do projeto proposto. Deve abranger as emissões de todos os gases provenientes de setores e fontes dentro dos limites do projeto (FRONDIZI, 2009).

A metodologia AMS.III-AJ especifica que o cálculo das emissões de CO₂ das atividades do projeto deve considerar as mesmas variáveis utilizadas na linha de base, ou seja, consumo de energia elétrica e consumo de combustíveis fósseis. No caso específico do projeto de reciclagem, devem ser contempladas as quantidades desses insumos utilizados nas atividades do projeto.

É importante lembrar que o MDL é uma ferramenta multifacetada com várias possibilidades de aplicação de projetos, sendo a metodologia aplicada neste trabalho voltado para verificação de recuperação e reciclagem de materiais oriundos de aterros, que requer dados específicos sobre a geração de resíduos, segmentação, índices de consumo energético, índices de consumo de energia para reciclagem.

Em suma, essa metodologia auxilia na mensuração de emissões evitadas pelos principais resíduos reciclados, com o intuito de geração de créditos de carbono, que podem ser realizados por todos os tipos de empresas que visam a redução de emissão de GEE (CETESB, 2006).

3.6. Metodologias para Mensuração da emissão de GEE (WARM)

A Metodologia WARM (*Waste Reduction Model*) é uma ferramenta desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) com o propósito de avaliar o ciclo de vida dos resíduos sólidos e quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a esses resíduos. A sua função principal é fornecer uma estrutura para analisar o impacto ambiental das atividades de gestão de resíduos sólidos, incluindo a coleta, transporte, tratamento e disposição final desses resíduos (EPA, 2023).

A Metodologia WARM pode ser aplicada a fim de se obter uma série de objetivos, tais como:

1. Avaliação de Emissões de GEE:

A Metodologia WARM permite a quantificação das emissões de gases de efeito estufa decorrentes das atividades de gestão de resíduos. Isso inclui a medição das emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) que resultam da decomposição de resíduos em aterros sanitários, de processos térmicos, da reciclagem e de outras práticas de gestão de resíduos.

2. Análise de Impacto Ambiental:

A Metodologia WARM ajuda a entender o impacto ambiental das diferentes opções de gestão de resíduos. A obtenção dessa informação é essencial para que se possa tomar decisões informadas sobre estratégias de gestão de resíduos mais sustentáveis.

3. Apoio a Políticas e Tomada de Decisão:

Governos, agências reguladoras e órgãos de gestão de resíduos podem usar a Metodologia WARM para desenvolver políticas e regulamentações relacionadas à gestão de resíduos. Isso inclui a definição de metas de redução de emissões de GEE e o estabelecimento de diretrizes para a gestão de resíduos.

4. Educação e Conscientização:

A Metodologia WARM tem o potencial para ser uma ferramenta valiosa para educar o público, as empresas e as comunidades sobre a importância da gestão de resíduos sustentável e seus impactos no meio ambiente.

Para utilizar a ferramenta WARM do EPA para avaliar as emissões de gases de efeito estufa associadas à gestão de resíduos, são disponibilizadas uma série de interfaces, tais como:

1. **Ferramenta online do EPA:** O EPA fornece uma interface web para acessar o WARM. É possível visitar o site oficial do EPA e procurar pela seção dedicada à ferramenta WARM. Lá, podem ser visualizadas as instruções sobre como inserir os dados necessários e obter informações sobre as emissões de gases de efeito estufa associadas à gestão de resíduos.
2. **Planilhas do Excel:** O EPA também disponibiliza planilhas do Excel que podem ser usadas para realizar cálculos usando o WARM. Essas planilhas contêm fórmulas e dados que permitem inserir informações sobre a gestão de resíduos e obter estimativas das emissões de GEE.
3. **Software especializado:** Em alguns casos, é possível encontrar softwares especializados que integram a funcionalidade do WARM. Isso pode facilitar o uso da ferramenta, especialmente ao lidar com grandes volumes de dados ou quando há a necessidade de análises mais complexas.

É importante lembrar que o WARM é uma ferramenta técnica que requer dados específicos sobre a gestão de resíduos, como tipos de resíduos, métodos de disposição e transporte, entre outros. Portanto, é essencial seguir as orientações fornecidas pelo EPA e garantir que os dados inseridos sejam precisos.

Em resumo, a Metodologia WARM desempenha um papel fundamental na avaliação e redução das emissões de GEE relacionadas à gestão de resíduos sólidos, e seu público-alvo abrange um amplo espectro de profissionais e partes interessadas envolvidos na gestão de resíduos e na tomada de decisões ambientais.

4. METODOLOGIA

Nesta seção, serão explorados em detalhes os materiais e métodos empregados para conduzir as análises responsáveis por nortear o estudo em questão, até o atingimento completo dos objetivos previamente estabelecidos.

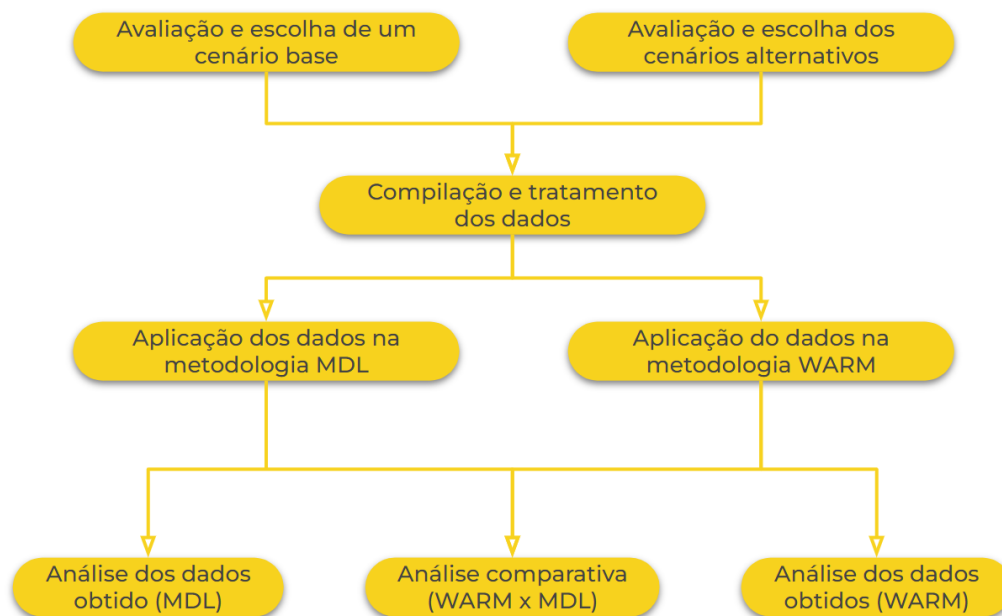
Serão discutidas a estrutura teórica e prática das metodologias MDL e WARM, bem como os procedimentos específicos adotados para aplicá-las a cenários diversos. Além disso, será destacada também a importância de selecionar e adaptar as metodologias de acordo com as características de cada cenário, garantindo a precisão dos resultados e a utilidade das informações geradas.

Sendo assim, a aplicação das metodologias pode ser macro dividida em duas etapas, sendo elas:

- Mapeamento - Etapa responsável por delimitar tanto o perfil de geração de Resíduos Sólidos Urbanos a ser utilizado como base de estudo, quanto os perfis de gerenciamento desses resíduos, a serem simulados em ambas as metodologias;
- Aplicação - Corresponde ao processo de aplicação dos dados delimitados na etapa anterior em ambas as metodologias selecionadas;

A Figura 5 apresenta de forma visual o fluxo metodológico adotado.

Figura 5: Fluxograma simplificado da metodologia adotada.



Fonte: Autores, 2023

4.1. Mapeamento

No início desta etapa, foi conduzida uma busca aprofundada e minuciosa por relatórios e estudos que abordassem questões fundamentais para a aplicação eficaz das metodologias MDL e WARM. Nota-se que a metodologia WARM requer dados particularmente mais detalhados para funcionar adequadamente, sendo assim, os dados específicos de cada metodologia serão tratados em sessões dedicadas a cada ferramenta. Dessa forma, as informações de cunho mais geral necessárias para o funcionamento das metodologias podem ser divididas em duas categorias principais:

- **Categoria 1: Dados para a Criação do Cenário Base de Geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU):**

Para estabelecer um cenário base sólido para ambas as metodologias, foi utilizada a dissertação de pós-graduação do aluno Fernando Henrique Ferreira de Alves Melo, da Universidade Federal de Pernambuco, intitulada "CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DO GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM UM CONSÓRCIO MUNICIPAL DO ESTADO DE PERNAMBUCO". Esta dissertação mapeou e caracterizou

aspectos socioeconômicos e físicos de um consórcio municipal, juntamente com o perfil de geração e gerenciamento de RSU nessas localidades.

O consórcio em foco, denominado COMAGSUL (Consórcio dos Municípios do Agreste e da Mata Sul), é composto por cinco pequenos municípios: Altinho, Agrestina, Belém de Maria, Bonito e Lagoa dos Gatos, todos localizados no estado de Pernambuco. Esses municípios são caracterizados por baixo desenvolvimento econômico e uma média populacional de cerca de 22.600 habitantes em 2014, de acordo com o IBGE (IBGE, 2014).

A disposição final dos resíduos sólidos gerados no consórcio em estudo ocorre no aterro sanitário "Sítio Juá" em Altinho/Agrestina, local que antes era um lixão a céu aberto. Inicialmente, o local contava com catadores que trabalhavam e viviam lá. No entanto, uma ação judicial (processo nº463-87.2010) foi movida pela promotoria de justiça de Altinho para transformar o lixão em aterro sanitário, conforme a Lei nº 12.305/2010. Essa ação incluiu a instalação do aterro, remoção dos catadores, recuperação da área e outras medidas legais. O não cumprimento dessas medidas acarretaria em multas diárias e intervenção judicial, retendo 20% das transferências federais aos municípios. Mesmo com esforços e termos de ajustamento de conduta, os municípios enfrentam a intervenção judicial devido ao não cumprimento das exigências legais, conforme o processo nº463-87.2010 (MELO, 2015).

Os cinco municípios que depositam resíduos no aterro sanitário do COMAGSUL apresentam uma média de geração de 0,441 kg/habitante.dia. Dessa forma, Agrestina lidera com a maior geração, alcançando 0,541 kg/habitante.dia, seguido por Bonito com 0,522 kg/habitante.dia, Belém de Maria com 0,464 kg/habitante.dia, Altinho com 0,351 kg/habitante.dia e Lagoa dos Gatos com 0,325 kg/habitante.dia, como evidenciado na Tabela 1 (MELO, 2015). Essa produção per capita de resíduos indica uma relação proporcional entre o desenvolvimento econômico e a geração de resíduos, juntamente com a influência direta do tamanho populacional do município e da renda de sua população. Isso destaca Agrestina e Bonito como os municípios com a maior geração per capita de resíduos (MELO, 2015).

Tabela 1: Quantidade de RSU dispostas no aterro do COMAGSUL em 2014 e geração per capita.

Municípios	Quantidade mensal de RSU média em 2014 (toneladas)	Quantidade de RSU segundo PERS (kg/dia)	População atendida nos municípios do consórcio do aterro (habitantes)	Geração média de RSU per capita em kg/habitante.dia ⁻¹
AGRESTINA	367,95	12.265,2	22.679	0,541
ALTINHO	240,9	8.030,1	22.865	0,351
BONITO	588,19	19.606,4	37.566	0,522
BELÉM DE MARIA	157,94	5.264,6	11.353	0,464
LAGOA DOS GATOS	152,25	5.074,9	15.615	0,325
TOTAL	1.507,23	50.241	110.078	0,441

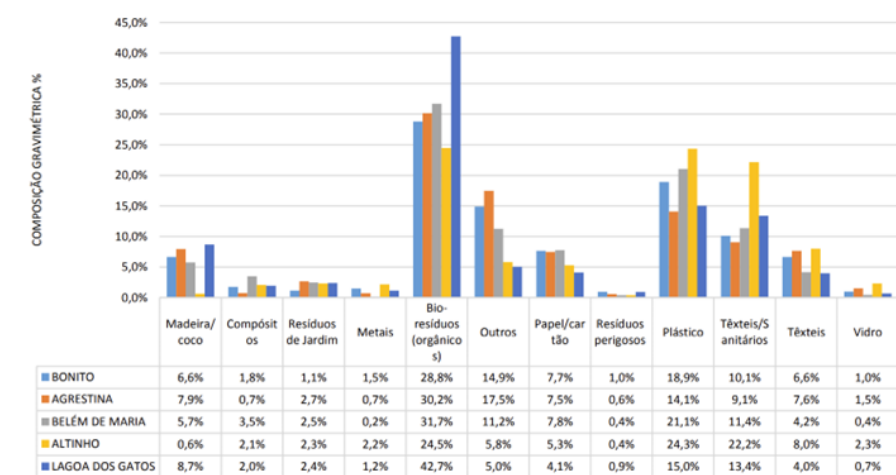
Fonte: MELO, 2015

A composição gravimétrica dos RSU gerados no COMAGSUL, foi levantada no estudo conduzido por Melo, conforme apresentado nas Figuras 6 e 7. Em primeiro lugar, destaca-se a predominância dos resíduos orgânicos, que representam a maior parcela da composição. Lagoa dos Gatos lidera nesse aspecto, com 42,7% de resíduos orgânicos, seguido por Belém de Maria (31,7%), Agrestina (30,2%), Bonito (28,8%) e Altinho (24,5%) (MELO, 2015).

Além disso, a categoria "outros" também se destaca devido à sua contribuição significativa para a composição geral dos resíduos. Nesse caso, Lagoa dos Gatos apresenta a menor proporção, com apenas 5%, enquanto Agrestina registra a maior proporção, atingindo 17,5%. (MELO, 2015)

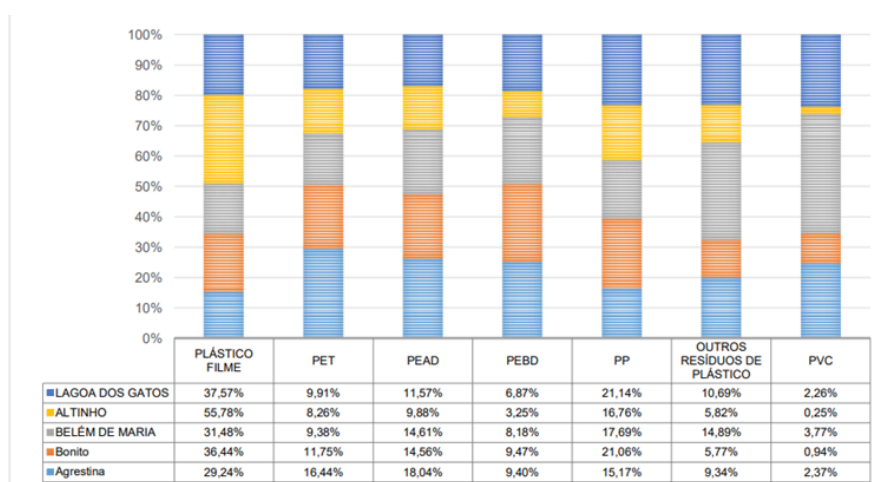
Os resíduos plásticos, representam o segundo maior componente na massa de resíduos do aterro sanitário do COMAGSUL. Bonito se destaca como o maior gerador, com 34,31% de toda massa de plásticos gerados, seguido por Agrestina (30,17%), Belém de Maria (13,29%), Lagoa dos Gatos (12,46%), e Altinho (9,77%). As subcategorias de plástico estão bem distribuídas em todos os municípios, e o plástico filme se destaca como a subcategoria mais comum em todos eles (MELO, 2015).

Figura 6: Composição gravimétrica dos resíduos do aterro sanitário do COMAGSUL.



Fonte: MELO, 2015

Figura 7: Percentual das subcategorias de plásticos.



Fonte: MELO, 2015

Os dados apresentados no estudo inicial de Melo (MELO, 2015) não foram suficientes para trazer uma caracterização completa do gerenciamento de RSU no COMAGSUL. Porém, um estudo subsequente, também conduzido por Melo, em 2020, foi capaz de concluir que, da massa total de resíduos que chega ao aterro do COMAGSUL, cerca de 20% é referente a resíduos recicláveis, com o restante correspondendo a resíduos compostáveis e rejeitos (MELO, 2020).

Por fim, buscou-se obter dados referentes a fração efetivamente reciclada para cada município do COMAGSUL, porém não foi possível encontrar informações acerca deste tópico. Ao consultar o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), ficou evidente que não existem relatórios municipais para essas localidades que

abordem a gestão de resíduos sólidos. Sendo assim, foi assumida uma taxa de 0% de reciclagem para o consórcio COMAGSUL.

Dessa forma, considerando que, para a primeira categoria de dados necessários, são requeridas informações que abordam a quantidade de RSU gerados por tipo de material no local de estudo, ficou claro que a dissertação avaliada, foi capaz de fornecer o detalhamento necessário para criação de um cenário base sólido.

- **Categoria 2: Dados para os Perfis de Reciclagem de RSU em Quatro Cenários Distintos**

Para segmentar os perfis de reciclagem em quatro níveis percentuais diferentes, foi consultado o ranking de reciclagem do Environmental Performance Index (EPI). Este ranking avalia a taxa de reciclagem total como a proporção de materiais recicláveis (metal, plástico, papel e vidro) reciclados em cada país, expressando essas informações em forma de pontuação, onde 100 indica que um país recicla todos os materiais recicláveis pós-consumo e 0 indica que nenhum material é reciclado pós-consumo (YALE, 2022).

Dessa forma, foram selecionados os seguintes países para representar os quatro cenários de reciclagem:

- Brasil: Cenário Ruim (pontuação EPI de 2.80).
- Estados Unidos: Cenário Médio (pontuação EPI de 14.80).
- Reino Unido: Cenário Bom (pontuação EPI de 34.20).
- Austrália: Cenário Excelente (pontuação EPI de 52.90).

Os dados específicos para cada cenário são fornecidos nas etapas de aplicação de cada simulação. Com essas informações fundamentais em mãos, é possível avançar para a etapa de aplicação das metodologias MDL e WARM.

4.2. Metodologia MDL

O tipo de projeto adotado neste trabalho foi o “AMS-III.A.J. *Recovery and Recycling of Material from Solid Waste*” desenvolvido pela *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*.

O escopo da metodologia compreende atividades de recuperação e reciclagem de materiais em resíduos sólidos urbanos e o processamento deles em produtos finais ou intermediários, reduzindo a produção de materiais utilizando matéria prima virgem, resultando na redução do uso de energia.

A metodologia cobre as emissões associadas dos seguintes materiais: Plástico: Polietileno de alta densidade (PEAD); Polietileno de baixa densidade (PEBD), Polietileno Tereftalato (PET) ou Polipropileno (PP); Papel e Papel cartão: Se o cenário base utilizado considerar a decomposição em um aterro, as emissões de metano podem ser reivindicadas; Vidro: Produção de vidro para recipientes usando insumo virgem; Metais: Produção de metais (alumínio e ferro) extraídos ou matéria-prima virgem. Outros tipos de metais não são contemplados pela metodologia.

Na metodologia original é descrita somente a cobertura de emissões do PP, entretanto no Anuário da Reciclagem (ANCAT, 2021) que realiza adaptações para o contexto brasileiro, é englobado em conjunto com o PP, o Poliestireno (PS), portanto esses dados serão considerados nos cálculos envolvendo os cenários alternativos.

Os dados coletados do consórcio COMAGSUL estão sendo utilizados como os dados de entrada para aplicação da metodologia AMS.III-AJ, aplicando as porcentagens de reciclagem referente a cada cenário alternativo, como apresentado na Tabela 2. Esses valores serviram para aplicação por tipo de material posteriormente para verificar a quantidade de CO_{2eq} evitados. Os valores de plásticos que não são abrangidos pela metodologia, foram excluídos.

Tabela 2: Dados de entrada referente aos resíduos reciclados do COMAGSUL

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Austrália/Excelente)	Cenário Alternativo (Reino Unido/Bom)	Cenário Alternativo (Estados Unidos/Médio)	Cenário Alternativo (Brasil/Ruim)
	Massa Aterrada (Ton/Ano)	Massa Reciclada (Ton/Ano)	Massa Reciclada (Ton/Ano)	Massa Reciclada (Ton/Ano)	Massa Reciclada (Ton/Ano)
Papel Misto	1.250,59	661,56	427,70	185,09	35,02
PEAD	466,08	246,56	159,40	68,98	13,05
PEBD	259,22	137,13	88,65	38,36	7,26
PET	381,79	201,97	130,57	56,50	10,69
PP+PS	621,80	328,93	212,66	92,03	17,41

Plásticos Totais	1.728,89	908,59	591,28	255,87	48,41
Alumínio	106,26	56,21	36,34	15,73	2,98
Aço	119,82	63,39	40,98	17,73	3,35
Metais Totais	226,09	119,60	77,32	33,46	6,33
Vidro	223,67	118,32	76,50	33,10	6,26

Fonte: Autores, 2023

4.2.1. Cálculo das emissões de GEE a partir das massas de RS reciclados

As emissões de base totais de CO_{2eq} são definidas como o somatório das emissões base de cada material, como na Equação 2:

Equação 2: Equação para o cálculo da emissão base total de CO_{2e}

$$BE_a = BE_{plástico,a} + BE_{papel,a} + BE_{alumínio,a} + BE_{outros metais,a} + BE_{vidro,a}$$

Fonte: ANCAT (2021)

No qual:

BE_a = Emissões base no ano a (t CO_{2e})

$BE_{plástico,a}$ = Emissões base no ano a associadas à reciclagem de plástico (tCO_{2e})

$BE_{vidro,a}$ = Emissões base no ano a associadas à reciclagem de vidro (tCO_{2e})

$BE_{papel,a}$ = Emissões base no ano a associadas à reciclagem de papel (tCO_{2e})

$BE_{metal,a}$ = Emissões base no ano a associadas à reciclagem de metal (tCO₂)

Para cada um dos materiais, há uma forma específica para calcular as emissões base. Foram utilizadas as fórmulas dispostas no Anuário da Reciclagem (ANCAT, 2021), visto que as adaptações necessárias para o contexto brasileiro já haviam sido feitas por eles.

4.2.1.1. Plástico

No caso do plástico, a redução das emissões pela sua reciclagem é decorrente da queda da produção de materiais virgens. Assim, as emissões base são associadas ao consumo de energia para a produção de pellets de plástico, a partir de materiais plásticos virgens.

Como há diferença no gasto energético na produção, conforme o tipo de plástico (PEAD, PEBD, PET, PP e PS), é necessário calcular a emissão por cada um dos tipos. As emissões são definidas pela fórmula apresentada na Equação 3:

Equação 3: Equação para o cálculo da emissão base de CO₂e advinda do plástico

$$BE_{plástico, a} = \sum_i Q_{i,a} \times L_i \times (SEC_{Bl, i} \times EF_{el, a} + SFC_{Bl, i} \times EF_{FF, CO_2})$$

Fonte: ANCAT (2021)

Onde:

BE_{plástico, a} = Emissões base de plástico no ano a (tCO₂e/ano);

i = Índice indicando o tipo de plástico (PEAD, PEBD, PET, PP e PS);

Q_{i,a} = Quantidade de plástico do tipo i reciclada/recuperada no ano a (t/ano);

L_i = Fator de ajuste para compensar a degradação na qualidade do material e a perda de material no processo de produção do produto final, usando o material reciclado (de acordo com a metodologia, foi utilizado 0,75);

SEC_{Bl,i} = Consumo específico de eletricidade para a produção de material virgem do tipo i (MWh/t);

EF_{el,a} = Fator de emissão para eletricidade da rede (tCO₂/MWh), comum a todos os materiais;

SFC_{Bl,i} = Consumo específico de combustível para a produção de material virgem do tipo i (GJ/t);

EF_{FF,CO_2} = Fator de emissão da CO₂e para combustível fóssil;

A tabela 3 demonstra a forma que os dados são organizados e aplicados para se obter as emissões evitadas de CO₂ provenientes do plástico.

Tabela 3: Potencial de redução das emissões de CO₂e dos plásticos decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base do COMAGSUL.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(eI,a)	SFC(BI,i)	EF(FF,CO ₂)	BE(plástico,a)
	ton						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	a*b*(c*d+e*f)
PEAD	-	0,75	0,83	0,454	15	0,067	-
PEBD	-	0,75	1,67	0,454	15	0,067	-
PET	-	0,75	1,11	0,454	15	0,067	-
PP + PS	-	0,75	0,56	0,454	11,6	0,067	-

Fonte: Autores (2023).

4.2.1.2. Papel

Foi adotada a metodologia simplificada para calcular as emissões base, definida pela *TOOL04 Methodological tool: Emissions from waste disposal sites*, em que os fatores dependem principalmente do tipo de clima (tropical, temperado, polar), seguindo a equação apresentada na Equação 4.

Equação 4: Equação para o cálculo da emissão base de CO₂e advinda do papel

$$BE_{CH_4, a} = \varphi_a \times (1 - f_a) \times GWP_{CH_4} \times \sum_{j=1}^a Default_j \times W_j$$

Fonte: ANCAT (2021)

Onde:

$BE_{CH_4, a}$ = Emissões base decorrente do vazamento de metano gerado a partir do descarte de resíduos em locais como aterros sanitários e lixões (tCO_{2eq} / ano);

ϕ_a = Fator de correção do modelo para considerar as incertezas do modelo ano a ;

f_a = Fração de metano capturado no local de descarte dos resíduos, queimado ou usado de outra maneira que evite as emissões de metano para a atmosfera. Como não foi possível coletar informações sobre projetos de captura de metano nos locais de descarte foi considerado que $f_a = 0$;

GWP_{CH_4} = Potencial de aquecimento global do metano ($GWP_{CH_4} = 25$);

$Default_j$ = Fator que depende da zona climática e o ano j desde o descarte. No caso em específico, apenas um ano foi considerado desde o descarte, visto que o tempo médio de decomposição do papel é inferior a 1 ano;

W_j = Quantidade de resíduo sólido descartado no ano j (ton/ano).

