



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Ciências Aplicadas



ALAN MIGUEL PUFF

**PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE TÉCNICAS  
DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS  
BASEADO NAS METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS**

LIMEIRA

2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Ciências Aplicadas



ALAN MIGUEL PUFF

**PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE TÉCNICAS  
DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS  
BASEADO NAS METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS  
SÓLIDOS**

*Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura na área de Pesquisa Operacional e Gestão de Processos.*

*Orientadora:* Profa. Dra. Muriel de Oliveira Gavira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO  
DEFENDIDA PELO ALUNO ALAN MIGUEL PUFF E ORIENTADA PELA  
PROFA. DRA. MURIEL DE OLIVEIRA GAVIRA

LIMEIRA

2024

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas  
Ana Luiza Clemente de Abreu Valério - CRB 8/10669

P963p Puff, Alan Miguel, 1990-  
Proposta de um modelo de otimização de técnicas de disposição final de resíduos sólidos urbanos baseado nas metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos / Alan Miguel Puff. – Limeira, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Muriel de Oliveira Gavira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Gestão integrada de resíduos sólidos. 2. Modelagem matemática. 3. Pesquisa operacional. 4. Sustentabilidade. I. Gavira, Muriel de Oliveira, 1978-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Proposal for an optimization model of urbano solid waste disposal techniques based on the goals of the National Solid Waste Plan

**Palavras-chave em inglês:**

Integrated solid waste management

Mathematical modeling

Operations research

Sustainability

**Área de concentração:** Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

**Titulação:** Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura

**Banca examinadora:**

Muriel de Oliveira Gavira [Orientador]

Robert Eduardo Cooper Ordonez

Clauciana Schmidt Bueno de Moraes

**Data de defesa:** 19-08-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia de Produção e de Manufatura

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0008-0595-8505>

- Currículo Lattes do autor: <https://lattes.cnpq.br/7798270748874554>

## Folha de Aprovação

**Autor:** Alan Miguel Puff

**Título:** Proposta de um Modelo de Otimização de Técnicas de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos Baseado nas Metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

**Natureza:** Dissertação

**Área de Concentração:** Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

**Instituição:** Faculdade de Ciências Aplicadas – FCA/Unicamp

**Data da Defesa:** Limeira-SP, 19 de agosto de 2024.

### BANCA EXAMINADORA:

---

Profa. Dra. Muriel de Oliveira Gavira (orientador)  
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

---

Prof. Dr. Robert Eduardo Cooper Ordoñez (membro externo)  
Faculdade de Ciências Aplicadas - FCA/Unicamp

---

Profa. Dra. Clauciana Schmidt Bueno de Moraes (membro externo)  
Universidade Estadual Paulista - UNESP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço à minha esposa Maria Eduarda e minha filha Alice por serem a força motriz dos meus dias. É em vocês que encontro o sorriso das minhas alegrias, o conforto nas minhas tristezas e meu propósito na vida.

Aos meus pais Sandra e Giovani, por todo esforço e dedicação na minha criação e por sempre serem grandes incentivadores da minha educação.

À professora dra. Muriel de Oliveira Gavira, minha orientadora neste trabalho, que desde minhas primeiras aulas no programa de mestrado despertou minha atenção ao tema de sustentabilidade e trouxe inestimável contribuição e direção na elaboração desta pesquisa.

Aos meus grandes amigos/irmãos/companheiros de banda Smurfi e Xiristen, pelos quase 20 anos de amizade e as diversas risadas e aprendizados que tivemos juntos nessa caminhada.

Ao professor dr. Andreas Wilke da Offenburg Hochschule, que no início da minha vida profissional foi meu orientador e me deu importantes conselhos, principalmente sobre confiar em mim mesmo. Este trabalho é também o cumprimento de uma promessa a ele.

À minha equipe na Wingfan Brasil, que hoje contempla Aharon, Ana, Bruno, Éder, Giovanne, Heitor, João, Jobinho, Márcio, Mateus, Najara, Nisa, Paulo, Ricardo e Suzan. Agradeço o companherismo e o quanto aprendo diariamente com vocês.

Agradeço também meu chefe, Mr. Hogrefe, por acreditar no meu potencial, confiar nas minhas capacidades e me proporcionar oportunidades de crescimento.

Aos professores dra. Clauciana Schmidt Bueno de Moraes e dr. Robert Eduardo Cooper Ordoñez, membros da banca examinadora e que trouxeram importantes contribuições para este trabalho na etapa de qualificação do mesmo.

À UNICAMP pela oportunidade de realizar esta importante etapa que trouxe tanta contribuição a minha vida pessoal e profissional.

A todos meus demais familiares e amigos e também pessoas que contribuíram e me auxiliaram na elaboração deste trabalho.

*“Por vezes é penoso cumprir o dever,  
mas nunca é tão penoso como não cumpri-lo”*

Alexandre Dumas

## RESUMO

Este trabalho aborda os desafios enfrentados pelo Brasil em seu sistema de gestão de resíduos sólidos, destacando as metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Apesar das diretrizes existentes, ainda persiste a falta de consenso sobre as melhores técnicas para alcançá-las de forma eficaz. Diante da urgência para transição para técnicas mais sustentáveis, torna-se crucial a criação de um planejamento que defina quais métodos são mais adequados para o tratamento e disposição final dos resíduos sólidos no Brasil, considerando tanto aspectos da base tripla da sustentabilidade. O objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático destinado a otimizar a utilização do conjunto de técnicas para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos no contexto brasileiro, visando atingir as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos e auxiliar à implementação de abordagens mais sustentáveis, como a compostagem e a reciclagem, que têm sido subutilizadas. Através da utilização de modelagem matemática e programação linear, este trabalho identifica quais técnicas são mais apropriadas em três diferentes cenários, considerando minimização de custos operacionais, redução de emissões de gases causadores do efeito estufa e aumento do potencial de geração energética através da utilização de resíduos sólidos urbanos. Este trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento das práticas de gestão de resíduos sustentáveis no país, propondo soluções embasadas em técnicas de modelagem matemática e pesquisa operacional, com potencial para orientar políticas públicas em direção a uma gestão mais sustentável e eficiente. O modelo foi validado para três cidades brasileiras e mostrou-se eficaz em endereçar todas as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, incluindo a eliminação de lixões e aterros controlados, a promoção da reciclagem e compostagem, e o aumento da recuperação energética.

**Palavras-Chave:** Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos, Modelagem Matemática, Pesquisa Operacional, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

This work addresses the challenges faced by Brazil in its solid waste management system, highlighting the goals established by the National Solid Waste Management Plan. Despite existing guidelines, there remains a lack of consensus on the most effective techniques to achieve these goals. Given the urgency to make the transition to more sustainable techniques, the creation of a plan that defines the most appropriate methods for the treatment and final disposal of solid waste in Brazil is crucial, considering aspects of the triple bottom line of sustainability. The aim of this study is to propose a mathematical model aiming to optimize the use of techniques for the treatment and final disposal of solid waste in the Brazilian context, with the goal of achieving the targets set by the National Solid Waste Management Plan and promoting the implementation of more sustainable approaches such as composting and recycling, which have been underutilized. Through the use of mathematical modeling and linear programming, this research identifies which techniques are most suitable in three different scenarios, considering operational cost minimization, reduction of greenhouse gas emissions, and increase of the potential for energy generation from urban solid waste. This study seeks to contribute to the advance of knowledge in sustainable waste management practices in the country, proposing solutions based on mathematical modeling and operational research techniques, with the potential to guide public policies towards a more sustainable and efficient management approach. The model was validated for three Brazilian cities and proved to be effective in addressing all the goals of the National Solid Waste Plan, including the elimination of dumps and controlled landfills, the promotion of recycling and composting, and the increase in energy recovery.