A Tabela 4 demonstra a forma que os dados são organizados e aplicados para se obter as emissões evitadas de CO_2 provenientes do papel.

Tabela 4: Potencial de redução das emissões de CO_2 e do papel decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

	$W_j =$	ϕ	$1 - f(a)$	$GWP(CH_4)$	$Default(j) =$	$BE(CH_4, a)$
	ton	-	-	-	-	tCo2
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	$a*b*c*d*e$
Papel	-	0,83	1,00	25,00	0,0058	-

Fonte: Autores (2023)

4.2.1.3. Metais

Assim como no caso do plástico, a redução das emissões pela reciclagem é decorrente da diminuição da produção de materiais virgens. As emissões base são associadas ao consumo de energia para a produção de alumínio a partir de insumos virgens, segundo a equação apresentada na Equação 5. Os valores para cálculo estão dispostos na Tabela 5.

Equação 5: Equação para o cálculo da emissão base de CO₂e advinda do alumínio e outros metais

$$BE_{\text{alumínio}, a} = Q_{\text{alumínio}, a} \times SE_{\text{alumínio}}$$

Fonte: ANCAT (2021)

Onde:

BE_{alumínio, a} = Quantidade de emissões evitadas decorrente da reciclagem de alumínio no ano (tCO_{2eq} / ano);

Q_{alumínio, a} = Quantidade de alumínio reciclado enviado para uma instalação de processamento fabricação no ano (ton/ano);

SE_{alumínio} = Fator de emissão de CO₂e específico para produção de alumínio (8,40 tCO₂/t);

No caso dos outros metais, as emissões também decorrem do consumo de energia para a produção de materiais metálicos virgens e possuem mesma fórmula que a de alumínio. Sendo o SE_{aço/ferro} para o aço e ferro considerado de 1,27 tCO₂e/t.

Tabela 5: Potencial de redução das emissões de CO₂e dos metais decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

(i)	Q(i,a)	Se(i)	BE(metal,a)
	ton	CO ₂ /t	tCO ₂
	(a)	(b)	a*b
Alumínio	-	8,40	-
Aço	-	1,27	-

Fonte: Autores (2023)

4.2.1.4. Vidro

Assim como para o alumínio e outros metais, as emissões base são associadas ao consumo de energia para a produção de vidro virgem. A metodologia é similar à de plástico,

com a diferença de que não há consumo de combustível fóssil, nem alteração da produção de diferentes tipos de vidro. Os valores para cálculo estão dispostos na Tabela 6.

Assim, a emissão referente à produção de material virgem é estimada a partir da equação apresentada na Equação 6:

Equação 6: Equação para o cálculo da emissão base de CO₂e advinda do vidro.

$$BE_{vidro, a} = Q_{i, a} \times L_i \times SEC_{Bl, i} \times EF_{el, a}$$

Fonte: ANCAT (2021)

Onde:

BE_{vidro, a} = Quantidade de emissões evitadas decorrente da reciclagem de vidro no ano (tCO_{2eq} / ano);

Q_{i, a} = Quantidade de casco de vidro reciclado pela atividade de projeto no ano (ton/ano);

L_i = Fator de ajuste para ajustar a degradação na qualidade do material e a perda de material no processo de produção do produto final, usando o material reciclado (no caso do vidro, de 0,88);

SEC_{Bl, i} = Consumo específico de eletricidade para a produção do vidro virgem (0,026 MWh/t);

EF_{el, a} = Fator de emissão da rede elétrica que fornece eletricidade para a reciclagem instalação no ano (tCO₂/MWh);

Tabela 6: Potencial de redução das emissões de CO₂e do vidro decorrentes da porcentagem de reciclagem adotada a partir dos dados base da COMAGSUL.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BL,i)	EF(el,a)	BE(vidro,a)
	ton		MWh/t	tCO ₂ /MWh	tCO ₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	a*b*c*d

Vidro	-	0,88	0,03	0,454	-
-------	---	------	------	-------	---

Fonte: Autores (2023)

4.2.2. Adaptações necessárias para se obter a segmentação dos materiais Plástico e Metais

Para a determinação dos níveis de reciclagem de cada tipologia de plástico referentes ao cenário Australiano (Excelente) foi utilizado o documento “*2017-18 Australian Plastics Recycling Survey - National Report*” publicado pelo *Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (DCCEEW)* do governo Australiano (DCCEEW, 2021). A partir dos dados dispostos de consumo de plástico, foi possível fazer aproximações para se obter uma segmentação estimada. Os dados utilizados estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7: Dados de consumo de plástico por tipo de polímero na Austrália

Table 7 – Australian plastics consumption by polymer type and source in 2017–18 (tonnes)

Polymer type	Local use of locally manufactured + imported resins	Imports of plastics in finished and semi-finished goods	Locally processed recycle into local use	Australian consumption
PET (1)	114 100	223 000	18 200	355 300
PE-HD (2)	377 600	235 600	43 300	656 500
PVC (3)	233 900	172 000	4 300	410 200
PE-LD/LLD (4)	198 800	172 400	28 800	399 900
PP (5)	176 300	274 000	18 500	468 900
PS (6)	12 900	48 700	1 900	63 600
PS-E (6)	50 500	34 900	1 700	87 100
ABS/SAN/ASA (7)	9 500	56 900	800	67 300
PU (7)	35 600	44 500	6 500	86 600
Nylon (7)	10 800	114 500	200	125 500
Bioplastic (7)	<100	<100	0	<100
Other (7)	75 300	141 900	800	218 000
Unknown polymer	5 800	462 500	0	468 400
Total	1 301 200	1 981 000	125 100	3 407 300

Fonte: DCCEEW (2018)

De acordo com a metodologia, os tipos de plásticos considerados são PEAD, PEBD, PET, PP + PS, foi feita uma filtragem inicial para utilizar somente esses materiais. Dessa

forma, foram utilizados os seguintes materiais: PET; PE-HD (PEAD); PE-LD/LLD (Polietileno de baixa densidade versátil para aplicações de injeção por molde) - categorizado como PEBD por ser de baixa densidade; PP, PS, PS-E, ABS/SAN/ASA (um copolímero de Estireno e Acrilonitrilo pertencente à família dos plásticos, mais especificamente, aos polímeros de estireno (dos quais o mais conhecido é o poliestireno).

Os demais materiais, por não fazerem parte da metodologia para os cálculos, foram desconsiderados, como mostrado na Tabela 8, sendo necessário fazer um novo cálculo para obter estimativas de percentual para cada tipo de plástico.

Tabela 8: Resultado dos cálculos para se obter a nova porcentagem por tipo de plástico

	Tipo de Polímero	Uso local de produtos fabricados localmente (ton/ano)	Plásticos Importados (ton/ano)	Processado Localmente (ton/ano)	Consumo Australiano (ton/ano)	% Por tipo de Polímero
PET	PET	114.100	223.000	18.200	355.300	10,8%
PEAD	PE-HD	377.600	235.600	43.300	656.500	20,0%
Outros	PVC	233.900	172.000	4.300	410.200	12,5%
PEBD	PE-LD/LLD	198.800	172.400	28.800	400.000	12,2%
PP	PP	176.300	274.000	18.500	468.800	14,3%
PS	PS	12.900	48.700	1.900	63.500	1,9%
	PS-E	50.500	34.900	1.700	87.100	2,7%
	ABS/SAN/ASA	9.500	56.900	800	67.200	2,0%
Outros	PU	35.600	44.500	6.500	86.600	2,6%
	Nylon	10.800	114.500	200	125.500	3,8%
	Bioplastic	100	100	0	200	0,0%
	Other	75.300	141.900	800	218.000	6,6%
	Polímeros desconhecidos	5.800	462.500	0	468.300	14,3%
	Total	1.301.200	1.981.000	-	3.282.200	103,81%

Fonte: Autores (2023)

Os valores em laranja foram desconsiderados, por não fazerem parte da metodologia. É possível perceber que a soma de todos os valores resulta em 103,81%, por conta de arredondamentos feitos ao longo dos cálculos dos materiais.

Para se obter a segmentação por tipo de polímero utilizado na metodologia proposta (PET, PEAD, PEBD, PP+PS), foi aplicado um racional de regra de três simples. A partir dos dados obtidos na tabela 5, todas as porcentagens em amarelo foram somadas, obtendo um resultado de 63,9%. Para se obter um novo cenário em que os 100%, as porcentagens

individuais inerentes a cada polímero foram divididas por 63,9% e multiplicadas por 100, em que o resultado para segmentação a ser aplicada estão dispostos na Tabela 9. Esses resultados são específicos para o cenário Excelente - Austrália por ter sido possível encontrar dados específicos da região. Para os demais cenários, quando não foi possível encontrar dados específicos, foram utilizados dados mundiais. O mesmo raciocínio foi aplicado para os metais, mas com diferentes materiais base.

Tabela 9: Resultados da segmentação por tipo de polímero para o contexto Australiano

Tipo de Plástico	Porcentagem para segmentação	Massa de plástico reciclado (Ton/Ano)
PET	17%	201,97
PEAD	31%	246,56
PEBD	19%	137,13
PP+PS	33%	328,93

Fonte: Autores (2023)

Para o cenário do Reino Unido (Bom) e os cenários dos Estados Unidos (Médio) e Brasil (Ruim), também foi necessário realizar uma adaptação, entretanto não foi possível encontrar dados específicos locais, sendo necessário utilizar dados mundiais de uso por tipo de polímeros a partir do banco de dados “*Global Plastic Outlook*” realizado pela “*The Organization for Economic Co operation and Development (OECD)*” disponível no “*OECD iLibrary*” (OECD, 2022).

Os dados utilizados para fazer as estimativas de segmentação por tipo de plástico, estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10: Dados de consumo mundiais de plástico por tipo de polímero

Tipos de Polímero	Quantidade de plástico consumidos (ton)
Outros	80,96
Revestimento plástico	0,541
PEBD	54.303
PEAD	55.544
PP	72.805
PS	21.116

PVC	51.392
PET	24.918
PUR	18.032
Fibras	60.448
Revestimentos de marcação rodoviária	0,682
Elastômeros (pneus)	7.734
Bioplásticos	2.326
ABS, ASA, SAN	8.944
Total	459.746

Fonte: Adaptado OECD (2022)

Foi realizado o mesmo racional aplicado no contexto Australiano, sendo os resultados compilados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados da segmentação de polímeros para os cenários Bom - Reino Unido, Médio - Estados Unidos e Ruim - Brasil.

Tipo de Plástico	Porcentagem para segmentação	Massa de plástico reciclado - Reino Unido (Ton/Ano)	Massa de plástico reciclado - Estados Unidos (Ton/Ano)	Massa de plástico reciclado - Brasil (Ton/Ano)
PET	11%	130,57	56,50	10,69
PEAD	24%	159,40	68,98	13,05
PEBD	24%	88,65	38,36	7,26
PP+PS	41%	212,66	92,03	17,41

Fonte: Autores (2023)

Para os metais também foi necessário realizar um tratamento nos dados de entrada coletados do consórcio COMAGSUL pois nele estava um valor total para metais, sem uma segmentação por tipo de metal (Alumínio e Aço) como aplicado no material base do Anuário da Reciclagem de 2021 (ANCAT, 2021).

Para fazer essa segmentação foram utilizados os dados do relatório “*Recycling Rates of Metals - A Status Report*” (UNEP, 2011) publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). A partir dos dados mundiais dispostos de revisão das estatísticas de reciclagem de metais ferrosos (Ferro) e não ferrosos (Alumínio), foi feita uma média dos valores de porcentagem de conteúdo reciclado (*Recycled Content - RC*), e

posteriormente uma regra de três para determinar uma faixa de porcentagem para cada tipo de material. Os dados utilizados podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13. Os dados de taxa de sucata antiga (*Old Scrap Ratio - OSR*) e taxa de reciclagem em fim de vida (*End-of-Life Recycling Rate - EOL-RR*) foram desconsiderados.

Tabela 12: Métricas de ferro reciclado mundialmente

Metal	OSR (%)	RC (%)	EOL-RR (%)
V			< 1 ^a
Cr	60 ^h , 72 ⁱ	20 ^j , 18 ^h	87 ⁱ , 93 ^h
Mn	33 ^a , 67 ^j	37 ^j	53 ^j
Fe	54 ^a , 52 ^b , 66 ^c , 65 ^d	28 ^d , 41 ^c , 52 ^b	52 ^c , 67 ^d , 78 ^e , 90 ^f
Ni	66–70 ^{m, o} , 88 ⁿ	29 ^m , 41 ⁿ	57 ⁿ , 58–63 ^{m, o}
Nb	44 ^a , 56 ^l	22 ^l	50 ^l , 56 ^a
Mo	33 ^a , 67 ^k	33 ^k	30 ^k

Fonte: UNEP (2011)

Tabela 13: Métricas de alumínio reciclado mundialmente

Metal	OSR (%)	RC (%)	EOL-RR (%)
Mg	42 ^h	33 ^h	39 ^h
Al	40 ^a , 50 ^b	34 ^c , 36 ^a , 36 ^b	42 ^a , 60 ^c , 70 ^b
Ti ^q	11 ^m	52 ^m	91 ^m
Co	50 ^d	32 ^d	68 ^d
Cu	24 ^e , 78 ^f	20 ^f , 30 ^e , 37 ^{g, n}	43 ^e , 53 ^f
Zn	19 ⁿ , 35–40 ^p , 71 ^o	18 ^o , 27 ⁿ	19 ⁿ , 35–60 ^p , 52 ^o
Sn	50 ^l	22 ^l	75 ^l
Pb	95 ⁱ , 96 ^j	63 ⁱ , 42 ^k , 51 ^j	95 ⁱ , 52 ^k , 68 ^j

Fonte: UNEP (2011)

Os dados segmentados por tipo de metais estão dispostos na Tabela 14

Tabela 14: Porcentagem a ser aplicada para segmentação dos metais nos cenários alternativos

Material	Porcentagem para segmentação
Alumínio	53%
Ferro	47%

Fonte: Autores (2023)

Os valores obtidos para segmentação para cada tipo de metal serão considerados para todos os cenários alternativos.

4.3. Waste Reduction Model (WARM)

A EPA disponibiliza uma série de mecanismos para aplicação da metodologia WARM, os quais apresentam níveis distintos de flexibilidade se tratando da possibilidade de manipulação dos dados. Sendo assim, considerando a maior flexibilidade e praticidade de se trabalhar com os valores a serem utilizados, optou-se pelo uso da planilha Excel, disponibilizada no site da EPA, a qual se encontra na versão 15 até o momento do atual trabalho, sendo essa a versão utilizada. As metodologias não possuem divergências quanto aos resultados finais obtidos, apresentando as mesmas conclusões ao serem considerados os mesmos cenários e valores.

Para que se possa ter uma aplicação correta e efetiva da metodologia em questão, é exigida uma ampla gama de dados referentes a diferentes aspectos do ciclo de vida dos resíduos, aspectos esses que possuem potencial de influenciar as emissões finais de um determinado cenário, dessa forma, os parâmetros adotados para preenchimento da planilha Excel disponibilizada pelo programa WARM tiveram como base, os dados dos municípios do consórcio COMAGSUL, referenciado na etapa de mapeamento, somados a informações complementares, obtidas por meio de outros documentos, referenciadas ao longo das sessões subsequentes.

Isso posto, os passos seguidos, e métodos utilizados para preenchimento dos dados de entrada, juntamente com as devidas justificativas para escolha de tais informações, são apresentados nos tópicos em sequência.

4.3.1.1. Criação do Cenário Base

Dentro do escopo deste estudo, um dos pilares fundamentais e de extrema relevância para o pleno funcionamento da metodologia WARM é a criação de um cenário base sólido para a análise comparativa de emissões pré e pós adoção da reciclagem. Essa etapa requer a definição de informações de natureza qualitativa, relacionadas aos diferentes tipos e subtipos de resíduos que podem ser gerados ou não no contexto estudado, assim como a delimitação dos métodos de destinação de resíduos a serem aplicados. Além disso, são necessárias informações quantitativas que envolvem a quantidade de resíduos gerados em toneladas para cada categoria previamente definida, bem como a fração de cada quantidade destinada a cada uma das várias formas de disposição de resíduos contempladas na metodologia.

Para criar as bases sólidas desse cenário, utilizamos os dados relativos à quantidade média mensal de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados em 2014 em cada um dos municípios que compõem o consórcio municipal COMAGSUL previamente mencionado e apontados na Tabela 1. Esses valores foram multiplicados por doze meses para que se pudesse calcular a estimativa anual de geração de RSU nas diferentes localidades. Posteriormente, foram somados os valores anuais de geração de resíduos de cada município, considerando o consórcio COMAGSUL como uma única entidade, de acordo com a abordagem adotada neste estudo.

Em seguida, foram aplicadas as percentagens obtidas de cada material, por meio da caracterização gravimétrica da massa total, apresentada nas Tabelas 15 e 16, individualmente para cada município, permitindo-nos segmentar a massa total de RSU em cada subcategoria de resíduo considerado na avaliação gravimétrica, e, por meio da soma de cada massa de material para cada município, foi possível identificar a massa total coletada de cada resíduo no consórcio COMAGSUL como um todo. A fórmula utilizada é apresentada na Equação 7.

$$(M_{tm1} \times F_{rm1}) + \dots + (M_{tm5} \times F_{rm5}) = M_{tr} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

M_{tm} = Massa total do município (Toneladas);

F_{rm} = Fração do resíduo i no município (%);

M_{tr} = Massa total do resíduo i gerada no consórcio (Toneladas).

Com os cálculos devidamente realizados, obteve-se as massas geradas para cada categoria identificada nas Tabela 15 e 16.

Tabela 15: Massa estimada dos resíduos gerados nos municípios em estudo em toneladas, com base na gravimetria obtida por meio de volume amostral.

Material	BONITO (Ton)		AGRESTINA (Ton)		BELÉM DE MARIA (Ton)		ALTINHO (Ton)		LAGOA DOS GATOS (Ton)		TOTAL (Ton)
Madeira/Coco	6,6%	465,85	7,9%	348,82	5,7%	108,03	0,6%	17,34	8,7%	158,95	1.098,99
Compósitos	1,8%	127,05	0,7%	30,91	3,5%	66,33	2,1%	60,71	2,0%	36,54	321,54
Resíduos de Jardim	1,1%	77,64	2,7%	119,22	2,5%	47,38	2,3%	66,49	2,4%	43,85	354,58
Metais	1,5%	105,87	0,7%	30,91	0,2%	3,79	2,2%	63,60	1,2%	21,92	226,09
Bioresíduos (Orgânicos)	28,8%	2.032,78	30,2%	1.333,45	31,7%	600,80	24,5%	708,25	42,7%	780,13	5.455,41
Outros	14,9%	1.051,68	17,5%	772,70	11,2%	212,27	5,8%	167,67	5,0%	91,35	2.295,67
Papel/Cartão	7,7%	543,49	7,5%	331,16	7,8%	147,83	5,3%	153,21	4,1%	74,91	1.250,59
Resíduos Perigosos	1,0%	70,58	0,6%	26,49	0,4%	7,58	0,4%	11,56	0,9%	16,44	132,66
Plástico	18,9%	1.334,01	14,1%	622,57	21,1%	399,90	24,3%	702,46	15,0%	274,05	3.333,00
Têxteis/ Sanitários	10,1%	712,89	9,1%	401,80	11,4%	216,06	22,2%	641,76	13,4%	244,82	2.217,33
Têxteis	6,6%	465,85	7,6%	335,57	4,2%	79,60	8,0%	231,26	4,0%	73,08	1.185,36
Vidro	1,0%	70,58	1,5%	66,23	0,4%	7,58	2,3%	66,49	0,7%	12,79	223,67
TOTAL	100%	7.058,28	100%	4.415,40	100%	1.895,28	100%	2.890,80	100%	1.827,00	18.086,76

Fonte: Autores, 2023

Tabela 16: Massa estimada dos resíduos plásticos gerados nos municípios em estudo em toneladas, com base na gravimetria obtida por meio de volume amostral.

Material	BONITO		AGRESTINA		BELÉM DE MARIA		ALTINHO		LAGOA DOS GATOS	
Plástico	100%	1334,0149	100%	622,5714	100%	399,90408	100%	702,4644	100%	274,05
Plástico Filme	36,4%	486,12	29,2%	182,04	31,5%	125,89	55,8%	391,83	37,6%	102,96
PET	11,8%	156,75	16,4%	102,35	9,4%	37,51	8,3%	58,02	9,9%	27,16
PEAD	14,6%	194,23	18,0%	112,31	14,6%	58,43	9,9%	69,40	11,6%	31,71
PEBD	9,5%	126,33	9,4%	58,52	8,2%	32,71	3,3%	22,83	6,9%	18,83
PP	21,1%	280,94	15,2%	94,44	17,7%	70,74	16,8%	117,73	21,1%	57,93
Outros	5,8%	76,97	9,3%	58,15	14,9%	59,55	5,8%	40,88	10,7%	29,30
PVC	0,9%	12,54	2,4%	14,75	3,8%	15,08	0,3%	1,76	2,3%	6,19

Fonte: Autores, 2023

Após a identificação e contabilização das massas de cada resíduo, foi dado início ao preenchimento da planilha correspondente à metodologia WARM.

A planilha da metodologia WARM apresenta um total de dez sessões, relacionadas a diferentes fontes de emissões potenciais, a serem preenchidas, com algumas delas contendo subtópicos devido a sua complexidade. A primeira seção aborda a delimitação de um cenário base, onde os principais dados de entrada a serem informados são as massas de cada material identificado nesse cenário, e suas respectivas destinações finais, inseridas no formato percentual, informação que, se tratando do cenário base, foi assumida como sendo 100% aterro sanitário.

A decisão de adotar integralmente o aterro sanitário como método de disposição final de resíduos resultou da combinação de dois principais motivos. O primeiro deles está relacionado à escassez de informações disponíveis sobre a gestão efetiva de resíduos no

consórcio COMAGSUL, como previamente mencionado. Essa falta de dados tornou inviável a adoção de uma abordagem segmentada para o cenário base, na qual diferentes frações de resíduos seriam destinadas à reciclagem.

O segundo motivo está diretamente ligado aos dados apresentados pelo Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR), conforme relatado no Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos referente ao ano de 2020 em Pernambuco. Esse relatório indicou que, em 2019, aproximadamente 2.500.000 toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) foram destinados a aterros sanitários ou lixões, enquanto apenas cerca de 7.500 toneladas desses resíduos foram encaminhadas para reciclagem no mesmo período (SINIR, 2020).

Ao calcular a porcentagem que a reciclagem representa em relação ao volume total destinado a aterros ou lixões, chegou-se a uma taxa de reciclagem de cerca de 0,3% para o estado de Pernambuco. Isso indicou que a opção de destinar 100% da massa de resíduos gerados a aterros sanitários era condizente com a realidade do estado em que o consórcio está localizado.

A metodologia WARM oferece um total de 61 materiais a serem considerados, agrupados em 11 categorias. No entanto, o preenchimento de todos os materiais não é obrigatório para o funcionamento pleno da ferramenta. Apenas os materiais relevantes para o estudo devem ser incluídos.

Considerando as categorias disponibilizadas e as limitações dos materiais fornecidos pelo estudo de referência, foram utilizadas apenas seis categorias na criação do cenário base: Papel, Podas de Jardim, Plásticos, Metais, Vidros e Outros Materiais. As categorias não utilizadas no estudo foram desconsideradas, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Materiais, identificados por Tipo de Material, utilizados na criação de um cenário base para a metodologia WARM.

Tipo de Material	Material	Utilizado no Estudo?
Papel	Corrugated Containers	Não
	Magazines/Third-class Mail	Não
	Newspaper	Não
	Office Paper	Não
	Phonebooks	Não
	Textbooks	Não

	Mixed Paper (general)	Sim
	Mixed Paper (primarily residential)	Não
	Mixed Paper (primarily from offices)	Não
Food Waste	Food Waste	Não
	Food Waste (non-meat)	Não
	Food Waste (meat only)	Não
	Beef	Não
	Poultry	Não
	Grains	Não
	Bread	Não
	Fruits and Vegetables	Não
	Dairy Products	Não
Yard Trimmings	Yard Trimmings	Sim
	Grass	Não
	Leaves	Não
	Branches	Sim
Mixed Plastics	HDPE	Sim
	LDPE	Sim
	PET	Sim
	LLDPE	Não
	PP	Sim
	PS	Não
	PVC	Sim
	Mixed Plastics	Sim
Bioplastics	PLA	Não
Electronics	Desktop CPUs	Não
	Portable Electronic Devices	Não
	Flat-Panel Displays	Não
	CRT Displays	Não
	Electronic Peripherals	Não
	Hard-Copy Devices	Não
	Mixed Electronics	Não

Metals	Aluminum Cans	Não
	Aluminum Ingot	Não
	Steel Cans	Não
	Copper Wire	Não
	Mixed Metals	Sim
Glass	Glass	Sim
Construction Materials	Asphalt Concrete	Não
	Asphalt Shingles	Não
	Carpet	Não
	Clay Bricks	Não
	Concrete	Não
	Dimensional Lumber	Não
	Drywall	Não
	Fiberglass Insulation	Não
	Fly Ash	Não
	Medium-density Fiberboard	Não
	Structural Steel	Não
	Vinyl Flooring	Não
	Wood Flooring	Não
Tires	Tires	Não
Mixed Materials	Mixed Recyclables	Sim
	Mixed Organics	Sim
	Mixed MSW	Sim

.Fonte: Autores, 2023

Uma vez que as categorias fundamentais para criação do cenário base foram identificadas, procedemos à associação dos materiais previamente identificados e contabilizados aos seus respectivos subtópicos da planilha Excel, informando também, os critérios adotados para inclusão das massas nas categorias em questão, como apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Compatibilização das tipologias de resíduos avaliadas na caracterização gravimétrica dos RSU do COMAGSUL e tipologias de dados de entrada da Metodologia WARM.

Materiais	Tipologia de resíduo presente na gravimetria dos resíduos do COMAGSUL	Tipologia de resíduo considerada para a Metodologia WARM	Critérios
Plásticos	Plástico Filme	PVC	Atualmente os plásticos filme são compostos basicamente por PVC, sendo assim, a massa foi alocada na subcategoria em questão (UNIVASF, 2019).
	PET	PET	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
	PEAD	HDPE	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
	PEBD	LDPE	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
	PP	PP	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
	PVC	PVC	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
	Outros	Mixed Plastics	Considerando que não há especificação sobre a composição do Input em questão, o mesmo foi alocado na subcategoria dos Mixed Plastics, uma vez que essa não possui composição específica.
Papel	Papel/Cartão	Mixed Paper (general)	Considerando que não há especificação sobre a composição do Input em questão, o mesmo foi alocado na subcategoria dos Mixed Papers (General), uma vez que essa não possui composição específica.
Podas de Jardim	Resíduos de Jardim	Yard Trimmings	Correspondem à mesma categoria de resíduos.
	Madeira/Coco	Branches	Considerando a composição do material, a categoria que mais se assemelha a sua composição é a tipologia “Branches”

			uma vez que ambos tratam de resíduos lignocelulósicos.
Metais	Metais	Mixed Metals	Considerando que não há especificação sobre a composição do Input em questão, o mesmo foi alocado na subcategoria dos Mixed Metals, uma vez que essa não possui composição específica.
Vidro	Vidro	Glass	Categorização do Input e da subcategoria são iguais.
Outros Materiais	Compósitos	Mixed Recyclables	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, o mesmo foi alocado como mixed recyclables uma vez que este pode ser reciclado.
	Bioresíduos	Mixed Organics	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, e sua composição orgânica, o mesmo foi alocado como mixed organics.
	Resíduos Perigosos	Mixed MSW	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, o mesmo foi alocado como mixed MSW, uma vez que não pode ser reciclado.
	Têxteis/Sanitários	Mixed Recyclables	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, o mesmo foi alocado como mixed recyclables uma vez que este pode ser reciclado.
	Têxteis	Mixed Recyclables	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, o

			mesmo foi alocado como mixed recyclables uma vez que este pode ser reciclado.
	Outros	Mixed MSW	Considerando que o material não possui correlação com nenhuma categoria adotada no cenário base, o mesmo foi alocado como mixed MSW, uma vez que não pode ser reciclado.

Fonte: Autores, 2023

Dessa forma, a alocação final das massas no cenário base pode ser visualizada na Tabela 19.

Tabela 19: Alocação final das massas utilizadas para cada material no cenário base.

Tipo de Material	Material	Massa (ton/ano)
Paper	Mixed Paper (general)	1.250,59
Yard Trimmings	Yard Trimmings	354,58
	Branches	1.098,99
Mixed Plastics	HDPE	466,08
	LDPE	259,22
	PET	381,79
	PP	621,80
	PVC	1.339,16
	Mixed Plastics	264,85
Metals	Mixed Metals	226,09
Glass	Glass	223,67
Mixed Materials	Mixed Recyclables	3.724,23
	Mixed Organics	5.455,41
	Mixed MSW	2.428,33

Fonte: Autores, 2023

Com a alocação das massas referentes ao cenário base concluída, é necessário que se realize a conversão dos valores obtidos em toneladas para toneladas americanas, também chamadas “*Short Tons*”, visto que a metodologia WARM considera essa medida para realização dos cálculos de emissões. Sendo assim, o processo de conversão consiste na multiplicação dos valores obtidos em toneladas por 1,10231, resultando nos valores apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Alocação final das massas convertidas para short tons utilizadas para cada material no cenário base.

Tipo de Material	Material	Massa (short ton/ano)
Paper	Mixed Paper (general)	1.378,54
Yard Trimmings	Yard Trimmings	390,86
	Branches	1.211,43
Mixed Plastics	HDPE	513,76
	LDPE	285,74
	PET	420,85
	PP	685,42
	PVC	1.476,17
	Mixed Plastics	291,95
Metals	Mixed Metals	249,22
Glass	Glass	246,55
Mixed Materials	Mixed Recyclables	4.105,26
	Mixed Organics	6.013,55
	Mixed MSW	2.676,77

Fonte: Autores, 2023

Após o processo de conversão e alocação apropriada dos dados de entrada na metodologia, a próxima etapa envolve o preenchimento das outras seções da planilha. No total, são oito seções adicionais, além do cenário simulado, que precisam ser preenchidas.

4.3.1.2. Caracterização da matriz energética:

A primeira seção a ser preenchida após a identificação das massas a serem alocadas no cenário base visa identificar o perfil da matriz energética do local em estudo. Essa etapa é fundamental para calcular as emissões relacionadas ao consumo de eletricidade ao longo do ciclo de vida dos materiais analisados. Portanto, o preenchimento desta seção requer a identificação do estado em que o local em estudo está situado, para que se possa selecionar uma entre as várias opções disponibilizadas pela metodologia. No entanto, os estados pré-disponibilizados correspondem aos estados nos Estados Unidos. Portanto, foi necessário encontrar o estado americano cuja composição da matriz energética se assemelha mais à do local em estudo.

De acordo com o SENAI - PE, a matriz energética do estado de Pernambuco, local em que se encontra o COMAGSUL, é composta principalmente por Usinas Termelétricas (43,00%), predominantemente movidas a Gás Natural, Usinas Hidrelétricas (31,00%) e fontes Eólicas (19,00%) (SENAI, 2022). A composição completa da matriz energética pode ser visualizada na Tabela 21.

Tabela 21: Empreendimentos em operação no estado de Pernambuco.

Tipo	Potência Outorgada em operação (KW)	Qtde.	Potência Outorgada em construção (KW)	Qtde.	Potência Outorgada em construção não iniciada (KW)	Qtde.
Central Geradora Hidrelétrica (CGH)	11.321,64	12	-	-	-	-
Pequena Central Hidrelétrica (PCH)	13.475,00	3	-	-	-	-
Usina Hidrelétrica (UHE)	1.479.600,00	1	-	-	-	-
Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV)	315.719,00	20	96.000,00	4	2.639.151,00	70
Central Geradora Eólica (EOL)	899.365,00	37	159.600,00	3	21.000,00	1
Usina Termelétrica (UTE)	2.077.880,00	70	12.000,00	1	-	-
TOTAL	4.797.360,64	143	267.600,00	8	2.660.151,00	71

Fonte: Aneel, 2022

Os Estados Unidos, por sua vez, possuem uma ampla variedade quanto à composição da matriz energética de seus estados. A composição das fontes de energia de cada estado americano pode ser visualizada na Tabela 22.

Tabela 22: Porcentagem da eletricidade líquida gerada dentro das fronteiras de cada estado em 2021.

Estado	Nuclear (%)	Carvão (%)	Gás Natural (%)	Petróleo (%)	H.E. (%)	Geotermal (%)	Solar (%)	Eólica (%)	Biomassa e Outras (%)
--------	-------------	------------	-----------------	--------------	----------	---------------	-----------	------------	-----------------------

Alabama	32,2	18,8	37,6	0,0	8,8	0,0	3,0	0,0	2,2
Alaska	0,0	13,7	41,0	14,9	27,7	0,0	0,0	2,1	6,0
Arizona	29,1	13,2	44,4	0,0	5,4	0,0	6,2	1,5	2,0
Arkansas	22,5	35,6	32,1	1,0	7,3	0,0	8,0	0,0	1,7
California	8,4	1,0	49,0	0,0	7,2	5,8	17,4	7,9	4,0
Colorado	0,0	41,6	25,5	0,0	2,8	0,0	3,1	26,5	4,0
Connecticut	39,0	6,0	55,6	2,0	7,0	0,0	7,0	0,0	3,2
Delaware	0,0	6,8	85,8	5,0	0,0	0,0	1,5	1,0	5,3
District of Columbia	0,0	0,0	62,5	0,0	0,0	0,0	11,9	0,0	25,5
Florida	11,5	7,5	73,9	5,0	1,0	0,0	3,7	0,0	2,8
Georgia	26,8	15,1	46,3	2,0	3,2	0,0	3,8	0,0	4,6
Hawaii	0,0	11.81	0,0	65,4	1,2	1,8	5,7	7,3	6,8
Idaho	0,0	1,0	26,0	0,0	51,0	5,0	3,3	15,7	3,3
Illinois	53,3	23,9	11,6	0,0	1,0	0,0	3,0	10,3	5,0
Indiana	0,0	57,7	29,5	1,0	3,0	0,0	7,0	8,4	3,3
Iowa	0,0	33,5	9,0	1,0	1,4	0,0	3,0	55,3	3,0
Kansas	15,1	34,2	5,1	2,0	1,0	0,0	1,0	45,2	1,0
Kentucky	0,0	0,7	21,0	1,0	7,5	0,0	1,0	0,0	6,0
Louisiana	17,6	8,0	64,8	4,0	1,2	0,0	2,0	0,0	4,2
Maine	0,0	6,0	24,7	4,0	27,1	0,0	1,6	23,3	22,3
Maryland	37,7	14,7	37,1	2,0	5,3	0,0	1,7	1,3	1,9
Massachusetts	0,0	0,0	76,9	4,0	2,0	0,0	9,2	1,1	10,3
Michigan	29,6	31,9	26,6	1,0	7,0	0,0	4,0	6,7	3,1
Minnesota	23,7	26,5	20,6	1,0	1,5	0,0	3,2	21,7	2,7
Mississippi	17,1	8,0	72,1	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	2,1
Missouri	5,5	74,4	8,7	2,0	2,4	0,0	2,0	8,5	2,0
Montana	0,0	43,2	2,0	1,8	40,0	0,0	1,0	11,5	1,3

Nebraska	17,8	49,2	4,1	1,0	3,3	0,0	1,0	25,2	2,0
Nevada	0,0	6,6	62,5	0,0	4,7	9,4	15,9	8,0	2,0
New Hampshire	56,5	1,6	25,6	4,0	6,7	0,0	0,0	2,9	6,2
New Jersey	45,8	1,7	47,8	1,0	0,0	0,0	2,5	0,0	2,3
New Mexico	0,0	35,5	28,4	1,0	5,0	1,0	5,0	30,2	1,0
New York	24,9	0,0	45,6	7,0	22,0	0,0	1,0	3,5	2,3
North Carolina	32,8	15,5	35,9	1,0	5,8	0,0	7,6	4,0	1,8
North Dakota	0,0	57,1	3,4	1,0	5,2	0,0	0,0	34,1	2,0
Ohio	14,2	37,1	43,9	8,0	3,0	0,0	5,0	2,1	1,1
Oklahoma	0,0	14,0	40,8	0,0	3,3	0,0	1,0	41,4	4,0
Oregon	0,0	0,0	33,3	0,0	46,4	3,0	2,5	15,7	1,7
Pennsylvania	31,4	12,1	52,7	1,0	8,0	0,0	1,0	1,5	1,4
Rhode Island	0,0	0,0	90,9	1,0	1,0	0,0	4,2	2,2	2,5
South Carolina	53,8	15,2	23,3	1,0	3,0	0,0	2,3	0,0	2,4
South Dakota	0,0	9,2	8,7	1,0	29,7	0,0	0,0	52,3	1,0
Tennessee	43,4	22,4	17,8	1,0	15,1	0,0	4,0	1,0	8,0
Texas	8,3	18,4	48,6	0,0	2,0	0,0	2,9	20,7	9,0
Utah	0,0	61,8	24,7	1,0	1,8	8,0	8,1	1,9	6,0
Vermont	0,0	0,0	1,0	2,0	50,0	0,0	8,8	15,7	25,2
Virginia	30,3	3,3	57,4	3,0	8,0	0,0	3,6	1,0	4,2
Washington	7,8	2,9	14,4	0,0	64,6	0,0	0,0	8,7	1,6
West Virginia	0,0	90,8	4,1	3,0	2,3	0,0	0,0	2,5	1,0
Wisconsin	15,2	41,9	33,9	3,0	3,8	0,0	6,0	2,5	1,8
Wyoming	0,0	73,3	3,5	1,0	2,3	0,0	4,0	19,4	1,0

Fonte: NEI, 2021

Ao comparar a matriz energética de Pernambuco com a matriz de cada estado americano, identificamos que o estado que mais se assemelha à realidade Pernambucana é o Alaska, com uma composição energética de 41% de energia proveniente do Gás Natural e

27,7% de Usinas Hidrelétricas, sendo esse o estado selecionado para simulação da matriz energética.

4.3.1.3. Composição da Matéria-prima:

É necessário especificar se os materiais inseridos na calculadora são uma mistura de materiais virgens e reciclados, ou se são exclusivamente materiais 100% virgens. A importância desta seção está no fato de que, a adoção de materiais 100% virgens proporciona um potencial maior de emissões quando comparado a adoção de misturas de materiais virgens e reciclados, dessa forma, tal aspecto apresenta potencial para influenciar os resultados finais, validando assim a necessidade de sua caracterização. Sendo assim, dado o cenário predominante no Brasil, onde a produção de materiais frequentemente se baseia em matérias-primas virgens, optou-se por utilizar o cenário de materiais 100% virgens.

4.3.1.4. **Captação e aproveitamento dos gases gerados no aterro:**

Nas seções seguintes, são tratados os dados referentes à captura e possível reutilização dos gases gerados no aterro sanitário devido à degradação dos resíduos ali depositados. Inicialmente, é importante determinar se no aterro sanitário em análise ocorre a captura desses gases. Considerando que não foi possível localizar dados específicos para o aterro COMAGSUL que caracterizem a captura ou não dos gases gerados, o estudo se baseou em um cenário com um aterro sanitário, dessa forma, idealmente, esse cenário deve incluir um sistema de captura de gases, tornando a opção "LFG Recovery" a mais apropriada.

Uma vez estabelecido que a captação dos gases do aterro sanitário é realizada, é necessário determinar o destino desses gases. As opções disponíveis incluem a queima dos gases por meio de um dispositivo de *Flare* ou a recuperação dos gases para fins energéticos. Dessa forma, dado o tamanho reduzido do aterro sanitário no estudo, devido às dimensões dos municípios e à quantidade de resíduos gerados ao longo do ano, a queima dos gases por *Flare* se mostrou a opção mais alinhada com a realidade brasileira, tornando-a a escolha mais adequada dentro do cenário em análise.

Por fim, em relação à coleta dos gases no aterro, é necessário determinar a eficiência dessa coleta, com quatro opções disponíveis. A primeira opção representa a eficiência média de coleta nos Estados Unidos, denominada "Operação Típica - Padrão". As outras duas

opções, "Coleta no Pior Cenário" e "Coleta Agressiva de Gases", representam cenários com eficiência de coleta abaixo e acima da média nacional, respectivamente. Além disso, é oferecida uma quarta opção, baseada nos requisitos regulatórios da Califórnia.

Optou-se por escolher o "Operação Típica - Padrão" como uma abordagem mais conservadora, evitando superestimar ou subestimar o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa resultantes do processo de reciclagem.

Vale ressaltar que o aterro em estudo apresenta uma baixa geração de gases, visto a baixa umidade do local, sendo assim, a adoção de padrões nacionais não deve acarretar em grandes variações quanto a obtenção do resultado final (MELO, 2015).

4.3.1.5. Condições de Umidade:

É fundamental determinar as condições de umidade no local em estudo. A condição de umidade é representada pela variável "K," que, por sua vez, corresponde à precipitação total anual em polegadas no local onde se encontra o aterro em análise. A identificação da umidade no local do aterro se mostra importante uma vez que tal variável possui o potencial de influenciar na velocidade com que os materiais orgânicos serão degradados, o que consequentemente impacta nas emissões de GEE.

De acordo com o estudo utilizado como base para preencher os dados na metodologia em questão, o município que abriga o aterro sanitário, responsável pelo descarte de resíduos dos cinco municípios, é a cidade de Altinho. Portanto, o valor anual de precipitação a ser identificado corresponde a essa localidade.

A obtenção dos dados de precipitação foi uma tarefa relativamente simples, já que essas informações já estavam definidas no estudo de referência. No entanto, com o objetivo de obter dados mais precisos e dentro do período de um ano, optou-se por buscar fontes adicionais. Os valores de precipitação podem ser verificados na Tabela 23.

Tabela 23: Dados de Climatologia Média Mensal para o município de Altinho, considerando série histórica com mais de 30 anos de dados observados.

Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Altinho	32	45	72	91	84	95	88	46	24	11	12	22	622

Fonte: APAC, 2023

Após mapear os dados de precipitação, procedeu-se à soma de todos os valores contidos na tabela, uma vez que a metodologia considera a medida anual. Portanto, a precipitação anual, calculada a partir da média dos dados de precipitação dos últimos 30 anos, totalizou cerca de 622 mm, o que equivale a aproximadamente 24,5 polegadas de chuva por ano.

Portanto, o valor de precipitação obtido indica um nível de umidade "moderado". Isso se deve ao fato de que as 24,5 polegadas de chuva anual se traduzem em um valor de "K" de 0,04.

4.3.1.6. Digestão em Reatores:

Este tópico visa a contabilização das emissões relacionadas ao processo de digestão anaeróbia usando reatores. Portanto, o preenchimento dos inputs envolve a descrição dos reatores utilizados e das práticas de gerenciamento dos materiais resultantes desse processo.

Porém, uma vez que o foco do estudo está estritamente na medição das reduções das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) relacionadas às práticas de reciclagem, o preenchimento ou a ausência de preenchimento desta seção não afeta de forma alguma os resultados finais da metodologia. Isso ocorre porque nenhum valor de massa foi alocado para a digestão em reator.

4.3.1.7. Transporte de Resíduos:

Dado o cenário de geração de resíduos em larga escala, surge a necessidade imperativa de coletar e dispor desses materiais em locais apropriados. Para esse fim, uma variedade de métodos de coleta é empregada, sendo o mais significativo o uso de caminhões. No entanto, o funcionamento desses veículos requer o consumo de combustíveis fósseis, o que introduz emissões relacionadas à queima desses combustíveis na cadeia de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) associada à gestão de resíduos sólidos urbanos.

Portanto, esta seção visa contabilizar as emissões decorrentes do transporte dos resíduos até seu destino final, com base na distância média entre o aterro e os pontos de coleta. Existem duas opções de entrada para considerar. A primeira opção, denominada "Utilizar Distâncias Padrão", assume valores predefinidos para a distância entre o aterro e os pontos de coleta, que equivalem a aproximadamente 20 milhas, ou cerca de 32 quilômetros.

Por outro lado, a segunda opção permite que você insira manualmente as distâncias a serem consideradas.

Nesse contexto, dado que as distâncias médias entre o aterro sanitário e os municípios estão disponíveis no estudo usado como fonte de dados e com o objetivo de obter resultados mais fiéis à realidade, optou-se pela inserção manual dos dados de distância. Os valores correspondentes à distância entre o aterro e o centro gerador de resíduos de cada município podem ser consultados na Tabela 24.

Tabela 24: Distância do centro de geração ao aterro sanitário (km).

Município	Distância média (Km)
Agrestina	7,2 Km
Altinho	5,0 Km
Belém de Maria	26,0 Km
Bonito	30,0 Km
Lagoa dos Gatos	24,0 Km

Fonte: MELO, 2015

A distância média entre os cinco municípios que estão sendo avaliados na metodologia, uma vez que eles estão sendo tratados como uma única localidade, foi calculada como a média aritmética simples das distâncias individuais de cada município até o aterro sanitário.

A distância média entre o aterro e a região equivalente é de 18,44 km, aproximadamente 11,46 milhas de distância. Agora, com a distância determinada, é fundamental alocar esses valores nos locais correspondentes indicados pela metodologia, uma vez que os locais para inserção das distâncias variam dependendo da opção de destinação dos resíduos, como demonstrado na Tabela 25.

Tabela 25: Distâncias, em milhas, aplicadas na metodologia WARM.

Management Option	Default Distance (Miles)	Distance (Miles)
Landfill	20	11,46
Combustion	20	
Recycling	20	11,46
Composting	20	
Anaerobic Digestion	20	

Fonte: Autores, 2023

Portanto, dado que a análise se concentra exclusivamente nos cenários relacionados à disposição em aterros sanitários e reciclagem, foram levadas em consideração apenas as distâncias associadas a essas duas opções. Nesse contexto, optou-se por atribuir a mesma distância calculada para ambas as alternativas, ou seja, tanto para aterros sanitários quanto para reciclagem.

A igualdade na delimitação da distância até o ponto de reciclagem e até o ponto de aterro sanitário baseia-se em dois motivos fundamentais. O primeiro motivo considera a indisponibilidade de dados relacionados à reciclagem no consórcio, como mencionado anteriormente. Como resultado, não foi possível identificar informações sobre a localização de pontos de reciclagem.

O segundo motivo leva em consideração o enfoque principal do estudo, que está na redução das emissões associadas ao processo de reciclagem em si. As emissões vinculadas à coleta e ao transporte dos materiais não são o foco central da pesquisa, embora ainda devam ser consideradas. Portanto, com o intuito de levar em conta essas emissões e evitar favorecer um dos cenários com uma localização mais próxima ou mais distante do ponto de reciclagem, decidiu-se manter ambos os pontos na mesma localidade.

4.4. Cenários Alternativos

Uma das funcionalidades da metodologia WARM concentra-se na simulação de diversos cenários de gestão de resíduos sólidos, como apresentado anteriormente, permitindo, posteriormente, uma análise comparativa com o objetivo principal de evidenciar o impacto de cada cenário simulado nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dada essa premissa e considerando que o cenário base já foi previamente definido na seção "Delimitação de Cenário Base", torna-se imperativa a delimitação de um segundo cenário que introduza alternativas de gerenciamento de resíduos sólidos. A finalidade deste segundo cenário é

possibilitar a contabilização e subsequente análise dos efeitos dessas diferentes abordagens no que diz respeito às emissões de GEE.

Para delinear esse novo cenário, foram estabelecidos valores de massa a serem considerados para cada uma das distintas opções de gerenciamento. No entanto, uma vez que o foco deste estudo está na avaliação do impacto da reciclagem na redução das emissões de GEE, todas as opções de gerenciamento, com exceção da reciclagem e do aterro, foram desconsideradas. Consequentemente, foram definidos quatro cenários alternativos com base no desempenho observado em diferentes países, considerando a porcentagem de resíduos direcionados para a reciclagem. Cada país/cenário representa um nível de desempenho diferente, com base em sua capacidade percentual de reciclagem total de resíduos sólidos e também na extensão da reciclagem individualmente para cada tipologia de resíduo.

Portanto, uma vez que os cenários a serem abordados na etapa de simulação foram definidos, tornou-se crucial localizar e tratar os dados relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de cada país selecionado, de modo que eles se ajustem aos parâmetros estabelecidos pela metodologia. No final da coleta de dados, a expectativa é identificar as proporções de massa destinadas ao processo de reciclagem para cada um dos resíduos considerados no cenário base. Para isso, as fontes de dados utilizadas foram relatórios oficiais de resíduos sólidos emitidos pelos órgãos governamentais de cada um dos países em questão.

4.4.1. Coleta de dados para o cenário Brasil - Ruim:

O processo de coleta de dados para a criação da simulação do cenário brasileiro em relação ao seu perfil de gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) revelou-se extremamente desafiador. A maior parte dos esforços necessários para concluir essa etapa está associada à busca por relatórios que disponibilizassem os dados desejados de forma minimamente compatível com as exigências da metodologia em estudo. Na maioria dos documentos encontrados, os valores disponibilizados tratavam de classificações de resíduos que não eram pertinentes, ou seja, abordavam outros tipos de resíduos que não os RSU.

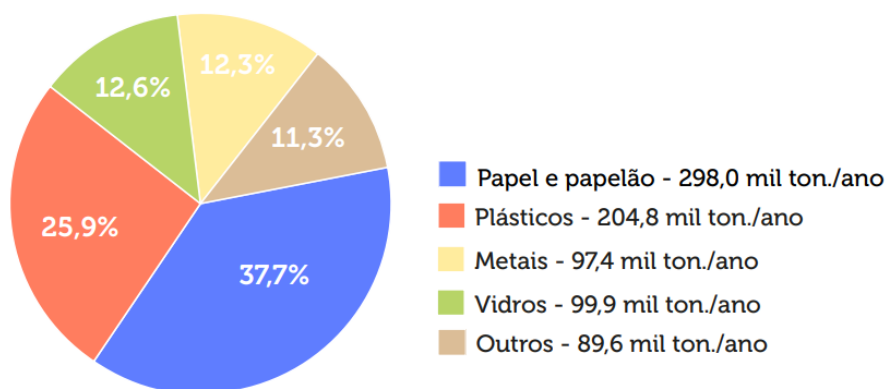
No entanto, foram identificados dois relatórios que, quando combinados, permitiram dar continuidade ao processo de simulação do cenário de gerenciamento de RSU no Brasil. Esses documentos são da autoria do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). O relatório do SNIS, denominado “Diagnóstico Temático - Manejo de Resíduos

Sólidos Urbanos” apresenta uma visão geral do gerenciamento de RSU no Brasil em 2020 (SNIS, 2021), enquanto os dados disponibilizados pela ABRELPE no relatório “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020” oferecem um panorama dos resíduos sólidos em geral no país no mesmo ano (ABRELPE, 2021).