**Keywords:** Municipal Solid Waste Management, Mathematical Modeling, Operational Research, Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustrações do Conceito de Base Tripla da Sustentabilidade .....	29
Figura 2 – Escada de Lansink – Hierarquia da Gestão de Resíduos.....	34
Figura 3 – Sistema Jurídico-Ambiental de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	42
Figura 4 – Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos na União Europeia, 1995-2020...	45
Figura 5 – Classificação da Pesquisa do Trabalho.....	50
Figura 6 – Interface do Solver do Microsoft Excel.....	54
Figura 7 – Total de Resíduos Gerados e por habitante no Brasil em 2022.....	56
Figura 8 – Frações de Resíduos com Disposição Final Adequada e Inadequada no Brasil em 2022.....	56
Figura 9 – Estimativa de Crescimento Populacional, de PIB e de geração de resíduos até 2040 .....	56
Figura 10 – Composição dos RSU Gerados no Brasil.....	58
Figura 11 – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Maio/2022 até Março/2024 .....	64
Figura 12 – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Outubro/2016 até Março/2024 .....	68
Figura 13 – Taxas e Tarifas Praticados pela Concessionária CPFL de São Paulo .....	69
Figura 14 – Proporções de Recuperação de Materiais Recicláveis Secos em 2021 .....	70
Figura 15 – Preços Médios de Materiais Recicláveis Secos em 2021 .....	71
Figura 16 – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Dezembro/2021 até Março/2024 .....	72
Figura 17 – Modelo Conceitual Baseado para Elaboração do Modelo Matemático .....	74
Figura 18 – Fluxograma do Modelo Matemático Proposto .....	75
Figura 19 – Fluxograma do Modelo Matemático Proposto Com Correntes Adicionais .....	79
Figura 20 – Representação de Fluxograma de Modelagem, Resolução e Validação de um problema .....	91
Figura 21 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de custos .....	100
Figura 22 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de custos.....	100

Figura 23 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário minimização de emissões.....	105
Figura 24 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário minimização de emissões .....	105
Figura 25 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de potencial de geração energética.....	110
Figura 26 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de potencial de geração energética .....	111
Figura 27 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de custos .....	120
Figura 28 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de custos .....	120
Figura 29 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário minimização de emissões.....	125
Figura 30 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário minimização de emissões.....	125
Figura 31 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de potencial de geração energética .....	130
Figura 32 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de potencial de geração energética .....	130
Figura 33 – Composição Gravimétrica Simplificada do Município de Valinhos.....	135
Figura 34 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de custos .....	138
Figura 35 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de custos .....	138
Figura 36 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário minimização de emissões.....	143
Figura 37 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário minimização de emissões .....	143
Figura 38 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de potencial de geração energética.....	148
Figura 39 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de potencial de geração energética.....	148

Figura 40 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos .....	154
Figura 41 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos .....	154
Figura 42 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, Cenário Minimização de Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa .....	157
Figura 43 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos .....	157
Figura 44 – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, cenário otimização de potencial de geração energética .....	160
Figura 45 – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, cenário otimização de potencial de geração energética .....	161

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das Quantidades de RSU gerados em 2022 e estimativa para 2040.....	57
Tabela 2 - Projeção de Cada Tipo de Resíduo para 2040 .....	58
Tabela 3 - Resumo das Quantidades de RSU gerados em 2021 e 2022 e Metas do PNRS para 2040.....	60
Tabela 4 - Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Triagem de Reciclados por Faixa de Capacidade de Operação .....	62
Tabela 5 – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Compostagem por Faixa de Capacidade de Operação.....	62
Tabela 6 – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Digestão Anaeróbica por Faixa de Capacidade de Operação .....	62
Tabela 7 – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Incineração por Faixa de Capacidade de Operação.....	63
Tabela 8 – Resumo dos Custos Operacionais de um Aterro Sanitário por Faixa de Capacidade de Operação .....	63
Tabela 9 – Resumo dos Custos Estimados por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final.....	64
Tabela 10 – Valores Corrigidos para o Resumo dos Custos Estimados por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final.....	65
Tabela 11 – Resumo das Estimativas de Emissões por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final .....	66
Tabela 12 – Resumo do Potencial Energético por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final.....	67
Tabela 13 – Resumo do Potencial de Faturamento por Geração de Energia por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final.....	69
Tabela 14 – Resumo dos Dados de Proporção de Recuperação e Valor Médio Nacional por Quilograma de Cada Tipo de Material Reciclável Seco .....	71
Tabela 15 - Compatibilidade entre os tipos de resíduos sólidos urbanos e as técnicas de disposição final .....	75
Tabela 16 - Resultado do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB .....	95
Tabela 17 - Resultados Ajustados do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB .....	96

Tabela 18 - Resultados Agrupados do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB .....	97
Tabela 19 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Cabedelo-PB .....	102
Tabela 20 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Cabedelo-PB .....	107
Tabela 21 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Cabedelo-PB.....	113
Tabela 22 - Resultado do Estudo de Gravimetria do Município de Adrianópolis-PR.....	116
Tabela 23 - Resultados Agrupados do Estudo de Gravimetria do Município de Adrianópolis-PR.....	117
Tabela 24 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Adrianópolis-PR.....	122
Tabela 25 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Adrianópolis-PR .....	127
Tabela 26 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Adrianópolis-PR .....	132
Tabela 27 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Valinhos-SP .....	140
Tabela 28 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Valinhos-SP .....	145
Tabela 29 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Valinhos-SP .....	150
Tabela 30 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados Nacionais .....	156
Tabela 31 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados Nacionais.....	159
Tabela 32 - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados Nacionais.....	163
Tabela 33 - Resumo dos Dados de Saída de Custos, Emissões e Potencial Energético para os Cenários Propostos.....	163

Tabela 34 - Resumo da Participação de cada Técnica nos Cenários Propostos .....	165
Tabela 35 - Resumo das Correntes de Massa para Cada Cenário Proposto .....	168

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABRELPE</b>	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
<b>CONRESOL</b>	Consortio Intermunicipal para Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>IPCA</b>	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
<b>MDR</b>	Ministério do Desenvolvimento Regional
<b>PLANARES</b>	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<b>RSU</b>	Resíduos Sólidos Urbanos
<b>SISNAMA</b>	Sistema Nacional de Meio Ambiente
<b>SNVS</b>	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
<b>SUASA</b>	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária
<b>WCED</b>	<i>World Commission on Environment and Development</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1. OBJETIVO GERAL DO TRABALHO.....	21
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
1.3. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	22
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1. SUSTENTABILIDADE .....	24
<b>2.1.1. Desenvolvimento Sustentável.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.2. Base Tripla da Sustentabilidade.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3. Modelagem Matemática na Sustentabilidade .....</b>	<b>30</b>
2.2. GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	31
<b>2.2.1. Técnicas de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos.....</b>	<b>36</b>
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL.....	41
<b>2.3.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.2. Plano Nacional de Resíduos Sólidos .....</b>	<b>46</b>
<b>3. MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
3.1. ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO.....	50
3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO E MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	52
<b>4. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL .....</b>	<b>55</b>
4.1. CENÁRIO ATUAL E PROSPECÇÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.....	55
4.2. COMPOSIÇÃO DOS RSU GERADOS NO BRASIL.....	57
4.3. METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	59
4.4. CARACTERÍSTICAS DE BALANÇO DE MASSA DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	60
4.5. CUSTOS DE OPERAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	61
4.6. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	65
4.7. POTENCIAL ENERGÉTICO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	66
4.8. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM.....	67
4.9. CARACTERÍSTICAS FINANCEIRAS RELACIONADAS A ENERGIA ELÉTRICA .....	68