Com as fontes de dados estabelecidas como base de estudo, pudemos coletar os dados a serem aplicados na metodologia. De acordo com o relatório da SNIS, a massa total de RSU coletada no Brasil ao longo de 2020 foi de aproximadamente 66,64 milhões de toneladas, das quais apenas 1,07 milhões de toneladas correspondem a resíduos secos destinados à reciclagem (SNIS, 2021).

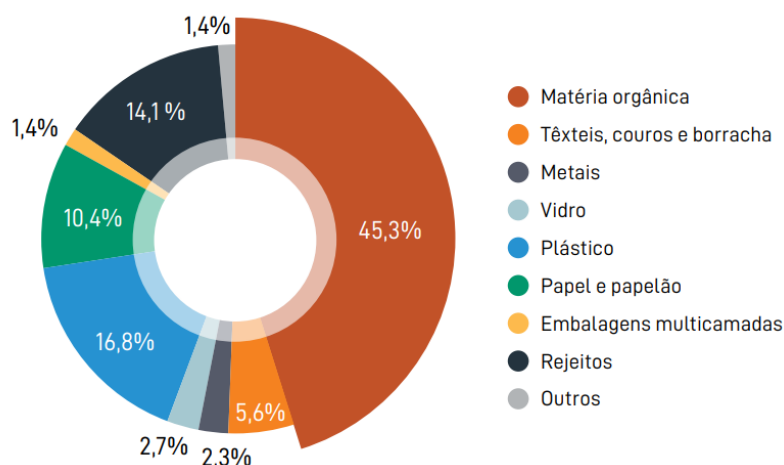
Com as massas totais de resíduos coletados e reciclados delimitadas se mostra necessário a identificação das frações de RSU geradas para cada uma das categorias de materiais abordadas no cenário base dentro de cada um desses valores. Dessa forma, utilizou-se as Figuras 8 e 9 como base para delimitação dessas frações.

Figura 8: Gravimetria dos RSU reciclados no Brasil.



Fonte: SNIS, 2022

Figura 9: Gravimetria dos RSU no Brasil



Fonte: ABRELPE, 2020

O processo de determinação das frações a serem usadas na simulação revelou-se relativamente simples, envolvendo apenas alguns cálculos para tornar os valores adequados para aplicação. Inicialmente, foi necessário estabelecer uma correlação entre as categorias de resíduos apresentadas nas Figura 8 e 9. Como a Figura 8, que representa as frações recicladas, possui um menor detalhamento quanto às suas categorias de resíduos e não pode ser adaptado de forma a torná-lo mais complexo para corresponder exatamente às categorias apresentadas na Figura 9, optamos por simplificar as categorias deste último. As adaptações realizadas e os critérios adotados podem ser visualizados na Tabela 26.

Tabela 26: Adaptações realizadas para padronização dos materiais apresentados pela ABRELPE e SNIS.

Material Inicial	Material Pós-Adaptação	Crítérios para Adaptação
Metais	Metais	Não houve necessidade de adaptação.
Vidros	Vidros	Não houve necessidade de adaptação.
Papel e Papelão	Papel e Papelão	Não houve necessidade de adaptação.
Plástico	Plástico	Não houve necessidade de adaptação.
Embalagens Multicamadas	Outros	Devido a sua composição complexa, as embalagens multicamadas foram englobadas na categoria “outros”.
Têxteis, couros e borrachas	NA	NA
Outros	Outros	Não houve necessidade de

		adaptação.
Matéria Orgânica	NA	NA
Rejeitos	NA	NA

Fonte: Autores, 2023

Com base nos dados apresentados, observa-se que diversos materiais não puderam ser associados a uma nova categoria específica de resíduos, a saber, "Matéria Orgânica", "Rejeitos", "Têxteis, Couros e Borrachas" e "Embalagens Multicamadas". Com exceção das "Embalagens Multicamadas", que foram associadas a uma categoria generalista, esses materiais não receberam uma categoria específica devido à sua não-reciclabilidade ou à ausência de inclusão no cenário base anteriormente estabelecido, o que tornou desnecessária a adaptação.

No caso das "Embalagens Multicamadas", sua associação à categoria "Outros" é justificada pela complexidade estrutural desse material, que é composto por mais de um tipo de material. Para evitar o descarte desse resíduo e, assim, promover maior fidelidade ao cenário Brasileiro, optou-se por alocar a massa desse resíduo na categoria "Outros". Isso resultou em um aumento significativo na representatividade da categoria "Outros," que agora corresponde a 2,8% do total de resíduos, o dobro do valor inicial.

Com as novas porcentagens calculadas para a Figura 8 aplicadas à massa total de RSU coletada e as porcentagens da Figura 9 ao montante destinado à reciclagem, foi possível determinar as massas totais coletadas e recicladas para cada uma das categorias de resíduos apresentadas nos gráficos. Por fim, calculou-se a representatividade percentual dos valores reciclados de cada resíduo em relação ao valor total previamente calculado para cada categoria de resíduo. Os resultados desse processo podem ser observados na Tabela 27.

Tabela 27: Consolidação dos dados percentuais de reciclagem a serem utilizados para o cenário Brasileiro.

Material	Total Coletado (MTons)	Total Reciclado (MTons)	Total Reciclado
Papel	6,90	0,30	4,35%
Plástico	11,20	0,20	1,78%
Vidro	1,80	0,10	5,55%
Metal	1,50	0,10	6,66%
Outros	1,90	0,09	4,73%

Matéria Orgânica	30,20	-	-
Rejeitos	9,40	-	-
Têxteis, Couros e Borrachas	3,73	-	-

Fonte: Autores, 2023

Uma vez que as percentagens de reciclagem necessárias para a eficaz execução da metodologia foram identificadas, é essencial converter esses valores percentuais em suas respectivas massas. Para realizar essa conversão, aplicamos as porcentagens obtidas anteriormente aos valores considerados no cenário base, apresentados na Tabela x. Portanto, o preenchimento dos dados pode ser categorizado em quatro grupos distintos, considerando os resultados e os métodos de preenchimento.

A primeira categoria aborda materiais cuja massa total foi destinada ao aterro sanitário, tanto no cenário base quanto no cenário alternativo, devido à natureza do material ou a limitação da metodologia. Nesse sentido, não foi necessária a aplicação de valores de reciclagem.

A segunda categoria trata de materiais que, no cenário base, tiveram suas massas completamente direcionadas ao aterro sanitário. No entanto, no cenário alternativo, uma parte desse valor foi alocada para o processo de reciclagem. É importante destacar que para esta categoria não houve necessidade de adaptação de nenhum valor, associando diretamente os valores coletados nos relatórios fonte às categorias preenchidas no cenário base.

A terceira categoria assemelha-se à categoria anterior no que diz respeito à divisão das massas entre aterro e reciclagem no cenário alternativo. No entanto, ao contrário do caso anterior, algumas adaptações foram necessárias para criar uma associação entre os dados coletados para o cenário alternativo e o cenário base. Essas adaptações serão detalhadas na seção apropriada.

Por fim, a última categoria engloba materiais que requerem adaptações mais complexas para sua correta inclusão na metodologia, variando de material para material. Essa última categoria não necessariamente se aplica ao cenário Brasileiro, mas será recorrente nos cenários que serão abordados no futuro.

4.4.1.1. **Categoria 1: Materiais não reciclados.**

Dentro dos materiais considerados na metodologia para o cenário base, quatro categorias mantiveram suas massas inalteradas no cenário Brasileiro. As categorias que permaneceram sem modificações são "*Yard Trimmings*", "*Branches*", "*Mixed Organics*" e "*Mixed MSW*".

A razão pela qual essas categorias mantiveram suas massas inalteradas pode ser explicada de duas maneiras distintas. No caso das categorias "*Yard Trimmings*", "*Branches*" e "*Mixed Organics*", a ausência de variação nas massas destinadas aos aterros sanitários ocorreu devido à não inclusão da reciclagem de resíduos orgânicos no escopo do trabalho em questão. Portanto, optou-se por manter o volume integral do cenário base no cenário alternativo.

Por outro lado, para a categoria restante, a preservação das massas ocorreu porque a metodologia não permite a inclusão de volume reciclado para os "*Mixed MSW*". Isso indica uma possível limitação na metodologia utilizada.

4.4.1.2. **Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária**

Os materiais que se enquadram na categoria 2, de acordo com os critérios estabelecidos anteriormente, totalizam quatro tipos: "Papel", "Vidro", "Metais", e, por último, "*Mixed Recyclables*". A determinação das frações recicladas para esses materiais foi alcançada simplesmente adotando as porcentagens previamente calculadas para as categorias de igual nome, com exceção dos "*Mixed Recyclables*", para os quais a fração reciclada foi equivalente àquela dos materiais da categoria "Outros", conforme anteriormente apresentada.

4.4.1.3. **Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária**

Se tratando da terceira categoria, apenas um material foi adaptado para que pudesse ser incluído na metodologia, sendo esse os materiais plásticos. A necessidade por adaptação se deu pelo fato de que a forma com que os plásticos estão tipificados no cenário base não condiz com o molde apresentado pelo relatório do SNIS.

De forma mais detalhada, no cenário base os materiais plásticos passaram por um alto nível de detalhamento, o qual foi capaz de segregar esse tipo de resíduo em sete subcategorias, porém, por conta da escassez de informações significativas para simulação de um cenário alternativo, os dados utilizados para tal incluíam apenas a categoria plásticos de forma generalista. Sendo assim, visando solucionar tal problemática, optou-se por somar todas as massas das subcategorias criando uma única categoria, sendo essa a dos *mixed plastics*.

Dessa forma, com a criação de uma relação 1 para 1 entre ambos os cenários, foi possível aplicar a massa reciclada identificada sobre o valor adaptado. O resultado final da criação do cenário alternativo pode ser observado na Tabela 28.

Tabela 28: Massas referentes ao cenário Brasileiro finalizadas.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Brasil)	
	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Reciclada (ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.250,59	1.196,19	54,40
Yard Trimmings	354,58	354,58	0
Branches	1.098,99	1.098,99	0
Plastic - Mixed Plastics	3.332,90	3.273,57	59,33
Mixed Metals	226,09	211,03	15,06
Glass	223,67	211,26	12,41
Mixed Recyclables	3.724,23	3.548,07	176,16
Mixed Organics	5.455,41	5.455,41	0
Mixed MSW	2.428,33	2.428,33	0

Fonte: Autores, 2023

Por fim, assim como realizado para o cenário base, é necessário converter os valores obtidos em toneladas para *short tons*. Dessa forma, os valores convertidos podem ser visualizados na Tabela 29.

Tabela 29: Massas referentes ao cenário Brasileiro convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Brasil)
----------	--------------	------------------------------

	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Reciclada (short ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.378,54	1.318,57	59,97
Yard Trimmings	390,86	390,86	0
Branches	1.211,43	1.211,43	0
Plastic - Mixed Plastics	3.673,89	3.608,49	65,40
Mixed Metals	249,22	232,62	16,60
Glass	246,55	232,87	13,68
Mixed Recyclables	4.105,26	3.911,08	194,18
Mixed Organics	6.013,55	6.013,55	0
Mixed MSW	2.676,77	2.676,77	0

Fonte: Autores, 2023

4.4.2. Coleta de dados para o cenário EUA - Médio:

No contexto dos Estados Unidos, a responsabilidade de fornecer informações sobre a geração e a gestão de resíduos sólidos urbanos recai sobre a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). Esta agência desempenha um papel crucial, não apenas na elaboração da metodologia em estudo, mas também na disponibilização de dados confiáveis. Para construir o cenário base que reflete a realidade americana, recorreu-se aos dados apresentados no relatório "*Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Tables and Figures*", referente ao ano de 2020, divulgado pela EPA (EPA, 2020).

Após uma análise minuciosa do material disponibilizado pela EPA, ficou evidente que os dados contidos neste relatório demonstraram um alto grau de detalhamento. Eles categorizaram adequadamente os materiais, alinhando-se com os tipos de resíduos considerados no cenário base. Isso resultou em uma redução significativa na quantidade de correções necessárias para aplicar a metodologia, quando comparada aos dados apresentados no relatório utilizado para o cenário brasileiro. Os dados específicos sobre reciclagem podem ser consultados nas Tabelas 30 e 31.

Tabela 30: Porcentagem reciclada de cada material nos EUA no ano de 2018.

Materials	Percent of Generation of Each Material									
	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2015	2017	2018
Recycled										
Paper and Paperboard	16.9%	15.3%	21.3%	27.8%	42.8%	49.5%	62.5%	66.6%	65.9%	68.2%
Glass	1.5%	1.3%	5.0%	20.1%	22.6%	20.7%	27.2%	27.8%	25.0%	25.0%
Metals										
Ferrous	0.5%	1.2%	2.9%	17.6%	33.1%	33.0%	34.3%	33.4%	32.7%	33.1%
Aluminum	Neg.	1.3%	17.9%	35.9%	27.0%	20.7%	19.4%	18.3%	15.7%	17.2%
Other Nonferrous	Neg.	47.8%	46.6%	66.4%	66.3%	68.8%	71.3%	64.2%	68.1%	67.3%
Total Metals	0.5%	3.5%	7.9%	24.0%	34.8%	34.3%	35.3%	33.6%	33.6%	34.1%
Plastics	Neg.	Neg.	0.3%	2.2%	5.8%	6.1%	8.0%	9.0%	8.5%	8.7%
Rubber and Leather	17.9%	8.4%	3.1%	6.4%	12.3%	14.4%	18.6%	18.1%	18.3%	18.2%
Textiles	2.8%	2.9%	6.3%	11.4%	13.9%	15.9%	15.5%	15.3%	15.2%	14.7%
Wood	Neg.	Neg.	Neg.	1.1%	10.1%	12.4%	14.5%	16.3%	16.6%	17.1%
Other **	Neg.	39.0%	19.8%	21.3%	24.5%	28.2%	29.1%	25.2%	21.4%	21.3%
Total Materials in Products – recycled	10.3%	9.6%	13.3%	19.8%	29.7%	32.0%	36.6%	36.8%	35.5%	36.4%

Fonte: EPA, 2020

Tabela 31: Porcentagem reciclada de cada subcategoria de plástico nos EUA no ano de 2018.

Product Category	Generation	Recycled *		Combusted with energy Recovery	Landfilled
	(Thousand tons)	(Thousand tons)	(Percent of generation)	(Thousand tons)	(Thousand tons)
Total Plastics in MSW, by resin					
PET	5,290	980	18.5%		
HDPE	6,300	560	8.9%		
PVC	840	Neg.			
LDPE/LLDPE	8,590	370	4.3%		
PLA	90	Neg.			
PP	8,150	50	0.6%		
PS	2,260	20	0.9%		
Other resins	4,160	1,110	26.7%		
Total Plastics in MSW	35,680	3,090	8.7%	5,620	26,970

Fonte: EPA, 2020

Assim, uma vez que as porcentagens de reciclagem para cada material considerado na metodologia foram identificadas, tornou-se possível avaliar esses dados, adaptá-los, se necessário, e aplicá-los na criação do cenário alternativo que representa o perfil de reciclagem dos Estados Unidos. A inserção dos dados de entrada no cenário alternativo seguiu um processo semelhante ao cenário anterior, utilizando uma classificação que distingue as diferentes maneiras de aplicar os inputs, com ênfase nas variações de resultados e métodos de aplicação.

4.4.2.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.

Da mesma forma que no cenário denominado "Ruim", algumas categorias mantiveram suas massas intactas no cenário alternativo devido à ausência de reciclagem para

essas categorias. Portanto, as categorias que permaneceram inalteradas são as mesmas do cenário brasileiro, com a adição de um novo material, sendo elas: "*Yard Trimmings*", "*Branches*", a subcategoria de plásticos "PVC", "*Mixed Organics*", e "*Mixed MSW*".

A inclusão do PVC nessa categoria e exclusão do mesmo material no cenário anterior se deve a dois fatores. O primeiro fator é o fato deste material não ser considerado no cenário Brasileiro individualmente, tendo sua massa considerada como sendo *mixed plastics*. Já o segundo fator está relacionado ao fato de o PVC não ter nenhuma massa contabilizada como sendo reciclada no cenário americano.

Uma vez que os motivos para a preservação das massas das outras categorias mencionadas anteriormente são idênticos aos explicados no cenário anterior, não é necessário fornecer detalhes adicionais para o cenário atual.

4.4.2.2. **Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária**

Da mesma forma que no cenário brasileiro, os materiais abordados na categoria 2 do cenário mediano foram fracionados no processo de preenchimento do cenário alternativo, com o objetivo de separar a fração destinada ao aterro da fração destinada à reciclagem. Além disso, no cenário americano, uma variedade maior de materiais pode ser alocada na categoria em questão. Isso pode ser atribuído ao fato de que tanto o relatório utilizado na coleta de dados para a criação do cenário alternativo quanto a própria metodologia pertencem à mesma organização, o que justifica as semelhanças na forma de subdivisão dos materiais.

É importante destacar que, da mesma forma que na categoria 2 do cenário anterior, considerou-se a necessidade de adaptação ou não na subdivisão dos materiais para sua aplicação na metodologia, a fim de adequar os inputs do cenário alternativo ao cenário base. Portanto, os materiais que se enquadram nas delimitações da categoria 2 totalizam 8 tipos de resíduos:

- "*Paper and Paperboard*" foi alocado como "*Mixed Papers*".
- As subcategorias de plásticos "PET", "HDPE" e "PPs" foram inseridas nas categorias com nomes correspondentes.
- A subcategoria de plásticos chamada "*Other Resins*" foi alocada como "*Mixed Plastics*".
- A categoria "*Glass*" foi imputada como "Vidro".

- A categoria dos "*Metals*", que engloba todos os metais reciclados, foi inserida no cenário alternativo como "*Mixed Metals*".
- Por fim, os "*Mixed Recyclables*" tiveram sua metodologia de contabilização da fração reciclada definida da mesma forma que no cenário "Ruim", atribuindo a porcentagem de reciclagem total nacional, que equivale a 36,4%.

4.4.2.3. **Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária**

No que se refere aos materiais incluídos na categoria 3, os resíduos que passaram por adaptação são os seguintes: "*Rubber and Leather*", "*Textiles*", "*Wood*", e as subcategorias dos materiais plásticos "LDPE" (Polietileno de Baixa Densidade), "PLA" e "PS."

Cinco desses materiais não tiveram seus valores de reciclagem contabilizados no cenário alternativo. A exceção foi o "LDPE". As razões para a exclusão desses materiais variam:

- "*Rubber and Leather*", "*Textiles*" e "PS" não foram incluídos no cenário alternativo devido ao fato de o cenário base não considerar a geração desses resíduos. Portanto, devido ao balanço de massa exigido pela metodologia, não foi viável considerar as massas desses materiais.
- O "PLA" foi excluído do cenário alternativo devido a uma limitação da metodologia, que não considera esse material ao subdividir os diferentes resíduos plásticos.
- No caso do "*Wood*", a exclusão de sua massa reciclada do modelo simulado ocorreu porque a reciclagem de matéria orgânica não é o foco do estudo, uma vez que não segue os padrões de reciclagem que estão sendo avaliados.

Quanto ao "LDPE," as adaptações aplicadas são as mesmas consideradas no cenário ruim, ou seja, uma vez que a metodologia não permite a reciclagem desse material, e visando minimizar o impacto nos resultados obtidos após a aplicação da metodologia, as massas recicladas de Polietileno de Baixa Densidade foram alocadas na categoria de materiais reduzidos, resultando em uma diminuição na produção de plásticos derivados do LDPE.

Assim, após as adaptações necessárias para a criação do cenário alternativo e a inserção dos inputs finais, considerando o devido balanço de massa, os dados dos cenários base e alternativo podem ser vistos na Tabela 32.

Tabela 32: Massas referentes ao cenário Americano da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (EUA)		
	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Reciclada (ton/ano)	Massa Reduzida (ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.250,59	397,69	852,90	0
Yard Trimmings	354,58	354,58	0	0
Branches	1.098,99	1.098,99	0	0
Plastic - HDPE	466,08	424,60	41,48	
Plastic - LDPE	259,22	248,07	0	11,15
Plastic - PET	381,79	311,17	70,63	0
Plastic - PP	621,80	618,07	3,73	0
Plastic - PVC	1.339,16	1.339,16	0	0
Plastic - Mixed Plastics	264,85	194,14	70,71	0
Mixed Metals	226,09	148,99	77,10	0
Glass	223,67	167,75	55,92	0
Mixed Recyclables	3.724,23	2368,61	1355,62	0
Mixed Organics	5.455,41	5.455,41	0	0
Mixed MSW	2.428,33	2.428,33	0	0

Fonte: Autores, 2023

Convertendo as massas para *short tons* obteve-se os valores apresentados na Tabela 33.

Tabela 33: Massas referentes ao cenário Americano convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (EUA)		
	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Reciclada (short ton/ano)	Massa Reduzida (short ton/ano)

Mixed Paper (General)	1.378,54	438,38	940,16	0
Yard Trimmings	390,86	390,86	0	0
Branches	1.211,43	1.211,43	0	0
Plastic - HDPE	513,76	468,04	45,73	0
Plastic - LDPE	285,74	273,45	0	12,29
Plastic - PET	420,85	342,99	77,86	0
Plastic - PP	685,42	681,30	4,11	0
Plastic - PVC	1.476,17	1.476,17	0	0
Plastic - Mixed Plastics	291,95	214,00	77,95	0
Mixed Metals	249,22	164,24	84,98	0
Glass	246,55	184,92	61,64	0
Mixed Recyclables	4.105,26	2.610,94	1.494,31	0
Mixed Organics	6.013,55	6.013,55	0	0
Mixed MSW	2.676,77	2.676,77	0	0

Fonte: Autores, 2023

4.4.3. Coleta de dados para o cenário Reino Unido - Bom:

Para o cenário que visa simular o perfil de gerenciamento apresentado para o Reino Unido, a fonte de dados selecionada para obter os inputs de massa corresponde às estatísticas oficiais de resíduos disponibilizadas pelo governo do Reino Unido, através do "*Department For Environment Food & Rural Affairs*". As informações estão disponíveis diretamente no site governamental, podendo ser acessadas por meio de planilhas e relatórios disponibilizados na mesma página (OGL, 2023).

Após a pré-avaliação e coleta dos dados a serem adaptados e posteriormente inseridos na metodologia, notamos que os dados disponibilizados pelo governo do Reino Unido têm um nível de complexidade aceitável. No entanto, em comparação com os cenários abordados até o momento, o cenário atual requer a maior necessidade de adaptação no que diz respeito ao processo de correlacionamento entre as categorias de materiais relatadas e as categorias disponíveis na metodologia. Isso ocorre porque o relatório utilizado categoriza os resíduos de forma mais generalista, ou seja, sem separá-los em subcategorias mais detalhadas.

Os dados coletados, referentes à geração e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Reino Unido, estão disponíveis na Tabela 34.

Tabela 34: Resíduos de Embalagens e Reciclagem, separados por material, Reino Unido 2021 (em milhares de toneladas e taxa em porcentagem).

Material	Packaging waste arising	Total recycled	Achieved recycling rate
Metal	756	574	76.0%
— of which: Aluminium	209	156	74.8%
— of which: Steel	547	418	76.4%
Paper and cardboard	5,389	3,802	70.6%
Glass	2,581	1,899	73.6%
Plastic	2,514	1,112	44.2%
Wood	1,433	632	44.1%
Other* materials	23	0	0.0%
Total (for recycling)	12,696	8,019	63.2%

Fonte: Department for Environment Food & Rural Affairs, 2023

Observando os dados apresentados acima, torna-se evidente que a categoria que requer a maior adaptação para a contabilização adequada das massas na metodologia WARM é a categoria de materiais plásticos. Isso se deve ao fato de que os dados relatados não estão devidamente subdivididos em categorias detalhadas, o que torna necessária uma adaptação não apenas no cenário alternativo, mas também no cenário base. Ignorar as massas das subcategorias de plásticos no cenário base afetaria o balanço de massa.

Assim, as medidas adotadas para cada material no processo de preenchimento do cenário alternativo estão descritas nos tópicos a seguir, seguindo a mesma lógica apresentada nos cenários anteriores.

4.4.3.1. **Categoria 1: Materiais não reciclados.**

No cenário alternativo "Bom", a tendência de alguns materiais não serem destinados ao processo de reciclagem permaneceu, no entanto, houve uma ligeira redução na quantidade de materiais alocados nessa categoria, passando de 5 materiais para 4 tipos distintos de resíduos.

Assim, as categorias de materiais cujas massas integrais foram dispostas em aterro sanitário são "*Yard Trimmings*", "*Branches*", "*Mixed Organics*", e "*Mixed MSW*". Em comparação com o cenário anterior, a subcategoria dos plásticos "PVC" agora faz parte de outra categoria, que será detalhada nas seções seguintes.