4.10.	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS RECICLÁVEIS SECOS.....	70
<b>5.</b>	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>73</b>
5.1.	BALANÇO DE MASSA .....	74
5.2.	RESTRIÇÕES COM BASE NAS METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	83
5.3.	DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL .....	85
5.4.	RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL .....	87
5.5.	DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA.....	87
5.6.	RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES ESTUFA .....	88
5.7.	DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO ENERGÉTICA .....	89
5.8.	RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO ENERGÉTICA .....	90
<b>6.</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>91</b>
6.1.	TESTE DE HIPÓTESES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	92
6.2.	SELEÇÃO DE CIDADES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	93
6.3.	VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE CABEDELO-PB .....	94
6.4.	VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE ADRIANÓPOLIS-PR.....	115
6.5.	VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE VALINHOS-SP .....	134
<b>7.</b>	<b>SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS.....</b>	<b>153</b>
7.1.	SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS .....	153
7.2.	SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA .....	156
7.3.	SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO ENERGÉTICA .....	159
7.4.	RESULTADOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS .....	163
7.5.	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS CONJUNTOS DE TÉCNICAS SELECIONADAS PARA CADA CENÁRIO.....	165
7.6.	COMPARATIVO DAS CORRENTES DO MODELO SELECIONADAS PARA CADA CENÁRIO .....	167

7.7.	IMPACTO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS NAS METAS DO PLANARES ....	170
7.8.	RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS .....	176
7.8.1.	<b>Principais Benefícios</b> .....	<b>176</b>
7.8.2.	<b>Principais Obstáculos</b> .....	<b>177</b>
7.8.3.	<b>Impacto do Modelo na Base Tripla da Sustentabilidade</b> .....	<b>177</b>
8.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>180</b>
8.1.	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	181
8.2.	PESQUISAS FUTURAS .....	182
9.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>184</b>

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil publicado por ABRELPE (2023), em 2022 o Brasil gerou quase 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, o que significa que cada brasileiro gerou em média 1,04kg por dia ou 381kg por ano, sendo que quase 30 milhões de toneladas (cerca de 39% do total) tiveram disposição final inadequada, como por exemplo, lixões e aterros controlados, que não possuem todas as condições sanitárias de operação de um aterro sanitário.

Segundo ABRELPE (2015), lixões geram importantes impactos na saúde e no meio ambiente, causados, por exemplo, pelas emissões e efluentes gerados pela decomposição do volume de resíduos, conhecidas como chorume e biogás. Segundo reportagem do ESTADÃO (2023), que entrevistou Antonis Mavropoulos, coordenador de estudo realizado pela International Solid Waste Association, estima-se que entre 2016 e 2021, os lixões em todo Brasil tenham causado um prejuízo na ordem de US\$3,25 a 4,65 bilhões, divididos entre custos de recuperações ambientais de áreas contaminadas e de atendimentos de saúde pública por conta de doenças transmitidas por vetores presentes nos lixões. É ainda mencionado também que com este montante econômico, o país poderia ter fechado todos os lixões e modernizado significativamente o seu sistema de gestão de resíduos.

A utilização de lixões passou a ser proibida pela Lei dos Resíduos Sólidos de 2010 (BRASIL, 2010), que criou a meta de extinguir o uso dos lixões até 2014. Após anos de insucessos no cumprimento desta meta, em 2020 a mesma foi revisada prevendo encerramentos graduais da utilização de lixões de acordo com o tamanho da população dos municípios, sendo que o novo prazo final para encerramento de todos lixões ficou estipulado para 2024.

De acordo com ABRELPE (2023), cerca de 60% dos resíduos, tiveram como disposição final aterros sanitários, método considerado ambientalmente adequado em relatórios, porém, a Lei dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) define destinação final ambientalmente adequada de resíduos como:

“destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras

destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010, s.p.)

Para os rejeitos, a mesma lei define a destinação final ambientalmente adequada como:

“distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos” (BRASIL, 2010, s.p.)

Observa-se, portanto, que a utilização de aterros é considerada ambientalmente adequada para rejeitos, que a lei define como: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010, s.p.) e não para resíduos que possuem potencial de reciclagem ou de aproveitamento energético. Com base no baixo aproveitamento dos potenciais de resíduos que a utilização de aterros sanitários promove, a *European Environment Agency* (2019) menciona a diretriz europeia de aterramento de resíduos sólidos urbanos de 1999 que trouxe como metas a redução significativa da disposição final de resíduos biodegradáveis em aterros e também a limitação da utilização de aterros para no máximo 10% do total de resíduos sólidos urbanos gerados até 2035.

Portanto, fica evidente a necessidade da aplicação de novas tecnologias e técnicas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no Brasil, principalmente diante da estimativa do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) do Decreto Federal n. 11.043, de 13 de abril de 2022, que até a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil possa atingir cerca de 100 bilhões de toneladas por ano até 2040, como consequência do crescimento populacional e desenvolvimento econômico previsto para os próximos anos, o que representaria uma geração de cerca de 20% maior do que a atual. O PLANARES também traz diversas metas e orientações visando um sistema de gestão de resíduos sólidos mais sustentável, que serão mencionadas posteriormente neste trabalho.

Diante desta urgência de utilização de novas técnicas, evidencia-se também a necessidade da criação de um planejamento visando definir qual conjunto de técnicas e suas

respectivas participações seriam mais adequadas (principalmente do ponto de vista ambiental e econômico) para tratamento e disposição final dos resíduos sólidos gerados no Brasil, visando o cumprimento das metas do PLANARES.

A percepção da necessidade de criação deste planejamento define a pergunta de pesquisa que será trabalhada neste trabalho, sendo ela: Qual o conjunto de técnicas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos que melhor contribuem para as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos Brasileiro?

De forma mais específica, este trabalho apresentará três conjuntos de soluções informando quais técnicas e qual a capacidade anual deverá ser empregada com o intuito de otimizar três cenários diferentes: menor custo global de operação, menor nível de emissões de gases de efeito estufa e maior potencial de recuperação energética. Para tanto, será desenvolvido um modelo e simulação dos cenários otimizados.

## **1.1. OBJETIVO GERAL DO TRABALHO**

Desta forma, o objetivo geral é propor um modelo matemático para a otimização de conjunto de técnicas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos no cenário brasileiro para atingir as metas propostas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Os valores apresentados nas metas 3, 4, 6, 7 e 9 de resíduos sólidos urbanos listadas no PLANARES de BRASIL(2022) servem de base, na forma de restrições para o modelo matemático elaborado, para estabelecer três cenários diferentes: visando otimizar custos operacionais, emissões ou eficiência energética.

São identificadas quais técnicas de gestão de resíduos sólidos são mais adequadas para o objetivo proposto de cada cenário, além da participação de cada técnica no sistema de gestão de resíduos sólidos. As metas selecionadas para a elaboração do modelo matemático serão apresentadas com maior detalhe na seção 4.3 deste trabalho.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para tanto tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisa bibliográfica para levantamento das técnicas e variáveis para a construção dos cenários, aplicação e impacto das técnicas para cada tipo de resíduo;
- Pesquisa documental para coleta de dados da gestão atual de resíduos sólidos urbanos no Brasil, custos e dados operacionais das técnicas de disposição final de resíduos sólidos;
- Criação de modelo matemático base para os três cenários propostos;
- Validação do modelo por meio de teste de hipóteses através de dados obtidos de três municípios brasileiros;
- Simulação do modelo matemático aplicado ao cenário nacional e discussão dos resultados obtidos.