4.4.3.2. **Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária**

Ao contrário dos cenários anteriores, o número de categorias de materiais adotados como reciclados e que não precisaram passar por um processo de adaptação foi muito baixo, correspondendo a apenas três materiais: Papel, Vidro e *Mixed Recyclables*. Isso ocorreu devido a necessidade de adaptação dos materiais plásticos. Anteriormente, as subcategorias dos plásticos representavam uma grande fração dos materiais alocados como reciclados e sem a necessidade de adaptação, o que resultou em uma redução significativa no número de materiais que não precisam de adaptação.

Portanto, em relação aos materiais alocados neste tópico, a categoria "*Paper and Cardboard*" foi alocada como "*Mixed Papers*", a categoria "*Glass*" foi alocada na seção com o mesmo nome, e a categoria "*Mixed Recyclables*" foi preenchida com o valor total de reciclagem contabilizado para o cenário "Bom."

4.4.3.3. **Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária**

Por fim, no que diz respeito aos materiais reciclados que necessitam de alguma forma de adequação para serem incluídos corretamente na metodologia, incluímos tanto os materiais plásticos quanto os materiais metálicos na categoria de número 3. Os critérios considerados

para a necessidade de adaptação, bem como as modificações necessárias, serão apontados e explicados nos parágrafos subsequentes.

Começando pelos resíduos metálicos, o motivo pelo qual esses resíduos precisam de adaptação se dá pelo fato de a caracterização dos resíduos não ser condizente entre os dois cenários (Base e Alternativo). Os resíduos metálicos apresentados no cenário base possuem uma caracterização mais generalista, sendo enquadrados apenas como "metais". No entanto, para o cenário alternativo, os dados de geração de resíduos metálicos apresentados pelo governo do Reino Unido são mais detalhados, realizando a segregação dos tipos de metais em duas classes distintas, alumínio e aço.

Portanto, as adaptações necessárias se mostraram simples uma vez que os valores totais de metais reciclados já estavam explicitados pela fonte de dados. Foi necessário apenas descartar os dados individuais de reciclagem para o alumínio e o aço e adotar apenas o valor integral de metais reciclados.

No que diz respeito aos plásticos, os materiais relatados no cenário base se subdividem em várias categorias, como "PEBD", "PET", "PP", entre outras. No entanto, os dados apresentados para a criação do cenário alternativo estão classificados apenas como plásticos, impossibilitando a correlação dos materiais e, conseqüentemente, inviabilizando a execução da metodologia devido ao balanço de massa.

Assim, visando o melhor aproveitamento dos dados disponibilizados para o cenário em questão, optamos por somar as massas de todas as subcategorias de plásticos relatadas no cenário base e criar uma única categoria que considerasse a massa integral, alocando-a como "*Mixed Plastics*". Com essa adaptação, tornou-se viável a criação de uma relação entre ambos os cenários, de forma que o balanço de massa não fosse impactado.

Com a finalização da criação do cenário alternativo, as massas obtidas para cada cenário ficaram dispostas como apresentado na Tabela 35.

Tabela 35: Massas referentes ao cenário do Reino Unido da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Reino Unido)	
	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Reciclada (ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.250,59	367,67	882,92
Yard Trimmings	354,58	354,58	0
Branches	1.098,99	1.098,99	0

Plastic - Mixed Plastics	3332,90	1473,14	1859,76
Mixed Metals	226,09	54,26	171,83
Glass	223,67	59,05	164,62
Mixed Recyclables	3.724,23	1370,52	2353,71
Mixed Organics	5.455,41	5455,41	0
Mixed MSW	2.428,33	2.428,33	0

Fonte: Autores, 2023

Convertendo as massas para *short tons* obteve-se os valores apresentados na Tabela 36.

Tabela 36: Massas referentes ao cenário do Reino Unido convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Reino Unido)	
	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Reciclada (short ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.378,54	405,29	973,25
Yard Trimmings	390,86	390,86	0
Branches	1.211,43	1.211,43	0
Plastic - Mixed Plastics	3.673,89	1.623,86	2.050,03
Mixed Metals	249,22	59,81	189,41
Glass	246,55	65,09	181,46
Mixed Recyclables	4.105,26	1.510,73	2.594,52
Mixed Organics	6.013,55	6.013,55	0
Mixed MSW	2.676,77	2.676,77	0

Fonte: Autores, 2023

4.4.4. Coleta de dados para o cenário Austrália - Excelente:

Por fim, para o cenário com perfil de reciclagem excelente, referente ao gerenciamento de RSU Australiano, os dados utilizados foram obtidos por meio de estatísticas e estimativas apresentadas no relatório “*Waste Account, Australia, Experimental Estimates*” de autoria da *Australian Bureau of Statistics* (ABS). O relatório em questão está disponibilizado diretamente na página do governo Australiano, a qual oferece a opção de

visualização dos dados por meio de planilhas, sendo essa a opção escolhida por conta da maior facilidade quanto a manipulação dos valores (ABS, 2020).

Com a validação prévia das informações qualitativas e quantitativas fornecidas pelo relatório do governo Australiano, foi possível constatar que os dados presentes no relatório são muito satisfatórios quanto ao nível de detalhamento e segregação dos resíduos e quanto a apresentação dos valores de geração para obtenção das porcentagens associadas aos diferentes tipos de gerenciamento. Dessa forma, os dados apresentados nesta seção podem ser facilmente considerados os mais condizentes com as delimitações e exigências da metodologia WARM.

Porém, mesmo que o nível de harmonia entre a metodologia e a base de dados para criação do cenário alternativo seja alto, modificações e adaptações ainda se mostraram necessárias, porém, essas se mostraram menos significantes em comparação com os cenários anteriores.

É importante ressaltar dois pontos relevantes envolvendo o tratamento dos dados relacionados ao cenário excelente, o primeiro deles diz respeito às categorias de resíduos uma vez que muitas das categorias disponibilizadas não se enquadram no escopo da análise realizada neste trabalho, optou-se por não se utilizar os dados referentes a tais classes de resíduos.

O segundo ponto diz respeito às diferentes modalidades de disposição de resíduos relatadas pelo documento. Diferente dos outros cenários, os dados Australianos oferecem uma gama muito mais ampla de possibilidades de disposição de resíduos, sendo elas o uso para recuperação de energia, a destinação para aterros com o objetivo de se recuperar energia, e, o tratamento do resíduo, sendo esse caso não contabilizado pelo documento para as categorias de resíduos selecionados. Dessa forma, considerando as limitações da metodologia WARM e o objetivo do estudo em questão, optou-se por conceber todas as modalidades de gerenciamento, que não a reciclagem, como sendo aterro sanitário.

A Tabela 37 apresenta os dados encontrados para criação do cenário Australiano de reciclagem.

Tabela 37: Reciclagem de Materiais na Austrália 2018-19 (toneladas)

Waste collection, treatment & disposal services							
Waste category	Waste type	Energy recovery other (not landfill)	Landfill (for energy recovery)	Landfill (disposal)	Recycling	Treatment	Other disposal
Metals	Steel	-	-	497.704	2.199.590	-	-

Waste collection, treatment & disposal services							
	Aluminium	-	-	37.595	38.026	-	-
	Non-ferrous metals	-	-	28.284	196.069	-	-
Paper & Cardboard	Cardboard	-	277.701	1.538.317	1.582.460	-	-
	Liquid paperboard	-	863	4.782	8.209	-	-
	Newsprint & magazines	-	72.199	399.941	632.867	-	-
	Office paper	-	15.585	86.333	148.189	-	-
Plastics	PET	13.832	-	436.931	29.968	-	-
	HDPE	21.723	-	686.188	104.011	-	-
	PVC	1.118	-	35.330	5.251	-	-
	LDPE	11.293	-	356.734	54.073	-	-
	PP	5.875	-	185.565	28.128	-	-
	PS	1.323	-	41.803	5.161	-	-
	Other plastics	12.725	-	401.971	-	-	-
Glass	Glass	-	-	475.264	658.266	-	-
Other	Other unclassified materials	-	-	229.994	51.724	-	-

Fonte: Australian Bureau of Statistics, 2020

Seguindo para o processo de preenchimento dos dados necessários para criação do cenário alternativo, assim como nos cenários anteriores, as adaptações necessárias, ou não, para adequação dos dados na metodologia podem ser visualizadas abaixo, sendo que as medidas adotadas estão segmentadas em categorias distintas.

4.4.4.1. Categoria 1: Materiais não reciclados.

O cenário Australiano apresentou alguns materiais que acabaram por não serem contabilizados como recicláveis sendo que estes foram exatamente os mesmos tipos de resíduos abordados na mesma categoria para o cenário referente ao Reino Unido. Os materiais que tiveram suas massas integrais destinadas ao aterro correspondem a "*Yard Trimmings*", "*Branches*", "*Mixed Organics*", e "*Mixed MSW*". Tal fato se deve majoritariamente pelo fato destes materiais serem de natureza orgânica, dessa forma, como o

método adotado para reciclagem destes materiais não se enquadra no escopo avaliado deste estudo, estes tiveram que ter suas reciclagens ignoradas. Já para o *Mixed MSW*, a não adoção de práticas de reciclagem se deve ao fato destes não serem materiais recicláveis dentro da própria metodologia.

4.4.4.2. **Categoria 2: Materiais reciclados sem adaptação necessária**

Com relação aos materiais em que houve a possibilidade de atribuição de uma porcentagem de reciclagem sem a necessidade de adaptação quanto às tipologias de materiais, foi possível constatar um grande aumento nas classes enquadradas nessa categoria, totalizando sete tipos de materiais, sendo esses, HDPE, LDPE, PET, PP, PVC, *Glass* e *Mixed Recyclables*.

4.4.4.3. **Categoria 3: Materiais reciclados com adaptação necessária**

Na categoria dos materiais aos quais foram atribuídos uma parcela de reciclagem, porém, houve a necessidade de certas adaptações para a inclusão correta destes materiais na metodologia, estão, *Steel*, *Aluminum* e *Non-ferrous metals*, atribuídos a categoria *Mixed Metals*, e, *Liquid paperboard*, *Newsprint & magazines* e *Office paper*, atribuídos a categoria *Mixed Paper (general)*.

Houve a necessidade de se realizar adaptações nas categorizações para estes materiais pois há uma disparidade na quantidade de materiais em uma subcategoria considerados entre ambos os cenários, é necessário que se realizem correções visando atingir o balanço de massa adequado. Especificamente para este cenário, não é possível que se considere os valores individuais de Aço, alumínio e metais não ferrosos, uma vez que no cenário base os resíduos metálicos acabaram por ser assimilados em uma única categoria, sendo essa a dos *mixed metals*. O mesmo caso se repete para o caso dos resíduos de papel.

Desse modo, de forma mais específica, a adaptação recorrida consistiu na soma das massas de resíduos gerados em cada subcategoria do cenário australiano, e, posteriormente, no cálculo da porcentagem de reciclagem considerando todos os metais em conjunto, assim como no caso dos papéis.

4.4.4.4. Categoria 4: Outras Adaptações

Uma adaptação mais complexa que deve ser comentada é a adaptação realizada para a categoria dos *Mixed Plastics*. A alteração realizada se deu pelo fato de os *mixed plastics* não estarem bem representados dentro do relatório Australiano, dessa forma, foi necessário recorrer a outras possibilidades.

A metodologia adotada para que se pudesse adaptar tal categoria consistiu em consultar o manual da metodologia WARM e identificar qual a composição da categoria dos *Mixed Plastics*, sendo que após leitura aprofundada constatou-se que essa correspondia a 50% PET e 50% HDPE, dessa forma, a adaptação se deu pela adoção da taxa de porcentagem de ambas tipologias, cada uma sobre uma metade da massa total.

Sendo assim, os valores finais obtidos ao final do processo podem ser visualizados na Tabela 38.

Tabela 38: Massas referentes ao cenário Australiano da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Austrália)		
	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Aterrada (ton/ano)	Massa Reciclada (ton/ano)	Massa Reduzida (ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.250,59	628,42	622,17	0
Yard Trimmings	354,58	354,58	0	0
Branches	1.098,99	1.098,99	0	0
Plastic - HDPE	466,08	406,38	59,70	0
Plastic - LDPE	259,22	226,01	0	33,21
Plastic - PET	381,79	358,00	23,79	0
Plastic - PP	621,80	542,15	79,65	0
Plastic - PVC	1339,16	1.170,56	0	168,60
Plastic - Mixed Plastics	264,85	239,64	25,21	0
Mixed Metals	226,09	42,50	183,59	0
Glass	223,67	93,78	129,89	0
Mixed Recyclables	3.724,23	1.430,85	2.293,38	0
Mixed Organics	5.455,41	5455,41	0	0

Mixed MSW	2.428,33	2.428,33	0	0
-----------	----------	----------	---	---

Fonte: Autores, 2023

Convertendo as massas para *short tons* obteve-se os valores apresentados na Tabela 39.

Tabela 39: Massas referentes ao cenário Australiano convertidas, finalizadas e prontas para inserção na planilha da metodologia WARM.

Material	Cenário Base	Cenário Alternativo (Austrália)		
	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Aterrada (short ton/ano)	Massa Reciclada (short ton/ano)	Massa Reduzida (short ton/ano)
Mixed Paper (General)	1.378,54	692,72	685,82	0
Yard Trimmings	390,86	390,86	0	0
Branches	1.211,43	1.211,43	0	0
Plastic - HDPE	513,76	447,95	65,81	0
Plastic - LDPE	285,74	249,14	0	36,60
Plastic - PET	420,85	394,63	26,22	0
Plastic - PP	685,42	597,61	87,80	0
Plastic - PVC	1.476,17	1.290,32	0	185,85
Plastic - Mixed Plastics	291,95	264,15	27,79	0
Mixed Metals	249,22	46,85	202,37	0
Glass	246,55	103,38	143,17	0
Mixed Recyclables	4.105,26	1.577,24	2.528,02	0
Mixed Organics	6.013,55	6.013,55	0	0
Mixed MSW	2.676,77	2.676,77	0	0

Fonte: Autores, 2023

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção foi dividida em quatro subseções, com o objetivo de oferecer discussões que abordem todos os aspectos trabalhados neste estudo, sendo: duas delas destinadas a análises e discussões focadas para cada metodologia separadamente, comparando os resultados obtidos nos cenários simulados entre si; uma delas destinada à análise comparativa dos resultados obtidos entre ambas as metodologias, fazendo a comparação de um mesmo cenário considerando os resultados obtidos em cada ferramenta; e, a última destinada a realizar discussões de cunho mais geral, abordando aspectos que transcendem ambas as metodologias.

5.1. Resultados da metodologia MDL

Serão feitos três tipos de análises diferentes nesta seção, sendo a primeira uma análise mais aprofundada em cada cenário proposto levando em consideração as emissões evitadas por tipo de material. Posteriormente, uma análise comparativa entre os cenários, e a última, uma análise mais abrangente da metodologia proposta.

Os resultados são comparados a partir dos valores de GEE evitados obtidos no final da aplicação da metodologia por material e cenário. Para facilitar a compreensão da discussão, estão apresentados na Tabela 40, um resumo das variáveis utilizadas.

Tabela 40: Resumo das variáveis utilizadas nas fórmulas dos materiais para mensuração das emissões evitadas.

Variável	Definição
$SEC_{BI,i}$	Consumo específico de eletricidade para a produção de material virgem do tipo i (MWh/t)
$EF_{el,a}$	Fator de emissão para eletricidade da rede (tCO ₂ /MWh), comum a todos os materiais
$SFC_{BI,i}$	Consumo específico de combustível para a produção de material virgem do tipo i (GJ/t)

Fonte: Autores, 2023

5.1.1. Plástico

5.1.1.1. Cenário Excelente - Austrália

Os valores de redução das emissões obtidas para o plástico estão presentes na Tabela 41. O valor anual total evitado foi de 911,95 tCO_{2eq}.

Tabela 41: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} se a reciclagem de plástico no COMAGSUL chegasse aos níveis que temos na Austrália.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(el,a)	SFC(BI,i)	EF(FF,CO2)	BE(plástico,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	Gj/t	tCO ₂ /Gj	tCO _{2eq}
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	a*b*(c*d+e*f)
PEAD	246,56	0,75	0,83	0,454	15	0,067	255,53
PEBD	131,13	0,75	1,67	0,454	15	0,067	173,40
PET	201,97	0,75	1,11	0,454	15	0,067	228,57
PP + PS	328,93	0,75	0,56	0,454	11,6	0,067	254,45
Total Plástico	908,59	-	-	-	-	-	911,95

Fonte: Autores 2023

5.1.1.2. Cenário Bom - Reino Unido

Os valores de redução das emissões obtidas para o plástico estão presentes na Tabela 42. O valor anual total evitado foi de 594,70 tCO_{2eq}.

Tabela 42: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Reino Unido.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(el,a)	SFC(BI,i)	EF(FF,CO2)	BE(plástico,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	Gj/t	tCO ₂ /Gj	t/CO _{2eq}
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	a*b*(c*d+e*f)
PEAD	159,40	0,75	0,83	0,45	15,00	0,067	165,20
PEBD	88,65	0,75	1,67	0,45	15,00	0,067	117,23
PET	130,57	0,75	1,11	0,45	15,00	0,067	147,77
PP + PS	212,66	0,75	0,56	0,45	11,60	0,067	164,51
Total Plástico	591,28	-	-	-	-	-	594,70

Fonte: Autores (2023)

5.1.1.3. Cenário Médio - Estados Unidos

Os valores de redução das emissões obtidas para o plástico estão presentes na Tabela 43. O valor anual total obtido foi de 257,35 tCO_{2eq}.

Tabela 43: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Estados Unidos.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(eI,a)	SFC(BI,i)	EF(FF,CO2)	BE(plástico,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	Gj/t	tCO ₂ /Gj	t/CO _{2eq}
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	a*b*(c*d+e*f)
PEAD	68,98	0,75	0,83	0,454	15,00	0,067	71,49
PEBD	38,36	0,75	1,67	0,454	15,00	0,067	50,73
PET	56,50	0,75	1,11	0,454	15,00	0,067	63,94
PP + PS	92,03	0,75	0,56	0,454	11,60	0,067	71,19
Total Plástico	255,87	-	-	-	-	-	257,35

Fonte: Autores (2023)

5.1.1.4. Cenário Ruim - Brasil

Os valores de redução das emissões obtidas para o plástico estão presentes na Tabela 44. A quantidade de GEE anual evitadas por conta da recuperação desse material foi de 48,69 tCO_{2eq}.

Tabela 44: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} decorrentes do volume de plástico recuperado pelo Brasil.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(eI,a)	SFC(BI,i)	EF(FF,CO2)	BE(plástico,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	Gj/t	tCO ₂ /Gj	t/CO _{2eq}
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	a*b*(c*d+e*f)
PEAD	13,05	0,75	0,83	0,454	15,00	0,067	13,52
PEBD	7,26	0,75	1,67	0,454	15,00	0,067	9,60
PET	10,69	0,75	1,11	0,454	15,00	0,067	12,10
PP + PS	17,41	0,75	0,56	0,454	11,60	0,067	13,47
Total Plástico	48,41	-	-	-	-	-	48,69

Fonte: Autores (2023)

De forma mais detalhada, é perceptível que os tipos de plástico que mais possuem retorno de GEE evitados são o PEAD e PP+PS, com valores muito próximos, sendo os dois tipos com o menor consumo específico de eletricidade para produção de material virgem ($SEC_{Bl,i}$). E mesmo o PP+PS possuindo um valor de consumo específico de combustível para a produção de material virgem ($SFC_{Bl,i}$) menor que os demais, o PEAD ainda conseguiu obter um valor de redução de GEE maior.

5.1.2. Papel

5.1.2.1. Cenário Excelente - Austrália

Os valores de redução das emissões obtidas para o papel estão presentes na Tabela 45. O valor anual total evitado foi de 79,62 tCO_{2eq}.

Tabela 45: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} se a reciclagem de papel no COMAGSUL chegasse aos níveis que temos na Austrália.

	Wj =	φ	1 - f(a)	GWP(CH4)	Default (j)=	BE(CH4,a)
	ton	-	-	-	-	tCO₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	a*b*c*d*e
Papel	661,56	0,83	1,00	25,00	0,0058	79,62
Total Papel	661,56	-	-	-	-	79,62

Fonte: Autores (2023)

5.1.2.2. Cenário Bom - Reino Unido

Os valores de redução das emissões obtidas para o papel estão presentes na Tabela 46. O valor anual total obtido foi de 51,47 tCO_{2eq}.

Tabela 46: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de papel recuperado pelo Reino Unido.

	Wj =	φ	1 - f(a)	GWP(CH4)	Default (j)=	BE(CH4,a)
	ton	-	-	-	-	tCo2
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	a*b*c*d*e

Papel	427,70	0,83	1,00	25,00	0,0058	51,47
Total Papel	427,70	-	-	-	-	51,47

Fonte: Autores (2023)

5.1.2.3. Cenário Médio - Estados Unidos

Os valores de redução das emissões obtidas para o papel estão apresentados na Tabela 47. O resultado anual total obtido foi de 22,28 tCO_{2eq}.

Tabela 47: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de papel recuperado pelo Estados Unidos.

	Wj =	φ	1 - f(a)	GWP(CH4)	Default (j)=	BE(CH4,a)
	ton	-	-	-	-	tCo2
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	a*b*c*d*e
Papel	185,09	0,83	1,00	25,00	0,0058	22,28
Total Papel	185,09	-	-	-	-	22,28

Fonte: Autores (2023)

5.1.2.4. Cenário Ruim - Brasil

Os valores de redução das emissões obtidas para o papel estão presentes na Tabela 48. O resultado total anual obtido foi de 4,21 tCO_{2eq}.

Tabela 48: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de papel recuperado pelo Brasil.

	Wj =	φ	1 - f(a)	GWP(CH4)	Default (j)=	BE(CH4,a)
	ton	-	-	-	-	tCo2
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	a*b*c*d*e
Papel	35,02	0,83	1,00	25,00	0,0058	4,21
Total Papel	35,02	-	-	-	-	4,21

Fonte: Autores (2023)

5.1.3. Metais

5.1.3.1. Cenário Excelente - Austrália

Os valores de redução das emissões obtidas para os metais estão apresentados na Tabela 49. O valor total anual evitado foi de 552,68 tCO_{2eq}.

Tabela 49: Potencial de redução das emissões de CO_{2eq} decorrentes do volume de metais recuperados pela Austrália.

(i)	Q(i,a)	SE(i)	BE(metal,a)
	ton	CO ₂ /t	tCO _{2eq}
	(a)	(b)	a*b
Alumínio	56,21	8,40	472,18
Aço	63,39	1,27	80,50
Total Metal	119,60	-	552,68

Fonte: Autores (2023)

5.1.3.2. Cenário Bom - Reino Unido

Os valores de redução das emissões obtidas para os metais estão apresentados na Tabela 50. O resultado total anual obtido foi de 357,30 tCO_{2eq}.

Tabela 50: Potencial de redução das emissões de CO_{2e} decorrentes do volume de metais recuperados pelo Reino Unido.

(i)	Q(i,a)	SE(i)	BE(metal,a)
	ton	CO ₂ /t	tCO ₂
	(a)	(b)	a*b
Alumínio	36,34	8,40	305,26
Aço	40,98	1,27	52,04
Total Metal	77,32	-	357,30

Fonte: Autores (2023)

5.1.3.3. Cenário Médio - Estados Unidos

Os valores de redução das emissões obtidas para os metais estão apresentados na Tabela 51. O resultado total anual obtido foi de 154,62 tCO_{2eq}.

Tabela 51: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de metais recuperados pelos Estados Unidos.

(i)	Q(i,a)	SE(i)	BE(metal,a)
	ton	CO2/t	tCO2
	(a)	(b)	a*b
Alumínio	15,73	8,40	132,10
Aço	17,73	1,27	22,52
Total Metal	33,46	-	154,62

Fonte: Autores (2023)

5.1.3.4. Cenário Ruim - Brasil

Os valores de redução das emissões obtidas para os metais estão apresentados na Tabela 52. O resultado total anual obtido foi de 29,25 tCO_{2eq}.

Tabela 52: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de metais recuperados pelo Brasil.

(i)	Q(i,a)	SE(i)	BE(metal,a)
	ton	CO2/t	tCO2
	(a)	(b)	a*b
Alumínio	2,98	8,40	24,99
Aço	3,35	1,27	4,26
Total Metal	6,33	-	29,25

Fonte: Autores (2023)

Comparando as emissões evitadas entre Alumínio e Aço, é perceptível que o primeiro possui um valor de emissões evitadas muito superior, devido ao seu fator de emissão de CO_{2eq} específico para sua produção ser muito maior (8,40) do que para o ferro (1,27). Em ambos os casos são consideradas as mesmas fórmulas, sendo algo inerente ao tipo de material.

5.1.4. Vidro

5.1.4.1. Cenário Excelente - Austrália

Os valores de redução das emissões obtidas para o vidro estão apresentados na Tabela 53. O resultado total anual obtido foi de 1,42 tCO_{2eq}.

Tabela 53: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pela Austrália.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BL,i)	EF(el,a)	BE(vidro,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	tCO _{2eq}
	(a)	(b)	(c)	(d)	a*b*c*d
Vidro	118,32	0,88	0,03	0,454	1,42
Total Vidro	118,32	-	-	-	1,42

Fonte: Autores (2023)

5.1.4.2. Cenário Bom - Reino Unido

Os valores de redução das emissões obtidas para o vidro estão apresentados na Tabela 54. O resultado total anual obtido foi de 0,92 tCO_{2eq}.