### **1.3. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

O Brasil ainda tem grandes desafios no que diz respeito ao seu sistema de gestão de resíduos sólidos e as metas propostas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

A inadequada gestão dos resíduos, além de representar perda de potenciais econômico e energético, ainda representa uma ameaça à sustentabilidade devido a impactos ambientais e sociais, como por exemplo, emissões de gases estufa, contaminações de solos, proliferações de doenças, entre outros.

Apesar das metas já propostas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022), ainda não há um consenso sobre qual o melhor conjunto de técnicas a ser utilizado afim de atingi-las. Atualmente, as ações mais representativas em termos de melhoria do sistema de gestão de resíduos sólidos se concentram principalmente na desativação de lixões com a conversão dos mesmos em aterros sanitários, todavia, analisando a base tripla da sustentabilidade, esta técnica não é a mais eficiente, e observa-se ainda avanços muito lentos na utilização de outras técnicas mais sustentáveis como a compostagem e a reciclagem.

Para um sistema de gestão de resíduos sólidos mais eficiente e sustentável, é necessária uma análise qualitativa e quantitativa de quais técnicas são mais adequadas para o cumprimento das metas estipuladas no PLANARES. Assim, este trabalho é relevante pois o modelo matemático desenvolvido é uma ferramenta que auxilia a tomada de decisões de gestores municipais em relação ao sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, visando o cumprimento das metas do PLANARES e também um sistema mais sustentável.

#### **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está organizado em outros sete capítulos, além desta introdução. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, que traz os principais conceitos e bases utilizados na elaboração do trabalho.

No capítulo 3 apresenta os aspectos metodológicos utilizados na elaboração de cada seção do trabalho. No capítulo 4 são fornecidos resultados de uma pesquisa documental, os dados que serão utilizados na elaboração do modelo matemático e nas simulações.

O capítulo 5 exhibe o processo de modelagem matemática para cada cenário proposto no trabalho.

O capítulo 6 traz a validação do modelo matemático através do método selecionado no trabalho.

O capítulo 7 trata das simulações e discussões dos resultados obtidos, discorrendo sobre os benefícios dos conjuntos de soluções encontrados para cada cenário, assim como realizando comparações entre os mesmos.

Finalmente, o capítulo 8 trata das conclusões do trabalho, suas limitações e possibilidades de desdobramento em novas pesquisas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos e definições que servirão como base para a elaboração desta pesquisa.

### 2.1. SUSTENTABILIDADE

Filho (2000) expressa a dificuldade de definir sustentabilidade (que continua sendo uma dificuldade até os dias atuais), uma vez que em pesquisa realizada, os entrevistados citaram que o conceito amplo e abstrato do termo é inclusive uma barreira para o atingimento dos objetivos necessários para sua implementação. Marshall e Toffel (2005), mencionam que devido a este fator, nos meados da década de 1990, haviam mais de 100 definições de sustentabilidade, o que quase levou o termo a não ter significado. Os mesmos autores mencionam que muitas empresas consideram sustentabilidade como simplesmente um novo termo para responsabilidade ambiental e de gestão de práticas laborais, enquanto outras organizações e autores sugerem que sustentabilidade é um conceito que engloba um vasto e diverso conjunto de objetivos, como eliminação da pobreza e transparência governamental.

Marshall e Toffel (2005) ainda citam uma consultoria dedicada à promoção de comunidades sustentáveis que sugere que:

"sustentabilidade está relacionada com a qualidade de vida em uma comunidade, ou seja, se os sistemas econômicos, sociais e ambientais que fazem parte da comunidade estão provendo uma vida saudável, produtiva e significativa para todos os residentes presentes e futuros da comunidade". (p. 1)

Mebratu (1998) menciona Thomas Robert Malthus, que em via dos problemas sociais causados pela Revolução Industrial, criou a Teoria Populacional Malthusiana, argumentando que o crescimento populacional ocorria em progressão geométrica enquanto os meios de subsistência aumentavam em progressão aritmética. De acordo com o autor, Malthus expressou o limite ambiental em termos da disponibilidade de terras aptas para agricultura, e

de acordo com sua teoria, o aumento populacional em conjunto com a fixada quantidade de terra disponível, resultaria em uma diminuição da capacidade de produção de alimentos per capita.

Segundo Goodland (1995), a maioria dos economistas da época em que o artigo foi escrito não concordava com os pensamentos de Malthus, e são mais simpáticos ao pensamento do otimismo tecnológico de David Ricardo, que acreditava que o progresso científico adiaria o momento em que o crescimento populacional esgotaria recursos disponíveis. Mebratu (1998) conclui ainda que Malthus não previu os avanços de inovações tecnológicas na agricultura que possibilitaram grande aumento de eficiência na produção de alimentos, a teoria Malthusiana que envolve um limite ambiental pode ser considerada como uma das precursoras para o conceito de desenvolvimento sustentável.

Mebratu (1998) menciona que na Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, realizada em 1972 em Estocolmo, foi reconhecida a importância do gerenciamento e avaliação ambiental como uma ferramenta de gestão, o que representou um grande passo na formação do conceito de desenvolvimento sustentável. O autor ainda menciona que nos anos seguintes da conferência, foram cunhados termos como "ambiente e desenvolvimento" e "desenvolvimento sem destruição", até que o termo "ecodesenvolvimento" apareceu em relatório do Programa Ambiental das Nações Unidas em 1978 e reconheceu-se internacionalmente que ideias de desenvolvimento e meio-ambiente precisavam ser consideradas simultaneamente.

Marshall e Toffel (2005) mencionam que com o tempo, passou-se a dar maior atenção aos ecossistemas e ao consumo de recursos naturais, citando o Relatório Brundtland das Nações Unidas de 1987 (também conhecido como Relatório Nosso Futuro Comum), que definiu desenvolvimento sustentável como sendo "desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações", definição que tem sido usada amplamente desde então e que tem aderência com a definição comum de sustentabilidade dos dicionários, que menciona a capacidade de manter algo em existência.

De acordo com Mebratu (1998), nesta conferência foi também definido o conceito de "necessidades", em particular as necessidades essenciais da população mais pobre do planet, que deveria ser dada grande prioridade de atenção. O autor menciona que desta forma, o

Relatório Brundtland definiu uma forte conexão entre diminuição da pobreza, melhoria ambiental e igualdade social através de crescimento econômico sustentável, e que o termo "desenvolvimento sustentável" teve melhor aceitação geral que o seu antecessor "ecodesenvolvimento".

De acordo com Marshall e Toffel (2005), os termos "sustentabilidade" e "desenvolvimento sustentável" ganharam notoriedade global após a conferência das Nações Unidas Rio-92 sobre o meio-ambiente do planeta. Mebratu (1998) menciona que a preparação para a conferência iniciou-se em 1989 e foram formados quatro comitês preparatórios internacionais, e paralelamente, cada país membro da Organização das Nações Unidas deveria produzir um relatório nacional contendo informações dos aspectos ambientais e de desenvolvimento, além da elaboração de planos de ação para promoção de desenvolvimento sustentável no contexto de cada país. De acordo com o autor, apesar da grande importância dos documentos e declarações assinados nesta conferência, o grande legado da Rio-92 foi justamente o processo de preparação de cada país, que envolveu a participação desde grandes organizações até a população e este processo levou o conceito de desenvolvimento sustentável para todos os lugares do planeta.

### **2.1.1. Desenvolvimento Sustentável**

Goodland (1995), menciona a diferença entre crescimento e desenvolvimento, citando definições de que "crescer" significa "aumentar em tamanho por meio de assimilação ou acréscimo de materiais", enquanto "desenvolver" significa "expandir ou atingir potencialidades; trazer a um estado maior, melhor ou mais preenchido", e portanto, no crescimento está implícito um aumento material ou físico quantitativo, enquanto no desenvolvimento está implícito uma melhoria qualitativa ou mudança.