Tabela 54: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Reino Unido.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BL,i)	EF(el,a)	BE(vidro,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	tCO ₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	a*b*c*d
Vidro	76,50	0,88	0,03	0,454	0,92
Total Vidro	76,50	-	-	-	0,92

Fonte: Autores (2023)

5.1.4.3. Cenário Médio - Estados Unidos

Os valores de redução das emissões obtidas para o vidro estão presentes na Tabela 55. O resultado total anual obtido foi de 0,40 tCO_{2eq}.

Tabela 55: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Estados Unidos.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(el,a)	BE(vidro,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	tCO ₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	a*b*c*d
Vidro	33,10	0,88	0,03	0,454	0,40
Total Vidro	33,10	-	-	-	0,40

Fonte: Autores (2023)

5.1.4.4. Cenário Ruim - Brasil

Os valores de redução das emissões obtidas para o vidro estão apresentados na Tabela 56. O resultado total anual obtido foi de 0,08 tCO_{2eq}.

Tabela 56: Potencial de redução das emissões de CO₂e decorrentes do volume de vidro recuperado pelo Brasil.

(i)	Q(i,a)	L(i)	SEC(BI,i)	EF(el,a)	BE(vidro,a)
	ton	-	MWh/t	tCO ₂ /MWh	tCO ₂
	(a)	(b)	(c)	(d)	a*b*c*d
Vidro	6,26	0,88	0,03	0,454	0,08
Total Vidro	6,26	-	-	-	0,08

Fonte: Autores (2023)

Analisando mais detalhadamente o vidro, o fator para ajustar sua degradação em relação sua qualidade e perda de material no seu processo produtivo é maior (L_i) - 0,88, se comparado ao plástico (L_i) - 0,75, além de que para sua reciclagem o fator de emissão decorrente do fornecimento de energia elétrica ser muito maior se comparado com o plástico, por exemplo. Mesmo possuindo um valor baixo de consumo específico de eletricidade para sua produção, a quantidade de energia necessária para sua reciclagem é muito maior, e emitindo muito mais GEE por conta disso.

5.2. Discussão da metodologia MDL

A discussão será feita por tipo de material entre todos os cenários propostos e as conclusões gerais dos valores obtidos, dispostos na Tabela 57 segundo a metodologia.

Tabela 57: Quantidade de emissão evitada de CO_{2eq} para o plástico a partir da quantidade reciclada

Cenários	Plástico		Papel		Metais		Vidro	
	Quantida de de massa reciclada (ton)	Quantida de de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantida de de massa reciclada (ton)	Quantida de de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantida de de massa reciclada (ton)	Quantida de de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantida de de massa reciclada (ton)	Quantida de de emissões de evitadas (tCO _{2eq})
Excelente - Austrália	908,59	911,95	661,56	79,62	119,60	552,68	118,32	1,42
Bom - Reino Unido	591,28	594,70	427,70	51,47	77,32	357,30	76,50	0,92
Médio - Estados Unidos	255,87	257,35	185,09	22,28	33,46	154,62	33,10	0,40
Ruim - Brasil	48,41	48,69	35,02	4,21	6,33	29,25	6,26	0,08
TOTAL	1.804,15	1.545,67	1.309,37	1.004,39	236,71	434,65	234,18	82,23

Fonte: Autores (2023)

Dentre o valor total de plástico reciclado de 1.808,07 de RSU do cenário Excelente - Austrália, a quantidade de 908,59 ton representa 50,26% desse total, sendo os valores para os cenários Bom - Reino Unido: 32,70%; Médio - Estados Unidos: 14,13% e Ruim - Brasil: 2,67%.

Os valores totais de emissões evitadas nos países em comparação com a massa reciclada, são muito similares, demonstrando também que a proporção de material reciclado em comparação às emissões evitadas, seguem uma tendência. O aumento desses valores contribui para um retorno ambiental mais significativo. Isso é demonstrado no caso da Austrália, por possuir uma porcentagem maior, obteve um maior retorno de emissões evitadas. foi 911,95 t/CO_{2eq}, reflexo da alta taxa de reciclagem. Vale ressaltar a importância de analisar quais tipos de materiais possuem um maior índice na redução de emissões

evitadas também, sendo um segundo parâmetro para analisar a quantidade de CO_{2eq} evitado. Dessa forma, a escolha correta dos materiais reciclados e reciclagem total são fatores importantes a serem considerados para as emissões evitadas.

Tabela 58: Emissões evitadas de CO_{2eq} por tipo de polímero para cada cenário proposto

	Quantidade de CO _{2eq} evitado (tCO ₂)			
	Cenário Excelente - Austrália	Cenário Bom - Reino Unido	Cenário Médio - Estados Unidos	Cenário Ruim - Brasil
PET	228,57	147,77	63,94	12,10
PEAD	255,53	165,20	71,49	13,52
PEBD	173,40	117,23	50,73	9,60
PP+PS	254,45	164,51	71,19	13,47

Fonte: Autores, 2023

Os dados obtidos por tipologia de plástico apresentados na Tabela 58, demonstra que o PEAD e PP+PS são os dois tipos que mais dão retorno na questão emissões evitadas de CO_{2eq}, com valores muito similares em todos os cenários. Logo em seguida o PET, e por último o PEBD, sendo especificamente para esses dois últimos materiais, os valores possuindo um delta muito menor nos cenários Estados Unidos (Médio) e Brasil (Ruim). Essa análise é importante para proposição de estratégias de reciclagem de plástico, em vista de quais materiais priorizar, além de estimular também o aumento de pesquisas que aumentem a capacidade de retorno ambiental desses materiais.

Em relação a proporção de massa reciclada de papel e a quantidade evitada de t/CO_{2eq}, é observado que esse valor é menor se comparado com o plástico, sendo importante o investimento em tecnologias que aumentem o potencial de redução desse material, pois apesar da grande quantidade coletada e reciclada, esse retorno ainda é pequeno. É perceptível também como os cenários com maiores índices de reciclagem possuem um retorno ambiental melhor, sendo muito importante para países em desenvolvimento, como o Brasil, coloquem isso em pauta, visto a necessidade da redução de emissões, sendo um fator importante para visto a quantidade de resíduos gerados no contexto brasileiro.

Analisando a proporção de massa reciclada de acordo com o potencial de redução de emissões evitadas de CO_{2eq}, é notório o quanto os metais se destacam em relação aos outros materiais, especialmente por conta do valor obtido pelo Alumínio, tal fato deriva do alto consumo energético para sua produção, ao mesmo tempo em que sua reciclagem demanda

poucos recursos energéticos para ser realizada. Em comparação com a massa reciclada de plástico e papel, seu volume é muito menor, sendo importante pontuar que o aumento na coleta e reciclagem desses materiais, seria de grande retorno ambiental.

Dentre os materiais que emitem menos gases de efeito estufa durante o processo de reciclagem, destacam-se o alumínio e os plásticos em geral. Isso ocorre porque a reciclagem, na maioria dos casos, requer principalmente o uso de energia elétrica. Esse aspecto se deve ao fato de que muitos dos processos de reciclagem desses materiais envolvem atividades como lavagem, prensagem, trituração, extrusão e outras, que geralmente são realizadas por máquinas movidas a energia elétrica. Os demais processos de reciclagem são de natureza físico-química e não exigem consumo energético significativo (MASSI, E. H.G., LUIZ, L. A. C., MASSI, C. G., 2019).

Considerando a massa reciclada de acordo com o valor de emissões evitadas, é perceptível que o vidro é o material que menos possui retorno ambiental nesse requisito. Isso pode ser explicado pelo fato do consumo de energia para reciclagem do vidro ser muito maior se comparado com os outros materiais, como mostrado na Tabela 59, possuindo um ganho de somente 13%.

Tabela 59: Economia de energia elétrica com a reciclagem de alguns materiais

Economia no consumo de energia pela produção a partir de matéria-prima reciclada			
Material	Consumo de energia (MWh/t) - matéria-prima virgem	Consumo de energia (MWh/t) - matéria-prima reciclada	Ganho (%)
Alumínio	17,60	0,70	95
Plástico	6,74	1,44	79
Papel	4,98	1,47	71
Aço	6,84	1,78	74
Vidro	4,83	4,19	13

Fonte: COSTA, H.B.C. (2002)

Portanto, levando em consideração a necessidade de priorização de materiais visando políticas com rápido retorno de redução de emissões, o vidro não seria o material mais interessante para isso, mas é necessário que existam mais pesquisas para identificar formas de reduzir as emissões provenientes da reciclagem desse material.

5.2.1. Discussão Geral

A partir da soma dos resultados por material, esse foi o ranking em relação a quantidade de resíduos reciclada e a quantidade total de emissões evitadas de CO_{2e}, apresentados na Tabela 60:

Tabela 60: Ranking de emissões de CO_{2eq} evitadas a partir dos resultados da metodologia MDL

Classificação	Cenários	Plástico		Papel		Metais		Vidro	
		Quantidade de massa reciclada (ton)	Quantidade de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantidade de massa reciclada (ton)	Quantidade de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantidade de massa reciclada (ton)	Quantidade de emissões de evitadas (tCO _{2eq})	Quantidade de massa reciclada (ton)	Quantidade de emissões de evitadas (tCO _{2eq})
1º	Excelente - Austrália	908,59	911,95	661,56	79,62	119,60	552,68	118,32	1,42
2º	Bom - Reino Unido	591,28	594,70	427,70	51,47	77,32	357,30	76,50	0,92
3º	Médio - Estados Unidos	255,87	257,35	185,09	22,28	33,46	154,62	33,10	0,40
4º	Ruim - Brasil	48,41	48,69	35,02	4,21	6,33	29,25	6,26	0,08
-	TOTAL	1.804,15	1.545,67	1.309,37	1.004,39	236,71	434,65	234,18	82,23

Fonte: Autores (2023)

Levando em consideração a porcentagem de massa de resíduos sólidos reciclados em cada cenário em relação à massa de RSU gerada no COMAGSUL, os seguintes resultados são obtidos: Cenário Excelente - Austrália (52,85%); Cenário Bom - Reino Unido (34,18%); Cenário Médio - Estados Unidos (14,79%); Cenário Ruim - Brasil (2,80%).

A prática da reciclagem de resíduos urbanos se mostra como uma maneira significativa de mitigar os impactos dos gases de efeito estufa, pois reduz o uso de recursos virgens na fabricação, evitando emissões de GEE associadas à extração e refinamento de novos recursos. Apesar de algumas emissões durante o transporte e processamento de materiais reciclados, geralmente há um benefício líquido em comparação com o uso de recursos virgens. Aumentar a reciclagem resulta em menos resíduos em aterros sanitários,

diminuindo suas emissões. Importante destacar que a reciclagem de produtos de papel não só economiza emissões de GEE originadas pelo corte e processamento de árvores, mas também preserva as árvores como sumidouros de carbono (ENEH, OLUIGBO, 2012).

É notório que a porcentagem de reciclagem é um fator diretamente ligado a um resultado expressivo de retorno ambiental, refletido em emissões evitadas. Servindo como orientação para países principalmente em desenvolvimento para aumentarem sua capacidade de redução desses gases.

Levando em consideração a emissão de GEE de 1 litro de gasolina como sendo 2,264 kgCO_{2eq} evitada, segundo EPE (2014). E, considerando um carro que consome em média 10 litros de gasolina por 100 km e tem um tanque de 50 litros. Os valores para todos os cenários estão dispostos na Tabela 61.

Tabela 61: Valores de emissões evitadas correspondentes a quantidade de gasolina evitada e carros abastecidos

Cenários	Quantidade de gasolina evitada (L/ano)				Quantidade de carros abastecidos (Carros/ano)			
	Plástico	Papel	Metais	Vidro	Plástico	Papel	Metais	Vidro
Excelente - Austrália	402.529.580,96	35.157.625,66	230.478.873,24	626.106,19	4.253.225	351.576	2.304.789	6.261
Bom - Reino Unido	262.496.748,87	22.701.327,04	157.746.478,87	405.634,07	2.624.965	227.013	1.577.465	4.056
Médio - Estados Unidos	113.527.464,79	9.839.436,62	68.153.521,13	176.056,34	1.135.275	98.394	681.535	1.760
Ruim - Brasil	21.486.725,66	1.860.992,96	12.892.832,39	35.211,27	214.867	18.610	128.928	352

Fonte: Autores, 2023

5.3. Resultados e Discussão (WARM)

Nesta seção, serão apresentados três tipos de análises. A primeira considera uma abordagem aprofundada em cada cenário individualmente, separando as emissões geradas em emissões associadas à produção dos materiais e emissões associadas ao processo de gerenciamento dos resíduos após o seu uso (*End-of-Life*).

A segunda análise apresenta um caráter comparativo, avaliando as emissões dos quatro cenários de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos entre si.

Por fim, a terceira forma de análise conta com uma análise de cunho mais geral acerca da metodologia WARM.

A comparação será baseada em emissões de gases de efeito estufa (GEE), obtidas ao final das simulações, apresentadas pela própria metodologia na forma de tabelas e índices adotando toneladas métricas de CO₂ equivalente como unidade de medida, sendo essa uma métrica utilizada para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa, levando em consideração o potencial de aquecimento global associado a cada um. Além disso, serão considerados aspectos funcionais da metodologia, envolvendo o processo de inserção de dados e adaptações necessárias.

5.3.1. Emissões de GEE (Cenário Brasil):

Ao se observar os resultados totais apresentados na Tabela 62 e 63 referente ao cenário Brasileiro tem-se como informação inicial, a variação total na quantidade de GEE emitidas, sendo o valor em questão equivalente a 998,22 MTCO₂eq.

As tabelas também apresentam as emissões segmentadas por material, por etapa, sendo estas a etapa de produção e a etapa associada ao “*end-of-life*”, isto é, emissões associadas aos processos posteriores ao descarte, e, emissões segmentadas por opção de gerenciamento.

Tabela 62: Emissões decorrentes do cenário base Brasileiro.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO ₂ E)	End-of-Life Impacts (MTCO ₂ E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO ₂ E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	-	429,82	10.925,72
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
Mixed Plastics	7.117,01	-	69,26	7.186,27
Mixed Metals	1.549,34	-	4,70	1.554,04
Glass	148,76	-	4,65	153,41
Mixed Recyclables	NA	-	1.551,35	1.551,35
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	19.311,00	-	4.038,22	23.349,22

Fonte: Autores, 2023

Tabela 63: Emissões decorrentes do cenário alternativo Brasileiro.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO ₂ E)	End-of-Life Impacts (MTCO ₂ E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO ₂ E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	- 212,70	411,13	10.694,33
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
Mixed Plastics	7.117,01	- 60,62	68,03	7.124,42
Mixed Metals	1.549,34	- 72,91	4,39	1.480,82
Glass	148,76	- 3,80	4,39	149,35
Mixed Recyclables	NA	- 554,32	1.477,97	923,65
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	19.311,00	- 904,34	3.944,34	22.351,01

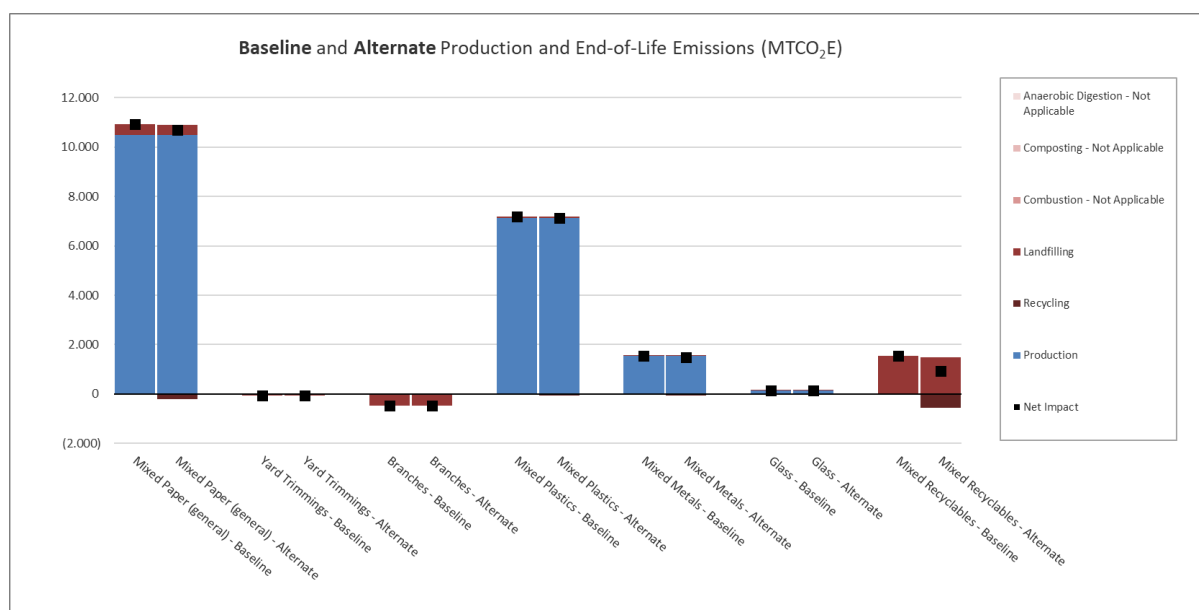
Fonte: Autores, 2023

De forma mais detalhada, como evidenciado nas Tabelas 62 e 63, a emissão total gerada no cenário base equivale a 23.349,22 MTCO₂E, sendo que o processo de produção do material corresponde a cerca de 80% das emissões totais, já para o cenário alternativo, esse valor corresponde a 22.351,01 MTCO₂E.

De acordo também com os resultados apresentados pelo modelo, tal valor de emissão reduzida corresponde a remoção da emissão de 212 veículos, conservando um total de 112.323 galões de gasolina e 41.592 cilindros de propano.

Sendo assim, as emissões realizadas e evitadas, associadas a cada categoria, podem ser visualizadas na Figura 10, a qual, de forma mais aprofundada, apresenta as emissões de cada cenário para cada material considerado, indicando os valores associados à produção do material e a cada forma de gerenciamento definida previamente, exibindo o valor final de emissões.

Figura 10: Emissões referentes ao cenário base e alternativo ruim associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.



Fonte: Autores, 2023

5.3.2. Emissões de GEE (Cenário EUA):

Ao realizar uma comparação das emissões relacionadas a cada um dos cenários elaborados é possível visualizar que as emissões associadas ao processo de gerenciamento de resíduos nos cenários "Base" e "Alternativo" correspondem a 4.038,22 MTCO₂E e -5.030,44 MTCO₂E, respectivamente. Isso representa uma variação de aproximadamente 9.068,67 MTCO₂E de um cenário para o outro, como apresentado nas Tabelas 64 e 65.

Tabela 64: Emissões decorrentes do cenário base Americano.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO ₂ E)	End-of-Life Impacts (MTCO ₂ E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO ₂ E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	-	429,82	10.925,72
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
HDPE	780,28	-	9,69	789,96
LDPE	513,05	NA	5,39	518,44
PET	931,42	-	7,93	939,35
PP	1.052,14	-	12,92	1.065,06
PVC	2.841,85	NA	27,83	2.869,67

Mixed Plastics	565,56	-	5,50	571,06
Mixed Metals	1.549,34	-	4,70	1.554,04
Glass	148,76	-	4,65	153,41
Mixed Recyclables	NA	-	1.551,35	1.551,35
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	18.878,28	-	4.038,22	22.916,50

Fonte: Autores, 2023

Tabela 65: Emissões decorrentes do cenário alternativo Americano.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO2E)	End-of-Life Impacts (MTCO2E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO2E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	- 3.334,69	136,68	7.297,89
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
HDPE	780,28	- 34,74	8,82	754,36
LDPE	490,99	NA	5,16	496,14
PET	931,42	- 80,75	6,47	857,14
PP	1.052,14	- 3,27	12,84	1.061,71
PVC	2.841,85	NA	27,83	2.869,67
Mixed Plastics	565,56	- 72,25	4,03	497,34
Mixed Metals	1.549,34	- 373,30	3,10	1.179,13
Glass	148,76	- 17,10	3,49	135,14
Mixed Recyclables	NA	- 4.265,79	986,66	- 3.279,13
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	18.856,22	- 8.181,90	3.173,52	13.847,84

Fonte: Autores, 2023

Se tratando do cenário alternativo, as emissões associadas ao gerenciamento dos resíduos se mostraram negativas, isso é, a aplicação de reciclagem não apenas reduziu as emissões, mas, considerando toda a cadeia produtiva dos materiais abordados na

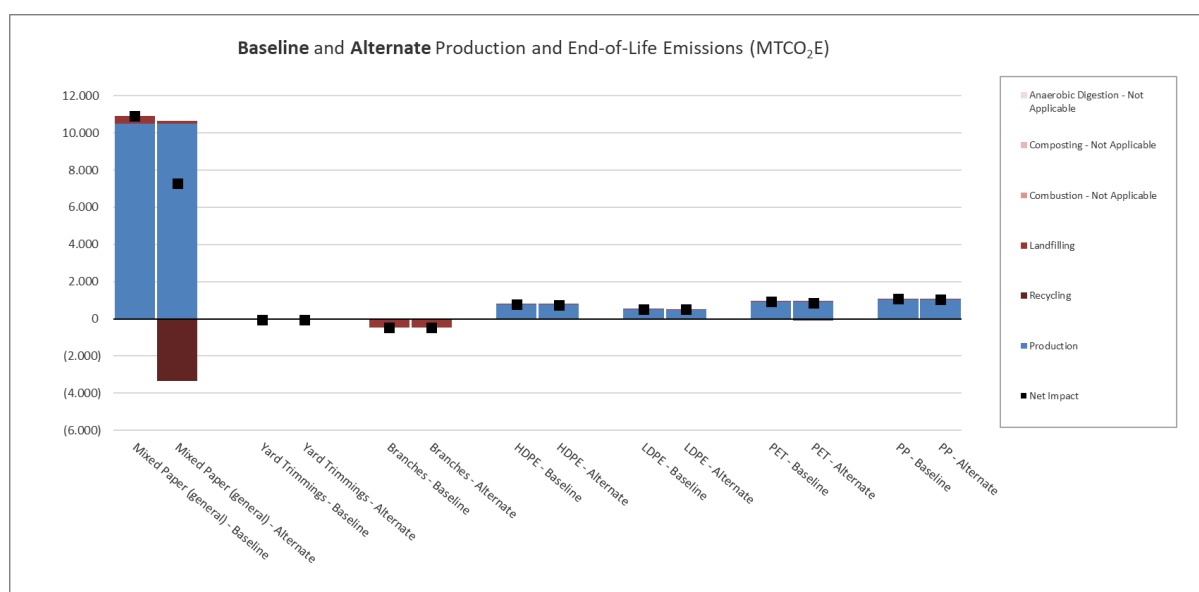
metodologia, foi capaz de torná-las negativas, evitando futuras emissões com a produção de novos materiais.

Para tornar esses números mais palpáveis, essa variação equivale às emissões anuais de cerca de 1.925 veículos familiares, resultando na conservação de 1.020.442 galões de gasolina e 377.861 cilindros de propano.

Quando consideramos as emissões associadas às etapas de produção dos materiais descartados, juntamente com as emissões nas etapas de gerenciamento, os valores apresentados anteriormente somam 22.916,50 MTCO₂E para o cenário "Base" e 13.847,84 MTCO₂E para o cenário "Alternativo", como apresentado nas Tabelas 64 e 65.

De forma mais visual, os dados obtidos após a aplicação da metodologia são apresentados na Figura 11.

Figura 11: Emissões referentes ao cenário base e alternativo mediano associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.



Fonte: Autores, 2023

5.3.3. Emissões de GEE (Cenário Reino Unido):

As emissões totais dos cenários "Base" e "Alternativo" para o Reino Unido são, respectivamente, 23.349,22 MTCO₂ e 8.781,59 MTCO₂, como apresentado nas Tabelas 66 e 67.

Tabela 66: Emissões decorrentes do cenário base do Reino Unido.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO2E)	End-of-Life Impacts (MTCO2E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO2E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	-	429,82	10.925,72
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
Mixed Plastics	7.117,01	-	69,26	7.186,27
Mixed Metals	1.549,34	-	4,70	1.554,04
Glass	148,76	-	4,65	153,41
Mixed Recyclables	NA	-	1.551,35	1.551,35
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	19.311,00	-	4.038,22	23.349,22

Fonte: Autores, 2023

Tabela 67: Emissões decorrentes do cenário alternativo do Reino Unido.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO2E)	End-of-Life Impacts (MTCO2E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO2E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	- 3.452,04	126,37	7.170,23
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
Mixed Plastics	7.117,01	- 1.505,20	38,65	5.650,46
Mixed Metals	1.549,34	- 831,99	1,13	718,48
Glass	148,76	- 50,35	1,23	99,63
Mixed Recyclables	NA	- 7.406,54	570,90	- 6.835,64
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	19.311,00	- 13.246,12	2.716,71	8.781,59

Fonte: Autores, 2023

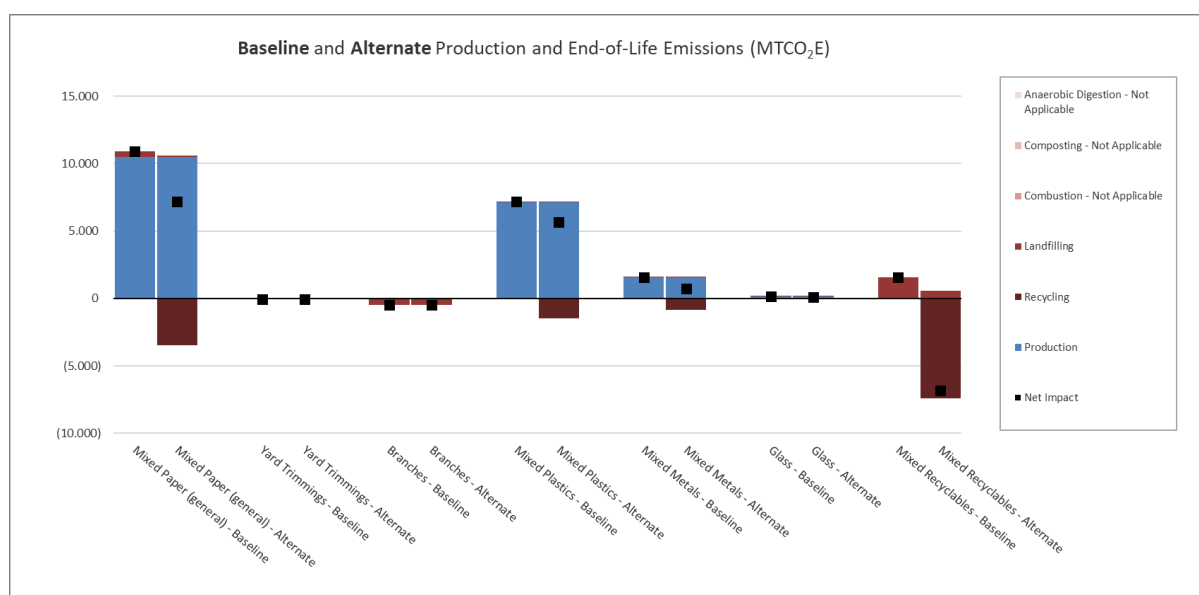
Focando nas emissões associadas ao processo de gerenciamento dos resíduos, referentes aos cenários "Base" e "Alternativo", observamos que as emissões para ambos os

cenários, com ênfase no gerenciamento dos resíduos, foram, respectivamente, 4.038,22 MTCO²E e -10.529,41 MTCO². Isso resulta em uma variação de cerca de 14.567,63 MTCO²E de um cenário para o outro, como apresentado nas Tabelas 66 e 67.

Para tornar essa variação mais tangível, ela equivale às emissões anuais de aproximadamente 3.093 veículos familiares, resultando na economia de 1.639.207 galões de gasolina e 606.985 cilindros de propano.

Com o intuito de proporcionar uma visualização mais clara das emissões realizadas e reduzidas no cenário em estudo, os dados obtidos ao final da aplicação da metodologia estão apresentados na Figura 12.

Figura 12: Emissões referentes ao cenário base e alternativo bom associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.



Fonte: Autores, 2023

5.3.4. Emissões de GEE (Cenário Austrália):

Os resultados obtidos para as emissões totais do ciclo de vida dos resíduos abordados no cenário Australiano foram equivalentes a 22.916,50 MTCO² para o cenário base, e 10.558,54 MTCO² para o cenário alternativo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, como apresentado nas Tabelas 68 e 69. De forma mais específica, se tratando apenas das emissões associadas ao processo de disposição dos resíduos, as emissões apontadas para os cenários base e simulado foram respectivamente 4.038,22 MTCO²E e -8.319,74 MTCO²E, o que corresponde a uma redução de 12.357,97 MTCO²E nas emissões entre os cenários.

Tabela 68: Emissões decorrentes do cenário base Australiano.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO2E)	End-of-Life Impacts (MTCO2E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO2E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	-	429,82	10.925,72
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
HDPE	780,28	-	9,69	789,96
LDPE	513,05	NA	5,39	518,44
PET	931,42	-	7,93	939,35
PP	1.052,14	-	12,92	1.065,06
PVC	2.841,85	NA	27,83	2.869,67
Mixed Plastics	565,56	-	5,50	571,06
Mixed Metals	1.549,34	-	4,70	1.554,04
Glass	148,76	-	4,65	153,41
Mixed Recyclables	NA	-	1.551,35	1.551,35
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	18.878,28	-	4.038,22	22.916,50

Fonte: Autores, 2023

Tabela 69: Emissões decorrentes do cenário alternativo Australiano.

Material	GHG Emissions from Production (MTCO2E)	End-of-Life Impacts (MTCO2E)		Production + End-of-Life Impact (MTCO2E)
		GHG Emissions from Recycling	GHG Emissions from Landfilling	
Mixed Paper (general)	10.495,90	- 2.432,56	215,99	8.279,32
Yard Trimmings	NA	NA	- 69,48	- 69,48
Branches	NA	NA	- 461,23	- 461,23
HDPE	780,28	- 50,01	8,44	738,71
LDPE	447,33	NA	4,70	452,03
PET	931,42	- 27,19	7,44	911,67

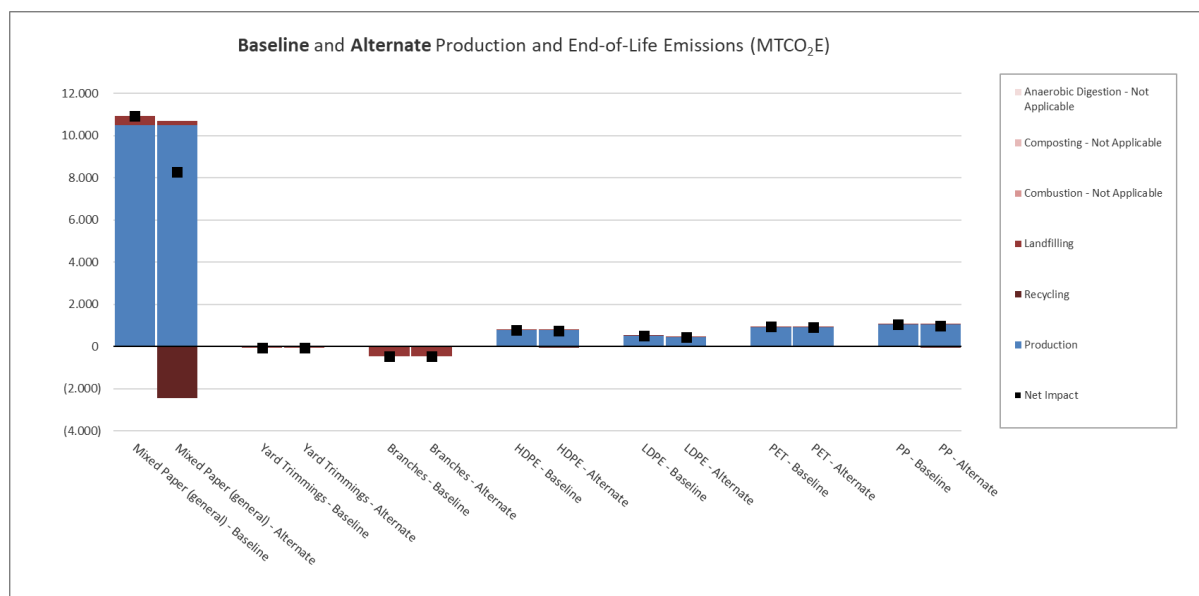
PP	1.052,14	- 69,82	11,27	993,59
PVC	2.484,06	NA	24,32	2.508,38
Mixed Plastics	565,56	- 25,76	4,98	544,77
Mixed Metals	1.549,34	- 888,91	0,88	661,31
Glass	148,76	- 39,73	1,95	110,98
Mixed Recyclables	NA	- 7.216,69	596,03	- 6.620,66
Mixed Organics	NA	NA	1.274,60	1.274,60
Mixed MSW	NA	NA	1.234,55	1.234,55
Total	18.454,77	- 10.750,67	2.854,44	10.558,54

Fonte: Autores, 2023

Aproximando os valores de emissões para uma realidade mais palpável, tal valor de emissões corresponde às emissões anuais de aproximadamente 2.624 veículos familiares, o que acarreta na economia de 1.390.567 galões de gasolina e 514.915 cilindros de propano.

Os dados de emissões obtidos podem ser visualizados na Figura 13.

Figura 13: Emissões referentes ao cenário base e alternativo ruim associadas aos processos de produção e descarte dos resíduos.



Fonte: Autores, 2023

5.3.5. Emissões de GEE (Comparação):

Ao final das simulações realizadas previamente foi possível constatar que os resultados obtidos seguiram parcialmente o esperado, tendo como base o ranking estabelecido pelo EPI, e, considerando que os países com maior quantidade de resíduos reciclados tenderiam a apresentar as menores emissões.

Os cenários que seguiram a tendência prevista foram os cenários “Ruim” e o cenário “Mediano”, correspondendo respectivamente ao quarto e terceiro cenário com menor redução de emissões de GEE. Com os seus níveis de reciclagem correspondendo aos mais baixos entre os quatro cenários, já era esperado que seu impacto na redução de emissões de GEE seriam igualmente menores com valores que chegam a apenas 998,22 MTCO² evitadas para o cenário Brasileiro e 9.068,67 MTCO² evitadas para o cenário Americano, já apresentando uma redução mais significativa.

Para os cenários correspondentes ao Reino Unido e a Austrália foi possível observar uma inversão quanto ao que se esperava para as reduções nas emissões de GEE, com o Reino Unido apresentando o maior valor de emissões de GEE evitadas. Consequentemente, o cenário Australiano passou a ocupar o segundo maior valor de emissões evitadas, fugindo do que se esperava, uma vez que esse cenário correspondia a condições excelentes de reciclagem. Os valores de emissões evitadas obtidos para o cenário Australiano e do Reino Unido foram respectivamente 12.357,97 MTCO² e 14.567,63 MTCO².

Na Tabela 70 é possível observar a compilação dos valores de redução de emissões obtidos para cada cenário simulado, considerando tanto as emissões totais de cada cenário, quanto às emissões “End-of-Life”, isso é, as emissões associadas ao processo de gerenciamento do resíduo, após o seu descarte.

Tabela 70: Contabilização comparativa das emissões geradas e evitadas para os cenários Base e Alternativos.

País	Status Reciclagem	Emissões Totais (Base) MTCO ²	Emissões Totais (Simulado) MTCO ²	Emissões End-of-Life (Base) MTCO ²	Emissões End-of-Life (Simulado) MTCO ²	Emissões Evitadas MTCO ²
Brasil	Ruim	23.349,22	22.351,01	4.038,22	3.040,01	998,22
EUA	Mediano	22.916,50	13.847,84	4.038,22	-5.030,44	9.068,67
RU	Bom	23.349,22	8.781,59	4.038,22	-10.529,41	14.567,63
Austrália	Excelente	22.916,50	10.558,54	4.038,22	-8.319,74	12.357,97

Fonte: Autores, 2023

Inicialmente, por meio da comparação das emissões totais de cada cenário base, é possível observar que os cenários referentes aos Estados Unidos e a Austrália apresentam emissões totais menores, quando comparados às mesmas emissões dos cenários referentes ao Brasil e ao Reino Unido. O motivo para a ocorrência dessa divergência está associado ao processo de compatibilização dos materiais considerados no cenário base com os materiais obtidos para cada cenário alternativo. Se tratando dos cenários “Ruim” e “Bom”, a compatibilização dos dados de entrada resultou na necessidade de simplificação de certos grupos de materiais presentes no cenário base, como foi o caso dos plásticos, como mencionado na metodologia. Essa simplificação resultou em emissões maiores para esses cenários.

Ao se observar os dados referentes às emissões evitadas é importante destacar que a aparente discrepância entre o ranking de cenários com maior redução de emissões e o ranking dos países que mais reciclam resíduos, de autoria do EPI, pode ser atribuída a diversos fatores.

Primeiramente, as adaptações realizadas em cada cenário para tornar os materiais compatíveis podem resultar na contabilização tanto superestimada quanto subestimada da redução de emissões em alguns cenários, o que impacta a classificação geral, como apresentado anteriormente para os valores de emissões totais do cenário base. Além disso, a possibilidade de que a Austrália possa reciclar resíduos com menor potencial de redução de emissões do que outros países também influencia a contabilização de emissões evitadas. Por último, é relevante considerar que as taxas de reciclagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na Austrália podem ser menores em comparação com o Reino Unido, mesmo que em termos de valores totais de resíduos, a Austrália apresente um maior percentual de reciclagem.

Esses fatores combinados explicam por que o ranking de redução de emissões pode não coincidir com o ranking de reciclagem de resíduos, de autoria do EPI, nos países em questão. Essa complexa interação entre fatores técnicos, potencial de redução de emissões e volumes de resíduos reciclados ressalta a importância de uma análise abrangente e contextualizada para compreender completamente o impacto das práticas de reciclagem em relação à redução de emissões.

5.3.6. Análise Geral

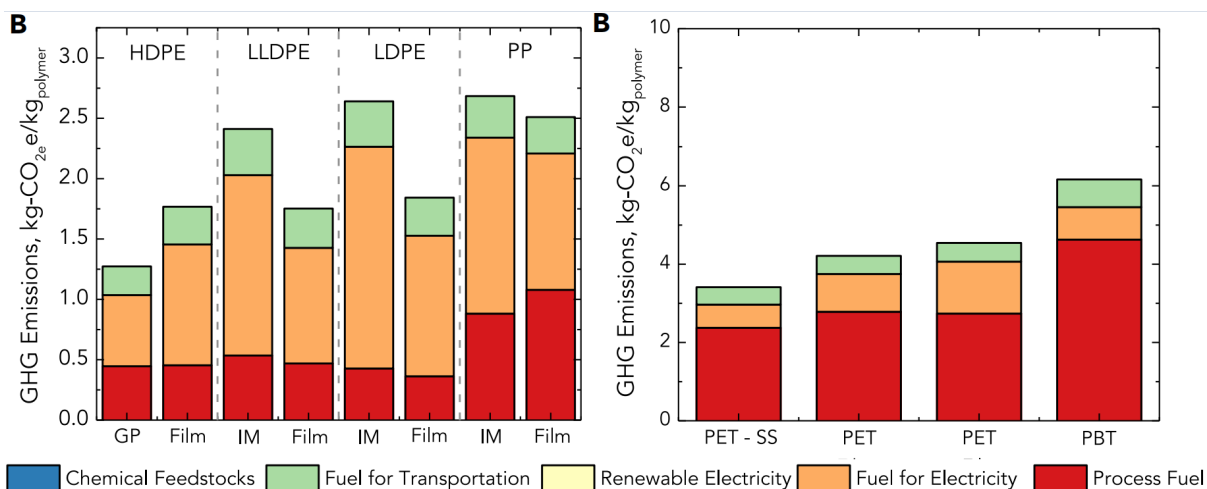
Uma questão importante a ser considerada e discutida ao final da aplicação da metodologia é o impacto que as diversas adaptações realizadas tiveram no resultado final. Sendo assim, as adaptações feitas podem ser separadas em adaptações realizadas no cenário base e adaptações realizadas no cenário alternativo.

Se tratando inicialmente das adaptações introduzidas no cenário base a fim de tornar viável a contabilização de certos materiais no cenário alternativo, como foi o caso da simplificação da categoria dos plásticos em alguns cenários os quais assumiram o valor integral dos plásticos como sendo *Mixed Plastics*, o impacto sobre as emissões totais do cenário base foi de aproximadamente 430 MTCO² a mais de emissões totais para os cenários em que houve a necessidade de adaptação.

Essa diferença aponta para a possibilidade de uma superestimação de emissões ao se considerar as massas de cada material plástico como sendo um único material, ou seja, de forma mais generalista. Porém a subestimação também é possível caso o perfil de consumo real seja baseado em materiais que possuem maior potencial de emissões que os materiais adotados no cálculo das emissões da categoria mais generalista, o processo de simplificação da categoria resultará em uma redução nas emissões calculadas.

Ao se realizar uma simulação, a qual consistiu em simplificar cenários mais complexos e comparar os valores de emissões entre o cenário complexo e o simplificado, foi possível constatar que os cenários em que houve a simplificação da tipologia dos materiais foram penalizados com tal prática, uma vez que a simplificação dos plásticos no cenário Australiano resultou em um aumento de aproximadamente 200 MTCO² nas emissões finais do cenário alternativo. Como abordado anteriormente, o motivo para tal pode ser associado ao fato de a categoria *mixed recyclables* adotar uma composição de plásticos padrão com base na geração de resíduos Estadunidense. Sendo assim, países que consomem mais plásticos com menor potencial de emissões, quando comparado com os Estados Unidos, acabam por ser penalizados pela simplificação, porém, vale ressaltar que, no caso de países que consomem mais plásticos responsáveis por uma maior emissão, existe a possibilidade de uma beneficiação caso os dados sejam simplificados. A Figura 14, de autoria da Joule, apresenta como diferentes tipos de plásticos podem apresentar diferentes níveis de emissões (JOULE, 2021), reforçando as afirmações realizadas anteriormente.

Figura 14: Emissões de GEE por tipo de plástico.



Fonte: JOULE, 2021

Por fim, abordando as adaptações realizadas no cenário alternativo, as quais consistiram na adoção da opção de gerenciamento “Redução” ao invés da “Reciclagem” para os resíduos que eram reciclados em seus devidos cenários porém, por limitações da metodologia, não havia a possibilidade de inclusão destes dados em tal categoria, foram conduzidas simulações, assim como anteriormente, visando quantificar o impacto dessas adaptações para com o resultado final.

Dessa forma, a simulação realizada consistiu em transpor todos os valores reciclados para a sessão dos materiais reduzidos. Para tal, utilizou-se o cenário referente ao Reino Unido como base para o estudo, uma vez que todos os seus valores puderam ser aplicados na categoria reciclagem, sem necessidade de adaptação, dessa forma, ao final da simulação, os resultados obtidos serão mais expressivos. Com isso, ao final da simulação foi possível constatar que os cenários que passaram pela adaptação em questão foram beneficiados com tal mudança, uma vez que o cenário referente ao Reino Unido apresentou uma redução nas emissões equivalente a 20.570,88 MTCO₂, um valor mais de 40% maior que o obtido por meio da reciclagem.

A conclusão obtida condiz com os resultados apresentados em estudos conduzidos por outras organizações, como é o caso do documento “Climate Change and Municipal Solid Waste: Environmental Issues With an Important Underlying Link” de autoria do EPA. O documento em questão conclui que a redução de resíduos apresenta melhores resultados, quanto a redução de emissões, dentre todas as formas de gestão de resíduos, seguido pela reciclagem (EPA, 2023).

Outra discussão importante a ser trazida é a má representação da realidade dos cenários trazidos quanto à composição de sua matriz energética, uma vez que a metodologia WARM disponibiliza valores engessados, estando limitada apenas à realidade dos estados Estadunidenses. Tal limitação da metodologia tem o potencial de subestimar a contabilização das reduções de emissões para casos que apresentem uma matriz energética menos poluente que os estados americanos, como é o caso da Suécia, que possui mais da metade de sua matriz energética composta por fontes renováveis (Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023), assim como superestimar a mesma contabilização para países cuja matriz energética é mais poluente que todos os estados americanos, como é o caso da Índia, cuja matriz energética é composta quase que completamente por combustíveis fósseis (Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023).

Um último ponto a ser considerado em uma análise aprofundada é o impacto que o processo de reciclagem de cada material, individualmente, proporciona, ao se analisar pela ótica da metodologia WARM. Dessa forma, visando identificar quais materiais apresentam uma maior redução de emissões quando reciclados foram criados uma série de cenários, os quais contabilizam apenas um material em cada simulação, adotando a mesma massa de resíduo gerada em cada cenário, assim como as mesmas taxas de reciclagem.

Os cenários consideraram a categoria mais generalista de cada material, assumindo uma massa base equivalente a uma “*short ton*”, para as porcentagens assumiu-se valores crescentes equivalentes a 15%, 35% e 50%, visando captar possíveis variações influenciadas pelos diferentes níveis de reciclagem. A Tabela 71 apresenta as tipologias adotadas para cada material, assim como as emissões totais do cenário base e simulado.

Tabela 71: Simulação do impacto na redução de emissões, obtidos por meio de diferentes níveis de reciclagem, para cada material abordado nos cenários trabalhados anteriormente.

Categoria	Tipologia	Emissões - Base (MTCO ²)	Reciclagem 15%		Reciclagem 35%		Reciclagem 50%	
			Redução percentual	Emissões - Simulação (MTCO ²)	Redução percentual	Emissões - Simulação (MTCO ²)	Redução percentual	Emissões - Simulação (MTCO ²)
Papel	Mixed Paper (general)	7.925,59	7,88%	7.346,78	20,54%	6.575,03	32,17%	5.996,22
Plástico	Mixed Plastics	1.956,04	7,82%	1.814,17	20,37%	1.625,02	31,88%	1.483,15
Metais	Mixed Metals	6.235,57	11,87%	5.573,86	32,91%	4.691,57	54,73%	4.029,86

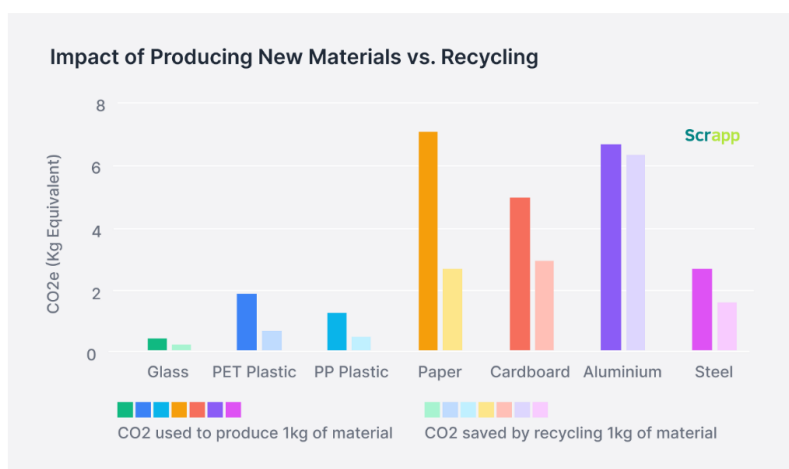
Vidro	Vidro	622,21	7,69%	577,76	20,00%	518,49	31,25%	474,04
-------	-------	--------	-------	--------	--------	--------	--------	--------

Fonte: Autores, 2023

Ao final do estudo foi possível constatar que o material responsável pelos maiores valores de emissão, considerando os processos de produção e descarte, é o papel, apresentando valores de emissão quase iguais à soma dos demais cenários, seguido pelo metal, plástico e vidro. Porém, ao se tratar das emissões evitadas pelo processo de reciclagem foi possível observar que os materiais seguiram uma tendência muito semelhante com o decorrer dos cenários de reciclagem, apresentando uma redução percentual de suas emissões quase idêntica, com exceção do metal, o qual apresentou uma redução de suas emissões em média quase 62% maior que os demais cenários.

Ao se analisar a literatura é possível observar a mesma tendência em outros estudos, como é o caso dos dados apresentados na matéria “How much CO₂ does recycling save?” de autoria de BONNIN. Os resultados apresentados podem ser observados na Figura 15.

Figura 15: Comparação das emissões envolvidas na produção e das emissões evitadas pelo processo de reciclagem segmentadas por material.



Fonte: BONNIN, 2022

O estudo de BONNIN (2022) compara as emissões associadas à produção de 1 kg de material, e as emissões evitadas pela reciclagem da mesma quantidade de material. Dessa forma fica claro que os materiais que proporcionam um maior impacto ao serem reciclados são o metal e o papel, porém, para análises futuras, visando obter um cenário mais fiel a realidade, é interessante que se faça uma análise ponderada, levando em consideração o fato

de que certos materiais apresentam uma massa descartada muito maior que outros, como é o caso do plástico.

Ao final da análise realizada, é possível constatar que, mesmo com os diversos empecilhos encontrados ao longo do estudo, relatados anteriormente, a ferramenta em questão foi capaz de proporcionar resultados, análises e insights muito significativos, podendo indicar de forma muito satisfatória o efeito que a reciclagem de resíduos, e consequentemente as cooperativas de reciclagem, tem para com a redução nas emissões de GEE.

5.4. Resultados e Discussão (MDL - WARM)

Uma abordagem comparativa entre os resultados obtidos em ambas as metodologias trabalhadas previamente foi capaz de traduzir uma certa consistência e alinhamento em certos aspectos, porém, alguns critérios analisados apontaram para algumas divergências entre as metodologias WARM e MDL, gerando dados parcialmente condizentes.

Se tratando inicialmente do potencial de redução de emissões para a reciclagem de cada material individualmente. Com a simulação de emissões evitadas por unidade de massa reciclada de cada material considerando diferentes níveis de reciclagem, foi possível constatar por meio de ambas as metodologias que o material com maior potencial de redução de emissões é o metal, em contrapartida, o material com o menor potencial é o vidro. Porém, o restante dos materiais não apresentou o mesmo comportamento, como evidenciado na Tabela 72, a qual apresenta os valores obtidos por cada metodologia.

Tabela 72: Ranking de emissões evitadas por material para cada metodologia

Material	Emissões Evitadas - WARM	Emissões Evitadas - MDL
Papel	2º	3º
Plástico	3º	2º
Metal	1º	1º
Vidro	4º	4º

Fonte: Autores, 2023

Dessa forma, fica claro que o plástico e o papel apresentaram comportamentos divergentes entre ambas as metodologias.

A configuração final do “Ranking” de cenários com maior redução de emissões apresentou dados divergentes ao serem comparados os resultados obtidos por ambas as metodologias, assim como no caso dos materiais, porém duas colocações se mantiveram iguais para ambas as metodologias. A configuração do “Ranking”, assim como os valores de emissões evitadas, podem ser visualizados na Tabela 73.

Tabela 73: Ranking de emissões evitadas por cenário para cada metodologia.