O Relatório Brundtland da WCED (1987, p. 15) definiu desenvolvimento sustentável como sendo "desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações". Assim, esse relatório determinou uma forte conexão entre diminuição da pobreza, melhoria ambiental e igualdade social por meio de crescimento econômico sustentável.

De acordo com Shi *et al.* (2019), a maioria dos acadêmicos concordam com a classificação de capitais como sendo capital natural, capital manufaturado, capital humano e capital social, e que o atingimento do desenvolvimento sustentável na sociedade humana depende da manutenção destes quatro tipos de capitais e seus relacionamentos dentro de um certo período de tempo. Os mesmos autores mencionam três diferentes tipos de desenvolvimento sustentável, classificados como desenvolvimento sustentável fraco, desenvolvimento sustentável forte e desenvolvimento sustentável absurdamente forte, conceitos baseados nos trabalhos desenvolvidos pelos autores Robert Solow e John Hartwick.

Williams e Millington (2004) mencionam que o desenvolvimento sustentável fraco adota uma visão antropocentrismo na relação entre humanos e a natureza, assumindo o otimismo de que os humanos terão capacidade de solucionar qualquer eventual problema ambiental e manipular recursos naturais para satisfazer suas demandas por meio do progresso tecnológico. Shi *et al.* (2019) conclui que no desenvolvimento sustentável fraco, desde que a quantidade total de capital aumente, neste caso diminuindo o capital natural e aumentando capital manufaturado, mesmo que o capital natural se degrade a um estado irrecuperável, o desenvolvimento ainda é sustentável.

De acordo com Ayres, Van den Bergh e Gowdy (2001), o desenvolvimento sustentável forte deriva do reconhecimento de que recursos naturais são fatores essenciais na produção econômica, no consumo ou no bem-estar que não podem ser substituídos por outro tipo de capital e é entendido que alguns componentes ambientais são únicos e alguns processos ambientais podem ser irreversíveis.

Costanza e Daly (1992) mencionam que no passado as atividades humanas operavam em escala tão reduzida em relação aos processos naturais que o capital natural não era um limitante do desenvolvimento econômico, que era de fato limitado pelo capital humano e manufaturado. Com a expansão de escala das atividades produtivas, o capital natural está se tornando um limitante do desenvolvimento econômico, e portanto, segundo os autores, é necessário manter o capital natural total intacto, por meio de práticas operacionais como: taxas de colheita não devem exceder as taxas de regeneração, emissões de resíduos não devem exceder a capacidade de renovação do ambiente, que investimentos na exploração de recursos não-renováveis sejam emparelhados no desenvolvimento de substitutos renováveis, entre outras.

Shi *et al.* (2019) afirma que o desenvolvimento sustentável forte se caracteriza por acreditar que além do fato de que capital natural não pode ser substituído por capital manufaturado, a exploração e utilização de ecossistemas devem ser eliminadas e que seres humanos devem se desenvolver sem interferência na natureza. Ainda de acordo com Shi *et al.* (2019), a ideia do desenvolvimento sustentável fraco tem como ponto fraco o otimismo excessivo na capacidade humana de controlar a natureza e no progresso tecnológico, considerando que a natureza não tem uma capacidade limitada e que todas as funções de ecossistemas podem ser substituídas.

Shi *et al.* (2019) também menciona que a visão de desenvolvimento sustentável forte por sua vez, tem como ponto fraco a subestimação do papel do progresso tecnológico, considerando que todo capital natural deve ser restrito, quando na prática alguns tipos de capital natural podem sim ser substituídos, como por exemplo algumas fontes minerais que podem ser substituídas por produtos manufaturados. A vantagem da visão de desenvolvimento sustentável forte é que ela se põe como um meio-termo entre as outras duas visões mais extremistas, e por isso, é uma ideia com maior aceitação.

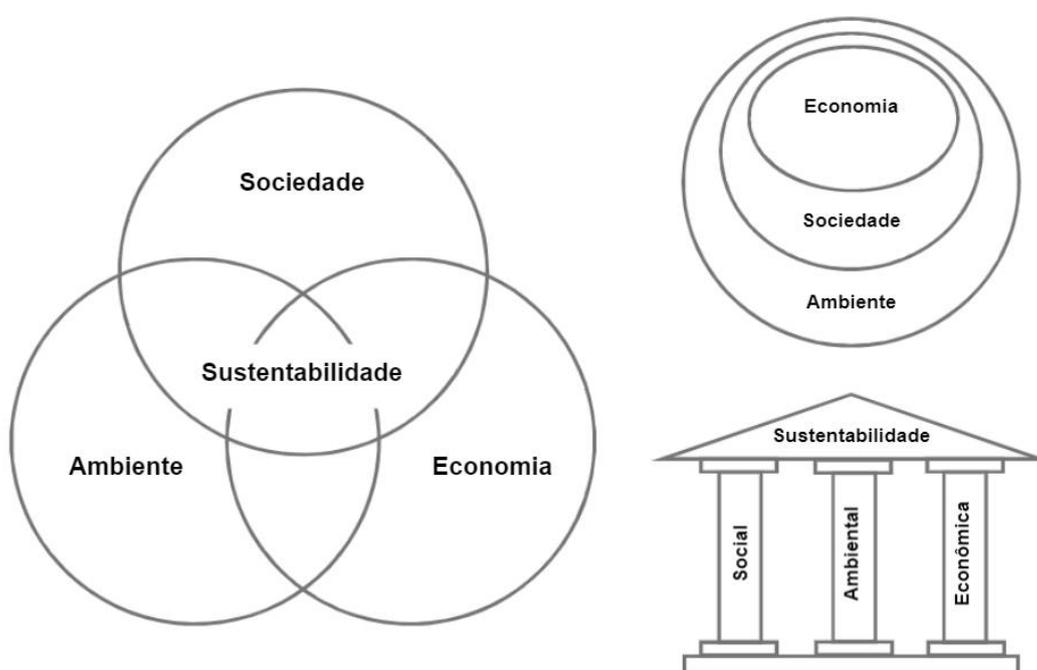
### **2.1.2. Base Tripla da Sustentabilidade**

De acordo com Norman e MacDonald (2004), o termo "Base Tripla da Sustentabilidade" (também mencionado como "três pilares da sustentabilidade", "tripé da sustentabilidade" ou *triple bottom line*) ganhou notoriedade após a publicação do livro "Canibais com Garfo e Faca" (original em inglês "*Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*") do autor John Elkington. É mencionado também que existem poucas referências ao termo antes desta publicação e que diversos autores mencionam que John Elkington cunhou o termo. Segundo Purvis, Mao e Robinson (2019), o conceito da base tripla é ilustrado frequentemente na literatura na forma de três círculos interseccionados, círculos concêntricos ou de fato pilares, como ilustrado na Figura 1.

O Relatório Brundtland WCDE (1987) pontua de maneira clara que questões de igualdade, e particularmente o conceito de igualdade entre gerações, eram um ponto-chave na agenda de sustentabilidade. Elkington (1997) menciona que após a Conferência Rio-92,

muitas empresas tiveram o entendimento superficial de que desenvolvimento sustentável se tratava basicamente de tornar os seus negócios mais eficientes do ponto de vista ambiental, reduzindo custos e resíduos. Ainda de acordo com o autor, para o atingimento da sustentabilidade, a criação e utilização de tecnologias ambientalmente amigáveis e promoção ativa de redução de consumo não bastam, sendo também necessário rever drasticamente os conceitos de igualdade social, justiça ambiental e ética nos negócios, e que para isso, será necessário um entendimento mais profundo não apenas dos capitais financeiros e físicos, mas também dos capitais naturais, humanos e sociais.

**Figura 1** - Ilustrações do Conceito de Base Tripla da Sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Purvis, Mao e Robinson (2019, p. 2)

De acordo com Gimenez, Sierra e Rodon (2012), o conceito da base tripla é utilizada dentro das organizações que buscam a sustentabilidade dentro das suas operações, balanceando aspectos econômicos, ambientais e sociais. Os autores mencionam que a sustentabilidade econômica está relacionada com os custos de produção ou manufatura. Operacionalmente, a sustentabilidade ambiental se refere ao uso de energia e outros recursos, assim como a pegada ecológica que as empresas deixam como resultado das suas operações.

Segundo os mesmos autores, a sustentabilidade ambiental está frequentemente relacionada com redução de desperdícios, redução de poluição, eficiência energética, redução de emissões e diminuição do consumo de materiais tóxicos, entre outros fatores. Analisando

operacionalmente a sustentabilidade social, ela ocorre quando organizações fornecem oportunidades iguais a funcionários, encorajam diversidade, asseguram qualidade de vida e promovem processos democráticos, entre outras ações.

Os mesmos autores ainda mencionam também que o conceito da base tripla da sustentabilidade não apenas sugere que as organizações promovam comportamento ambientalmente e socialmente responsável, mas também que ganhos financeiros podem ser obtidos dentro deste processo, reforçando a conexão entre os três pilares. Os autores ilustram os ganhos desta conexão exemplificando que empresas que implementam programas de gerenciamento ambiental podem obter reduções de custos por meio da redução de consumo de recursos e redução de emissões, além da possibilidade de aumento de ganhos financeiros por meio do estabelecimento de melhores relações com parceiros e melhoria da imagem da empresa.

Adicionalmente, empresas que implementam iniciativas para melhorar a segurança e condições de trabalhos dos funcionários podem obter redução de custos de manufatura reduzindo absenteísmo e acidentes de trabalho, exemplificando que melhorias no pilar social da sustentabilidade podem também refletir em melhorias no desempenho econômico de uma organização.

### **2.1.3. Modelagem Matemática na Sustentabilidade**

Desde a década de 90, autores têm buscado utilizar a modelagem matemática e métodos computacionais para otimização de temas relacionados à sustentabilidade.

Kimmins (1990), por exemplo, trouxe a discussão da sustentabilidade na produção de madeira, levando em conta um futuro aumento de demanda em decorrência de crescimento populacional. O autor utilizou modelagem matemática e métodos de simulação híbrida para simular o crescimento de florestas.

Beer *et al.* (1990) fez trabalho semelhante, buscando prever a sustentabilidade na produção de cacau, através da modelagem e simulação prevendo consumo e crescimento das árvores produtoras.

Costanza (1991) abordou de maneira mais generalista a modelagem matemática de aspectos econômicos e ambientais de sustentabilidade, como geração e consumo de energias e impactos ambientais de diferentes atividades econômicas.

Mais recentemente, pesquisas têm avançado também na aplicação da modelagem de temas relacionados a sustentabilidade para a iniciativa privada, como por exemplo, o trabalho dos autores Joyce e Paquin (2016), que propõem um modelo de negócios sustentável utilizando aspectos da base tripla da sustentabilidade.

Uma das principais preocupações com relação da sustentabilidade, é a geração e gestão de resíduos sólidos, que impacta diretamente os três pilares mencionados, e que é o próximo tema a ser abordado neste capítulo.

## **2.2. GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

De acordo com Giusti (2009), as atividades humanas sempre geraram resíduos, o que não era um grande problema quando a população humana era relativamente pequena e nômade, mas se tornou uma questão séria com a urbanização e crescimento de áreas aglomeradas. Pichtel (2014) define resíduo sólido como sendo material sólido que possui valor econômico negativo, o que sugere que seja mais barato descartar do que utilizar.

De acordo com Karak, Bhagat e Bhattacharyya (2012) o termo resíduo sólido municipal abrange resíduos gerados por atividades domésticas e comerciais que são coletados e tratados por órgãos do município, sendo que dentro desta definição, se exclui os resíduos de coleta e tratamento de esgoto municipal. De acordo com Miezah *et al.* (2015), os resíduos sólidos municipais podem ser classificados nas seguintes categorias: materiais orgânicos (restos de alimentos, material de podas, madeira, entre outros), papel (papelão, jornal, papel de escritório, lenços de papel), plásticos, metais (sucatas e latas), vidro, borracha e couro, materiais têxteis, inertes (areia, cinzas, entre outros) e variados (baterias, materiais de construção e todo outro tipo de resíduo que não esteja dentro das demais categorias).

Giusti (2009) menciona que um gerenciamento inadequado de resíduos leva a contaminações de água, solo e atmosfera, o que pode ter como consequência grandes

impactos na saúde pública, como por exemplo na idade medieval, quando epidemias associadas a contaminação da água com patógenos dizimaram grande parte da população da Europa.

Segundo Marshal e Farahbakhsh (2013), quando os primeiros progressos na área de gestão de resíduos sólidos iniciaram foram baseados em cinco principais fatores: saúde pública, meio-ambiente, escassez de recursos e valor do resíduo, mudanças climáticas e conscientização e participação pública.

Sobre o fator da saúde pública, Marshal e Farahbakhsh (2013) mencionam que durante a revolução industrial, foi criada em Londres uma comissão de saneamento que estabeleceu as primeiras relações claras entre o aparecimento de doenças e as precárias condições sanitárias. Nesta época, foram criados na Inglaterra atos de saúde pública que estabeleceram que as residências deveriam dispor seus resíduos em recipientes móveis, que as autoridades locais eram responsáveis por esvaziar semanalmente.

Segundo os mesmos autores, a preocupação pública sobre saneamento cresceu muito relacionado a doenças epidêmicas que continuaram a afligir cidades regularmente. Assim, uma prioridade das autoridades municipais tornou-se coletar e remover os resíduos das áreas residenciais, porém, os autores mencionam que a disposição final era na grande parte das vezes não regulada e descontrolada, consistindo basicamente de despejamentos e queimas dos resíduos.

Vergara e Tchobanoglous (2012) mencionam que o fator saúde pública costuma ter forte influência na definição de diretrizes de gerenciamento de resíduos em países que possuem precária nos sistemas de gerenciamento e baixas taxas de disposição final adequada de resíduos. Wilson (2007) menciona um projeto na Zâmbia que teve como objetivo a extensão da coleta de resíduos nas áreas urbanas mais pobres da capital Lusaca e teve como consequência a eliminação das ocorrências de cólera na área. O mesmo autor também menciona um surto de peste na cidade indiana de Surat em 1994, que foi atribuído à reprodução de ratos em uma área contendo resíduos não coletados.

Sobre a dimensão ambiental, Marshal e Farahbakhsh (2013) mencionam que após a Segunda Guerra Mundial, a utilização de aterros era o principal método de disposição de resíduos e que o rápido crescimento de consumo após a década de 1960 resultou em um

grande aumento na geração de resíduos municipais. É mencionado também o crescimento da presença de plásticos, o que levou os movimentos ambientalistas das décadas de 1960 e 1970 a incluírem a disposição de resíduos nas agendas políticas de países industrializados, o que criou uma mudança de perspectiva na definição de diretrizes de como abordar o gerenciamento de resíduos sólidos.

Segundo os mesmos autores, novas legislações criadas a partir deste movimento focaram inicialmente na eliminação da disposição descontrolada e evoluíram para temas até hoje abordados como controle da lixiviação e dos gases de aterros, redução de gases e dioxinas em incineradores e controle de odores em plantas de compostagem e digestores anaeróbicos.