Cenário	Colocação - WARM	Emissões Evitadas - WARM (MTCO ²)	Colocação - MDL	Emissões Evitadas - MDL (TCO ²)
Brasil	4º	998,22	4º	82,23
EUA	3º	9.068,67	3º	434,64
RU	1º	14.567,63	2º	1.004,40
Austrália	2º	12.357,97	1º	1.545,68

Fonte: Autores, 2023

Dessa forma, pode-se observar uma troca entre a posição do primeiro e segundo colocados entre as duas metodologias.

Por fim, para os valores brutos de emissões evitadas para cada um dos cenários obtidos em cada metodologia, foi possível notar uma variação substancial entre o que foi obtido pelo MDL e o que foi obtido por meio do WARM, como pode ser observado na Tabela 72. Os valores obtidos na metodologia WARM são em média aproximadamente 13 vezes maiores que os valores obtidos pela metodologia MDL.

Sendo assim, visando apontar possíveis motivos para a ocorrência de tais divergências, foram levantadas alguma hipóteses:

1. Os métodos de cálculo utilizados por cada metodologia apresentam níveis distintos de complexidade, com a metodologia WARM requisitando uma maior quantidade de variáveis para criação de seus cenários. Tal aspecto tem um grande potencial para influenciar na equiparação dos resultados obtidos por cada metodologia, uma vez que, para cada nova variável considerada na metodologia WARM novas fontes de emissões acabam sendo contabilizadas, e consequentemente, novas emissões podem ser consideradas como evitadas, devido ao processo de reciclagem.

2. Os materiais considerados por cada metodologia para a execução dos cálculos de emissões não apresentam o mesmo nível de detalhamento, com a metodologia WARM necessitando uma maior quantidade de dados. Essa maior robustez quanto aos dados utilizados acaba por influenciar nas emissões evitadas finais, uma vez que, uma maior segmentação e disponibilização de materiais para entrada de dados pode resultar em um maior detalhamento do cenário e possibilitar a contabilização de emissões geradas e evitadas que acabam por não ser consideradas na metodologia MDL.
3. Cada metodologia utilizada na realização dos cálculos aborda o uso de índices e variáveis distintas, com a metodologia WARM abordando certos aspectos não considerados na metodologia MDL, e vice-versa. Dessa forma, o uso de índices diferentes, como as emissões associadas ao mix energético, resulta em variações ao longo da contabilização das emissões.
4. A metodologia WARM utiliza informações padronizadas de acordo com a realidade Estadunidense, enquanto a metodologia MDL abordada no trabalho em questão adapta seus índices para o cenário Brasileiro, dessa forma, ao se considerar a disparidade da realidade de ambas as nacionalidades, no âmbito das tecnologias empregadas em seus processos, é possível que, a adoção de tecnologias menos emissoras por uma das partes, seja capaz de gerar uma variação quanto aos resultados obtidos.
5. A metodologia WARM concentra-se na análise do ciclo de vida dos resíduos e avalia as emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo, levando em conta o processo completo de geração, coleta, transporte e tratamento dos resíduos. Por outro lado, a metodologia MDL está associada a projetos de redução de emissões em locais específicos e pode se concentrar em ações de mitigação de emissões em uma escala menor, muitas vezes visando créditos de carbono.
6. A metodologia WARM geralmente apresenta resultados em uma escala de tempo mais longa, avaliando as emissões ao longo do ciclo de vida dos

resíduos, enquanto a metodologia MDL pode se concentrar em projetos de curto prazo que visam reduções imediatas de emissões. Isso pode resultar em diferenças nas grandezas e na interpretação dos resultados.

7. Ambas as ferramentas apresentam limitações em suas metodologias de cálculo. Uma vez que a caracterização fiel das emissões reais associadas aos processos de gerenciamento de RSU envolve uma quantidade muito alta de variáveis, algumas dessas variáveis podem acabar por não ser consideradas ou não ser simuladas com exatidão.

Porém, mesmo com a ocorrência de divergências entre os resultados finais, fica claro que, ambas as metodologias apontam para uma redução significativa das emissões de GEE com a ampliação da reciclagem nas práticas de gerenciamento de resíduos sólidos. Dessa forma, consequentemente, uma vez que um dos agentes mais significativos para ocorrência dessa ampliação e execução do processo de reciclagem, são as cooperativas, é evidente que a intensificação e o incentivo a essas iniciativas é crucial para a garantia de cidades mais sustentáveis e menos emissivas.

5.5. Resultados e Discussão (Geral)

Uma das principais dificuldades encontradas durante a condução deste estudo diz respeito à obtenção de dados detalhados sobre o gerenciamento de resíduos sólidos no geral em diversos países. A falta de padronização e a heterogeneidade nas fontes de dados disponíveis tornaram o processo de coleta de informações um desafio significativo. Muitos países não possuem sistemas de coleta de dados que atendam às necessidades das metodologias WARM (*Waste Reduction Model*) e MDL (Modelo de Desenvolvimento Limpo).

Essas limitações na disponibilidade de dados impactam diretamente a qualidade da análise e a precisão dos resultados. É crucial que os países melhorem seus sistemas de coleta e compartilhamento de informações sobre a gestão de RS para que análises mais robustas possam ser realizadas.

Outro desafio significativo foi a variação nas metodologias de coleta, caracterização e contabilização de dados sobre RS em diferentes países. Cada nação adota abordagens

distintas para definir e categorizar seus resíduos, o que torna complicada a comparação direta entre os grupos.

A falta de padronização nas definições e categorizações dos resíduos impacta diretamente as análises comparativas. Diferenças na forma como os RS são classificados e quantificados dificultam a identificação de tendências globais e a avaliação do desempenho de cada nação em termos de redução de emissões de GEE.

Um outro ponto a ser discutido é a dificuldade de se colocar em perspectiva os valores de emissões obtidos pelas metodologias, uma vez que são escassos ou até mesmo inexistentes os dados reais referentes a essas medições, sendo que a segmentação das emissões específicas ao processo de gerenciamento de RSU dificultam ainda mais a obtenção desses valores por conta de sua especificidade. Dessa forma, são necessários novos estudos que visem reforçar ou até mesmo contestar os valores obtidos pelo trabalho em questão, a fim de se obter valores mais condizentes com a realidade.

Além disso, a comparação dos resultados obtidos para cada metodologia se mostrou uma tarefa desafiadora, uma vez que cada metodologia apresenta uma abordagem distinta, visando mensurar as emissões evitadas para atingir objetivos diferentes. Porém, ficou claro que, se tratando de análises mais aprofundadas e detalhadas, a metodologia WARM se mostrou a mais adequada. Em contrapartida, tendo em vista a obtenção de créditos de carbono, a metodologia MDL pode ser mais adequada para realização dessa tarefa.

Por fim, é possível concluir que este estudo demonstra que a análise comparativa dos cenários de gerenciamento de RS em diferentes países enfrenta desafios significativos devido à dificuldade de obtenção de dados detalhados e confiáveis, à falta de padronização metodológica e à escassez de dados convergentes sobre a reciclagem de RSU.

A superação desses desafios requer esforços conjuntos de governos, agências ambientais, instituições de pesquisa e organizações internacionais para estabelecer padrões de coleta de dados, classificação de resíduos e relatórios de reciclagem mais consistentes. A padronização permitirá uma análise comparativa mais precisa e, consequentemente, a adoção de políticas e práticas mais eficazes na redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à gestão de RS em nível global.

É fundamental reconhecer que o caminho em direção a um futuro de baixa emissão de GEE requer um compromisso internacional para superar esses desafios e melhorar a gestão de resíduos sólidos em todo o mundo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na conclusão deste estudo, fica evidente que foi possível atingir com sucesso os objetivos estabelecidos previamente.

Foi realizada com êxito a elaboração de um o cenário base simulado, o qual foi o pilar central para a realização de todas as análises subsequentes, baseado em um município real, dessa forma foi possível obter dados sólidos e mais fiéis à realidade para que as análises pudessem ser conduzidas.

Além disso, foram propostos e estruturados com êxito quatro cenários que representam diferentes níveis de reciclagem de resíduos sólidos urbanos, partindo de uma baixa reciclagem para uma reciclagem muito alta.

As Metodologias WARM e MDL foram aplicadas e comparadas com êxito com a finalidade de quantificar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em cada cenário proposto, permitindo que se chegasse a conclusão de que, se tratando de medições mais minuciosas e detalhistas, a metodologia WARM é a mais adequada, porém, para medições mais diretas e voltadas a obtenção de créditos de carbono, a metodologia MDL é mais eficiente.

A avaliação do impacto quantitativo da reciclagem na redução de emissões de GEE também pôde ser realizada, fornecendo informações de grande valor sobre seu papel na sustentabilidade ambiental. Dessa forma, de acordo com os dados apresentados nas seções anteriores, ficou evidente que um aumento na adoção da reciclagem como modelo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos resulta em um aumento significativo nas emissões de GEE evitadas, chegando a um valor de emissões evitadas de pelo menos 82 toneladas de CO₂ equivalente, considerando os dados obtidos no pior cenário possível, e, chegando a um valor de até 11.000 milhões de toneladas de CO₂ equivalente evitadas ao se considerar o melhor cenário.

Além disso, foi avaliada a eficácia das metodologias WARM e MDL em quantificar as emissões de GEE, identificando suas vantagens e limitações. Essa análise comparativa entre as metodologias permitiu uma maior compreensão sobre como elas funcionam em diferentes contextos. Dessa forma, com base nos resultados obtidos ao final das simulações, fica evidente que a metodologia WARM é mais adequada para caracterizações mais detalhistas das emissões associadas ao modelo de gerenciamento adotado. Porém, o alto nível de dificuldade para a sua utilização, devido a vasta gama de critérios considerados, e a falta

de caracterizações para cenários que não sejam Estadunidenses, tornam sua aplicação pouco prática.

Já para a metodologia MDL foi possível constatar exatamente o contrário do que se obteve para a metodologia WARM, ou seja, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo se mostrou menos detalhista e mais superficial quanto a sua caracterização, porém, seu uso é mais prático e facilitado, voltado para análises relativamente mais rápidas, com o foco na obtenção de créditos de carbono.

O estudo também oferece insights relevantes sobre o impacto da reciclagem de materiais específicos na redução de emissões de GEE, dessa forma, foi possível levantar o potencial de redução de emissões que a reciclagem de cada material abordado proporciona, e, posteriormente, criar um ranking que identifica os materiais que, quando reciclados, trazem o maior benefício quanto a redução de emissões de GEE, sendo estes o metal e o papel, e quais possuem um menor impacto ao serem reciclados, sendo o menor impacto associado a reciclagem do vidro, o que pode orientar práticas mais sustentáveis no futuro.

7. RECOMENDAÇÕES

Abaixo estão apresentadas recomendações e propostas com o intuito de trazer melhorias.

7.1. WARM

Se tratando do modelo WARM, foi possível observar certos aspectos da metodologia que, caso adaptados ou reestruturados, resultariam em uma melhoria significativa do modelo. O ponto principal a ser considerado para um incremento considerável da metodologia é a reestruturação do modelo de entrada de massas, sendo que, visando tornar o modelo mais funcional, seria de extrema funcionalidade um aumento na diversidade e flexibilidade deste processo. Uma vez que foi possível observar uma despadronização quanto aos métodos de classificação dos resíduos, realizados por diferentes entidades, a inserção de novas formas de classificação de resíduos, com um cálculo adaptado de emissões para cada nova categoria, seria de grande utilidade para que fosse possível a comparação entre cenários que envolvam diferentes formas de classificação de resíduos. Uma possibilidade que visa dar suporte à proposta anterior e oferecer mais funcionalidades ao modelo proposto seria a inserção de uma

nova métrica, sendo essa o nível de erro associado aos resultados obtidos, dessa forma, quanto mais generalista o cenário, maior a taxa de erro, tornando um cenário mais específico, menos suscetível a erros.

Outro ponto a ser avaliado seria a globalização do modelo, isto é, apresentar a possibilidade de caracterização de cenários que correspondam à realidade de diversos países, diferente do que é realizado no modelo atual, cujos inputs são utilizados em cálculos que consideram a realidade Americana como base, podendo resultar em divergências significativas quando se tratam de países cuja realidade é muito díspar do país norte americano.

7.2. MDL

A metodologia MDL aplicada para a avaliação dos cenários escolhidos demonstrou ser uma ferramenta versátil e ágil no fornecimento de uma visão geral das condições de reciclagem e estimativa das emissões evitadas de CO₂e. Sua simplicidade de aplicação e escalabilidade se destacam, permitindo uma rápida análise das situações locais. No entanto, é importante ressaltar que, embora a metodologia seja de fácil aplicação, pode requerer adaptações específicas para atender às peculiaridades dos locais em que está sendo empregada. Isso ressalta a necessidade de considerar as particularidades do ambiente e personalizar a metodologia conforme necessário, o que foi realizado pela ANCAT no contexto brasileiro por exemplo.

Uma das principais vantagens dessa abordagem é a identificação dos principais materiais recicláveis, com foco em plástico, papel, vidro e metais. No entanto, existe a possibilidade de aprimoramento ao segmentar ainda mais esses materiais, possibilitando uma análise mais detalhada e aprofundada.

Por outro lado, é importante reconhecer que, devido à natureza generalista da metodologia, os valores obtidos podem ser mais abrangentes do que precisos. Isso significa que as conclusões podem ser mais brandas em termos de detalhamento e precisão. Portanto, ao utilizar essa abordagem, é essencial ter em mente suas limitações e considerar a combinação de outras técnicas ou dados específicos para uma avaliação mais acurada.

7.3. Geral

Por fim, visando aprimorar ambas as metodologias aplicadas no trabalho em questão, e proporcionar ferramentas mais refinadas e apropriadas para a condução de estudos que se proponham a nortear projetos de redução de emissões de GEE no futuro, recomenda-se que sejam conduzidos novos estudos críticos que se aprofundem nas variáveis consideradas por cada metodologia, propondo ao final dessas investigações, mudanças e melhorias em ambas as ferramentas, tornando-as cada vez mais lapidadas, eficientes e condizentes com a realidade do mundo atual.

Fica claro que a cada dia novas ferramentas cada vez mais eficazes surgem no âmbito da contabilização de emissões de GEE, no entanto, mesmo diante desse progresso significativo, é fundamental reconhecer que sempre existe espaço para melhorias, tornando os esforços por um mundo mais sustentável, cada dia mais urgentes, ainda mais eficazes e significativos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) - **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Disponível em: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil

ABS (Australian Bureau of Statistics) - **Waste Account Australia**: Experimental Estimates. Disponível em:
<https://www.abs.gov.au/statistics/environment/environmental-management/waste-account-australia-experimental-estimates/latest-release>. Acesso em: Setembro de 2023.

ALMEIDA, R. F. et. al - **Emissão de Óxido Nitroso em Solos com Diferentes Usos e Manejos**: Uma Revisão. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente. 2015.

ANCAT - Associação Nacional dos Catadores. **Anuário de Reciclagem 2021**.

APAC - Agência Pernambuco de Águas e Clima. Precipitação média por município. Disponível em:
<https://www.apac.pe.gov.br/193-climatologia/521-climatologia-por-municipio>. Acesso em: Setembro de 2023.

Australian Department of the Environment and Energy - **2017-18 Australian Plastics Recycling Survey**: National report. Disponível em:
<https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/australian-plastics-recycling-survey-report-2017-18.pdf>

BBC - **Eunice Foote**: a feminista que descobriu o efeito estufa e foi esquecida, agora homenageada pelo Google. Disponível em:
<https://www.bbc.com/portuguese/articles/cqv816ewjx7o>

BBC - **Lixo Industrial e Renda**: Lixo Industrial Gera Renda Quando Manejo é Feito em Rede. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-57775100>

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Brasília. DF: Diário Oficial da União, 2010.

CARVALHO, J. F. **Combustíveis Fósseis e Insustentabilidade**. 2008. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300011

CEMPRE (Compromisso Empresarial para a Reciclagem) - **Taxas de Reciclagem**.

Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual do MDL: para desenvolvedores de projetos e formuladores de políticas. 2006.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) - **Emissões de gases de efeito estufa no setor energético: Emissões fugitivas na Mineração e Beneficiamento do Carvão Mineral**. 2010.

CORDEIRO, S. A et. al., Etapas e Custos dos Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL. Revista Agrogeoambiental. Abr. 2010.

COSTA, H.B.C. Aspectos econômicos da reciclagem de materiais, CTC/UFSC – Departamento de Engenharia Mecânica. Publicado no CIMM, 2002.

ENEH. A.E.O., OLUIGBO, S.N. Mitigating the impact of climate change through waste recycling. Research Journal of Environmental and Earth Sciences. 2012.

EPA - Environmental Protection Agency. Basic Information about the Waste Reduction Model (WARM). 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/warm/basic-information-about-waste-reduction-model-warm>. Acesso em: Agosto de 2023.

EPA - Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/climfold.pdf>. Acesso em 25 de Outubro de 2023.

EPA - Environmental Protection Agency. Waste Reduction Model (WARM). Disponível em: <https://www.epa.gov/warm>. Acesso em Outubro de 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Científica. Estudos EPE: Potencial de Redução de Emissões de CO₂ em Projetos de Produção de Biocombustíveis. Brasil. 2004.

FRONDIZI, L. R. M. I. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Guia de Orientação 2009. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio: FIDES, 2009.

G1 - Mudança Climática Inédita Acontece desde 1850, dizem cientistas. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/07/mudanca-climatica-inedita-acontece-desde-1850-dizem-cientistas.html>

Governo do Brasil - **Índice de Reciclagem de Latas de Alumínio**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2022/04/indice-de-reciclagem-de-latas-de-aluminio-chega-a-99-e-brasil-se-destaca-como-recordista-mundial>

Integrated Carbon Observation System (ICOS) - About Greenhouse Gases. Disponível em: <https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/climate-change/ghgs#:~:text=Sources%20of%20greenhouse%20gases&text=Natural%20sources%20include%20respiration%20and,are%20synthetic%2C%20human%2Dmade>.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. Alterações Climáticas 2013: A base científica.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. AR5 Working Group I Summary for Policymakers. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/03/ar5_wg1_spm.pdf

JORNAL DA USP. Lixo industrial gera renda quando manejo é feito em rede. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-humanas/lixo-industrial-gera-renda-quando-manejo-e-feito-em-rede/#:~:text=Ap%C3%B3s%20a%20revolu%C3%A7%C3%A3o%20industrial%20houve,correto%20desses%20res%C3%ADduos%20continua%20pequena>. Acesso em: Outubro de 2023.

LIMA, G. C. G. - “**Modelo de valoração ambiental da reciclagem de resíduos sólidos urbanos**”. Universidade Federal de Pernambuco. 2012.

MAGNE, A. A. C.; GUNTHER, W. M. R. - “**A coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos e o programa de gerenciamento de resíduos sólidos**”. 2014. Disponível em:
<https://www.scielo.org/pdf/sausoc/2014.v23n1/146-156/pt>.

MAGNI, A.A.C., GUNTHER, W.M.R. Cooperativas de catadores de materiais recicláveis como alternativa à exclusão social e sua relação com a população de rua. Saúde Soc. São Paulo, v. 23, n. 1, p.146-156. 2014.

MASSI, E. H.G., LUIZ, L. A. C., MASSI, C. G. Valoração Ambiental da Reciclagem para a redução de emissões de CO₂. Revista Técnico-Científica do CREA-PR. Ed. 19. 2019.

MENEGUELLO, L. A.; CASTRO, M. C. A. A. de. O Protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo. Revista Interações (Campo Grande), Campo Grande, v. 8, n. 1, mar. 2007.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA , TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Disponível em:
https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_desenvolvimento_limpo/Mecanismo_de_Developmento_Limpo.html. Acesso em 03 de novembro de 2023.

Ministério Público do Estado de Goiás - **Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Disponível em:
<https://www.mpggo.mp.br/portal/noticia/mecanismos-de-desenvolvimento-limpo-mdl>.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Protocolo de Quioto. Disponível em:
<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>. Acesso em Setembro de 2023.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R.. Protocolo de Quioto e as possibilidades de

inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. Revista Contexto internacional., Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, abr. 2008

NEI - Nuclear Energy Institute. State Electricity Generation Fuel Shares. 2022. Disponível em: <https://www.nei.org/resources/statistics/state-electricity-generation-fuel-shares>. Acesso em: Setembro de 2023.

NERC - North East Recycling Council. A brief history of recycling. Disponível em: <https://nerc.org/news-and-updates/blog/nerc-blog/2019/11/19/a-brief-history-of-recycling>. Acesso em: Outubro de 2023.

NICHOLSON et. al., Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with plastics consumption. Joule. 2021.

OBSERVATÓRIO DA INDÚSTRIA. Pernambuco ocupa posição de destaque na corrida do H2V. SENAI-PE. Março, 2022. Disponível em: <https://observatorio.sistemafiepe.org.br/pernambuco-ocupa-posicao-de-destaque-na-corrida-do-h2v/#:~:text=Em%20opera%C3%A7%C3%A3o%2C%20atualmente%2C%2057%25,a%20partir%20de%20usinas%20termel%C3%A9tricas>. Acesso em: 25 de Outubro de 2023.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) - **Global Plastic Outlook**. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/oecd/about>

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) - **About OECD**. Disponível em: <https://www.oecd.org/about/>

"Os Aterros Sanitários Desativados e o Sistema de Áreas Verdes da Cidade de São Paulo: Possibilidade de Integração". Disponível em: <file:///C:/Users/lucas.vassoler/Downloads/61308-Texto%20do%20artigo-79004-1-10-20130821.pdf>.

PEREIRA, A. S.; OLIVEIRA, L. B.; REIS, M. M. Emissões de CO2 Evitadas e Outros Benefícios Econômicos e Ambientais Trazidos pela Conservação de Energia Decorrente da Reciclagem de Resíduos Sólidos no Brasil. In: Anais... III Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica; 1999; Recife [CD-ROM].

PICANÇO, A.P., et. al. Comparação da política nacional de resíduos sólidos - PNRS, com as legislações internacionais

REVISTA AIDIS - Gestão e hierarquização de rotas tecnológicas de resíduos sólidos urbanos: um estudo de caso do Brasil. Vol 13, Nº 3, 851-867. Dezembro de 2020.

SANTOS, F.F. et. al. Atores da cadeia de reciclagem: influência e impactos na atividade de triagem de materiais em uma cooperativa de Sorocaba-SP. Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA. São Paulo, v. 10, n. 3, p.85-101. 2016.

SCRAPP. How much CO2 is saved by recycling. Disponível em: <https://www.scrapprecycling.com/post/recycling-co2>. Acesso em: 31 de Outubro de 2023.

Secretaria-Geral da Presidência da República - **Programa Pró-Catadores**. Disponível em: <https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/programa-pro-catadores>.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Conheça a indústria de reciclagem de materiais. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/conheca-a-industria-de-reciclagem-de-materiais,d279efcb3a6b8810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em Outubro de 2023.

SEIFFERT, M. E. B. Gestão ambiental: instrumentos, esferas de ação e educação ambiental. 1 ed. São Paulo. Atlas, 2009.

SENSONEO. Global Waste Index 2022: These are the biggest waste producers in the world. Disponível em: <https://sensoneo.com/global-waste-index/>. Acesso em: Setembro de 2023.

SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos Pernambuco-PE. 2021. Disponível em: <https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/estadual/index.php?ibge=26&ano=2020>. Acesso em: 23 de Outubro de 2023.

SOUZA, M.T.S., DE PAULA, M.B., PINTO, H.S. O papel das cooperativas de reciclagem nos canais reversos pós-consumo. Revista Administração de Empresas. 2012.

Status do Projeto MDL no Brasil - Janeiro 2016. Disponível em:
file:///C:/Users/lucas.vassoler/Downloads/Status-janeiro-2016.pdf.

STUERMER, M.M.; BROCANELI, P.F.; VIEIRA, M.E.M. Os aterros sanitários desativados e o sistema de áreas verdes da cidade de São Paulo: Possibilidade de integração. 2011.

THE GUARDIAN. Pompeii ruins show that the Romans invented recycling. 2020.

Disponível em:

<https://www.theguardian.com/science/2020/apr/26/pompeii-ruins-show-that-the-romans-invented-recycling>. Acesso em: Outubro de 2023.

THE PUBLIC DOMAIN REVIEW. First paper to link CO₂ and global warming, by Eunice Foote (1856). Disponível em:

<https://publicdomainreview.org/collection/first-paper-to-link-co2-and-global-warming-by-eunice-foote-1856/>. Acesso em: Outubro de 2023.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change - **What is the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Disponível em:

<https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>.

UNEP - United Nations Environment Programme - **Recycling Rates of Metals: A Status Report**. 2011. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8702>

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - História do Lixo. Disponível em:

<https://www.ufmg.br/proex/geresol/lixohistoria.htm>. Acesso em: Setembro de 2023.

UNIVASF - Universidade Federal do Vale do São Francisco. Filme plástico é reciclável?. 2019. Disponível em:

<https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/filme-plastico-e-reciclavel>. Acesso em: Outubro de 2023.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) - Basic Information about Waste Reduction Model (WARM). Disponível em:

<https://www.epa.gov/warm/basic-information-about-waste-reduction-model-warm>.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) - **Waste Reduction Model (WARM) - 2018**

Tables and Figures. Disponível em:

https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_tables_and_figures_dec_2020_fnl_508.pdf

World Wide Fund for Nature (WWF) - Efeito Estufa e Mudanças Climáticas. Disponível em:

https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/efeitoestufa_e_mudancasclimaticas. Acesso em: Outubro de 2023.