Vergara e Tchobanoglous (2012) mencionam que a proteção do meio ambiente tende a ser um fator importante na definição de políticas de gerenciamento de resíduos em países que possuem legislações robustas em relação a proteção de ar, águas e terras, e também em locais que passaram por processo de degradação ambiental altamente visível. Wilson (2007) cita o exemplo da África do Sul, país que possui uma fonte reduzida de água, uma vez que cerca de 75% do território é classificado como deserto ou semi-deserto, e que por isso criou uma diretriz de requerimentos mínimos para disposição final em aterros, visando proteger as águas superficiais e aquíferos.

Marshal e Farahbakhsh (2013) mencionam o fator que envolve a escassez de recursos e o valor do resíduos, salientando que em épocas de pré-industrialização, recursos eram caros e de difícil obtenção e na maioria das vezes qualquer coisa que tivesse algum tipo de valor era reutilizado e consertado ao invés de descartado como resíduo, porém, na década de 1970 as taxas de reciclagem tiveram uma significativa baixa, uma vez que neste período houve grande aumento no consumo, forte comercialização de commodities e baixa atenção ao consumo de recursos naturais.

Segundo os mesmos autores, a reciclagem e reutilização voltaram a ser pauta através do conceito europeu de hierarquia do resíduo, que originou-se devido a uma baixa disponibilidade de locais para aterros do governo da Holanda, mas que foi difundida por movimentos ambientalistas e consiste em um modelo de prioridades de gestão de resíduos baseados na “Escada de Lansink”, que pode ser observada na Figura 2 e que tem como ordem

hierárquica a prevenção ou redução, reuso, reciclagem, recuperação energética, tratamento (como por exemplo incineração) e finalmente a disposição final de resíduos.

**Figura 2** – Escada de Lansink – Hierarquia da Gestão de Resíduos



Fonte: Adaptado de Ad Lansink (2022, s.p.)

De acordo com Wilson (2007), esta hierarquia é um passo na direção de uma gestão de resíduos mais sustentável e um marco histórico no gerenciamento de resíduos, pois antes dela este conceito referia-se a ações no fim da cadeia, e a partir dela passou-se a considerar um conceito mais integrado na gestão destes recursos. O autor também menciona alguns casos da aplicação da mesma, como por exemplo a introdução de um banimento da disposição de resíduos não bioestabilizados em aterros.

Vergara e Tchobanoglous (2012) mencionam que apesar de que a recuperação de recursos também acarreta em benefícios ambientais, ela é motivada pela questão econômica, mencionando exemplos da Índia e da China, cuja economia depende de certos materiais secundários, o que cataliza um sistema de reciclagem informal nesses países.

Sobre o fator que envolve questões de mudanças climáticas no progresso de programas de gerenciamento de resíduos sólidos, Marshal e Farahbakhsh (2013) mencionam que as mudanças climáticas têm impulsionado mudanças ambientais desde o começo da década de 1990, incluindo diretrizes que visam diminuir o uso de aterros para resíduos

biodegradáveis, que são uma grande fonte de emissões de metano, e um fortalecimento no foco de recuperação energética de resíduos.

Os mesmos autores mencionam que o impulsionamento gerado pelas mudanças climáticas ocasionou em políticas e diretrizes focadas na prevenção de geração de resíduos, definição de metas para utilização de compostagem e reciclagem, utilização de métodos alternativos aos aterros, maior responsabilidade de fabricantes de produtos e banimentos de disposição final de materiais recicláveis em aterros, políticas que tiveram como consequência aumentos nas taxas de reciclagem e compostagem, que possuem tendência de crescimento especialmente em cidades que buscam modernizar seus sistemas de gestão de resíduos.

Sobre a conscientização e participação pública nos avanços de sistemas de gestão de resíduos, Wilson (2007) menciona que todas as práticas que levam a um gerenciamento de resíduos mais sustentável, como por exemplo aumento das taxas de reciclagem e aumento da utilização de compostagem, necessitam de uma mudança comportamental do público para serem implementadas. É também mencionado pelo autor que antigas práticas não sustentáveis, como queimas de lixo a céu aberto, deixaram uma impressão pública negativa a qualquer nova proposta de instalação de gerenciamento de resíduos, não importando quão limpas ou eficientes estas sejam, e que a educação e conscientização pública tem uma grande importância para estas mudanças de paradigmas.

Hasan (2004) menciona que na maioria dos casos, independentemente da quantidade de recursos públicos investida na fiscalização do cumprimento de leis relacionadas a gestão de resíduos sólidos, a atuação de fiscais não é suficiente para a identificação de violadores, e que a única forma de aumentar esta eficiência, é por meio de denúncias feitas por cidadãos conscientizados sobre os perigos e problemas das violações de leis de gerenciamento de resíduos. O autor conclui que a educação e a participação da sociedade nas questões relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos é de vital importância para avanços, e ilustra exemplos de casos de educação e conscientização aplicados em centros de educação infantil, escolas e universidades.

De acordo com Iqbal, Liu e Chen (2020), estima-se que a geração anual de resíduos sólidos municipais tenha ultrapassado 2 bilhões de toneladas no mundo todo, e que se espera um crescimento deste número para 3,4 bilhões de toneladas até 2050.

### 2.2.1. Técnicas de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos

Iqbal, Liu e Chen (2020) realizaram uma análise das melhores práticas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos municipais por meio de avaliação de ciclo de vida. Os autores identificaram as práticas mais difundidas como sendo: lixões, aterros (que podem ter ou não recuperação de gases, tratamento de chorume e recuperação energética), incineração, compostagem, digestão anaeróbica e reciclagem, existindo também alguns outros métodos menos utilizados como gaseificação, pirólise e transesterificação.

Os autores também mencionam que alguns métodos são incompatíveis com determinados tipos de resíduos, por exemplo, um plástico não pode ser processado através de compostagem.

Nas seções a seguir são detalhadas as práticas de gestão de resíduos mais comuns segundo os autores Iqbal, Liu e Chen (2020).

#### 2.2.1.1. Lixões

De acordo com ABRELPE (2015), o termo “lixão a céu aberto” é usado para caracterizar um local de disposição em solo no qual ocorre disposição indiscriminada de resíduos sólidos, com nenhuma, ou, no máximo algumas medidas bem limitadas de controle das operações e proteção do ambiente do entorno. É mencionado que lixões geram grandes potenciais impactos na saúde e no meio ambiente, causados pelas emissões geradas pela decomposição do volume de resíduos, conhecidas como chorume e biogás.

Segundo Sharma, Gupta e Ganguly (2018), com a ocorrência de chuvas nas áreas de lixões, a água se mistura com os resíduos sólidos em decomposição formam o chorume, que pode conter grandes quantidades de material orgânico, metais pesados e sais inorgânicos. Os autores mencionam que o chorume pode penetrar no solo, contaminando o mesmo, e também atingir aquíferos, o que torna os lixões uma grande fonte de contaminações de águas e solos.

De acordo com Ali *et al.* (2014), a utilização de lixões é comum em países em desenvolvimento por conta do baixo custo de implantação e da não necessidade de mão-de-obra especializada. Os autores mencionam que a contaminação do solo por metais pesados,

como por exemplo chumbo e zinco, podem alterar a composição química do solo e ter grande impacto nos organismos e plantas dependentes deste solo para nutrição.

ABRELPE (2015) menciona que o biogás emitido por lixões, constituído por volta de 50% de metano e 50% de dióxido de carbono, além de ser tóxico, pode acarretar em explosões e tem grande impacto na camada de ozônio e nas mudanças climáticas, principalmente por conta da presença de metano. É também mencionado que a ausência total de controle e tratamento do resíduo, frequentemente leva a proliferação de vermes, moscas e outros transmissores de doenças contagiosas, e que atividades *in situ* como a coleta de materiais e queimas a céu aberto podem aumentar riscos à saúde e poluição.

#### 2.2.1.2. Aterros Sanitários

Vaverková (2019) traz uma definição de aterramento sanitário como sendo uma operação controlada, onde os resíduos sólidos urbanos são depositados em camadas, sendo que cada camada é compactada e coberta com solo antes da deposição de outra camada. É mencionado que o aterramento é um método de disposição final muito utilizado e aceito por conta das vantagens econômicas em relação a outros métodos e também por ser o único método capaz de ser utilizado para qualquer resíduo sólidos.

O mesmo autor ainda menciona que a diferença fundamental entre os aterros sanitários e lixões é que os aterros são estruturas projetadas não apenas para armazenar resíduos, mas também para tratar suas emissões (no caso dos aterros sanitários, no caso dos aterros controlados, será abordado a seguir), ao contrário do que acontece em lixões, portanto, nos aterros sanitários o chorume gerado deve ser coletado e tratado, assim como o biogás gerado pode ser recuperado e incinerado ou utilizado para geração de energia.

ABRELPE (2015) menciona que entre os lixões e o aterro sanitário, existe ainda um outro método denominado de aterro controlado, que possui algum planejamento e controle, mas inferior aos presentes em aterros sanitários, pois nem todos os processos de um aterro sanitário são realizados no aterro controlado. São listadas algumas diferenças entre os dois tipos de aterros, destacando-se alguns quesitos como: nos aterros controlados pode não haver gestão do chorume e do biogás, enquanto nos aterros sanitários esta gestão é total, nos aterros sanitários são levados em conta fatores importantes na escolha do local de instalação e este local passa por uma preparação melhor adequada do que no caso dos aterros controlados e

nos aterros sanitários são mantidos registros completos de volumes de resíduos, tipos, fontes e atividades ou eventos no local. Todos estes fatores positivos da utilização de aterros sanitários em relação aos aterros controlados, têm como consequência riscos de impacto minimizados sobre a saúde e o meio ambiente.

#### 2.2.1.3. Incineração

De acordo com RENOSAM (2006), uma planta de incineração consiste em um sistema de recepção e alimentação do resíduo, uma ou mais unidades completas de incineração com sistema de gerenciamento das cinzas geradas, um *boiler* e o sistema de tratamento de gases da chaminé. Os resíduos são incinerados e o calor gerado aquece o *boiler* que gera vapor que é conduzido a uma turbina que aciona um gerador de energia. O sistema de tratamento de gases remove poeira, metais pesados, gases ácidos, óxidos de nitrogênio e dioxinas antes da exaustão para atmosfera. As cinzas geradas passam por triagem, onde metais são recuperados e reciclados, parte das cinzas é utilizada na construção civil enquanto outra parte tem disposição final em aterros.

Segundo Jucá (2014), a incineração é uma das tecnologias de tratamento mais antigas existentes na Europa, Estados Unidos e Japão, sendo que nesses locais, os incineradores operam ao abrigo de uma legislação ambiental rigorosa, que requer um maior custo para atender a mais alta tecnologia de controle de poluição atmosférica. Este tratamento dos gases resultantes da combustão deve ser realizado antes da sua emissão para atmosfera, pois normalmente estes são compostos por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxigênio residual (O<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>) e materiais particulados.

Cheng e Hu (2010) mencionam como vantagens da incineração principalmente a possibilidade de geração de energia, a redução substancial do volume total de resíduos (até 90%) que têm como disposição final os aterros, as cinzas são um material estável biologicamente e podem ser reaproveitadas, as emissões são bem controladas, desde que o sistema de tratamento de gases esteja em funcionamento adequado. As desvantagens que os autores mencionam, incluem principalmente os custos de implementação e operação, a necessidade de mão-de-obra especializada e uma potencial redução dos índices de reciclagem e redução de geração de resíduos.

Jucá (2014) ainda complementa como sendo importantes vantagens desta tecnologia a menor área necessitada para instalação dos incineradores e de aterros sanitários, que é consequência da significativa redução de volume dos resíduos, e a redução na emissão de odores e ruídos e uma flexibilidade maior na capacidade de processar tipos diferentes de resíduos, em relação a outras técnicas.

#### 2.2.1.4. Compostagem

Vergara e Tchobanoglous (2012) definem compostagem como sendo a decomposição e estabilização da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos por meio de ação microbiana aeróbica sob condições controladas, sendo que a maior parte do resíduo orgânico pode ser compostada e o produto resultante da compostagem pode ser utilizado como condicionador ou fertilizante de solo.

Os mesmos autores mencionam que a compostagem cumpre alguns dos objetivos principais da gestão de resíduos: reduzir o volume de resíduos, estabilizar e esterelizar os resíduos e produzir um produto com valor comercial a partir do resíduo. As unidades de compostagem podem ter escala desde caseira até municipal.

Lim, Lee e Wu (2016) mencionam que a compostagem pode ser utilizada em resíduos que normalmente exigem tratamentos que utilizam grande quantidade de recursos, como por exemplo fezes de animais e lodo ativado. É mencionado também que a utilização da compostagem é uma alternativa mais sustentável ambientalmente à utilização de aterros, uma vez que as emissões de gases estuda são reduzidas em cerca de 75% na compostagem em comparação ao aterramento e adicionalmente, a utilização do composto no solo pode reduzir a quantidade de fertilizantes químicos e pesticidas necessários na agricultura, o que também leva a uma redução do risco de poluição ambiental.

Os mesmos autores mencionam que a compostagem pode ser economicamente sustentável, pois os custos de implantação e operacionais são reduzidos em relação a outros métodos de gerenciamento de resíduos sólidos, e que em um estudo de caso onde 60% do produto da compostagem era vendido para agricultura e o restante era utilizado como cobertura de aterros, a operação foi viável financeiramente com um retorno de investimento de cerca de três anos.

Jucá (2014) cita que a compostagem é um dos processos de reciclagem de resíduos mais antigos que o homem tem utilizado e que paradoxalmente é um dos processos cuja filosofia e princípios estão entre os mais atualizados e de acordo com as exigências modernas, já que se trata de um processo comprometido com os aspectos ambientais, de saúde pública e com o resgate da cidadania.

O mesmo autor apresenta algumas vantagens da compostagem como por exemplo, o aproveitamento agrícola da matéria orgânica pelo uso de composto orgânico no solo, baixa exigência de mão de obra especializada e geração de renda com a comercialização do composto, caso exista mercado. São também ilustradas algumas potenciais desvantagens, como o risco ambiental em caso de má operação, custo de coleta diferenciada da fração orgânica e a necessidade de grande área para maturação dos resíduos.

#### 2.2.1.5. Digestão Anaeróbica

De acordo com Vergara e Tchobanoglous (2012), a digestão anaeróbica é um processo realizado por bactérias na ausência de oxigênio, no qual os microorganismos consomem biomassa (resíduos orgânicos) e geram biogás, que pode ser utilizado para geração de eletricidade. O resíduo sólido restante da digestão anaeróbica pode passar pelo processo de compostagem. A digestão simultânea de resíduos alimentares e lodo de efluentes aumenta a produção de biogás e oferece um tratamento simultâneo de efluentes e resíduos sólidos.

Khalid *et al.* (2011) menciona que o processo de digestão anaeróbica envolve uma série de reações metabólicas como por exemplos hidrólises, acidogêneses e metanogêneses. De acordo com os autores, esta técnica é utilizável em uma vasta gama de materiais, incluindo resíduos municipais, agrícolas e industriais, sendo que o biogás gerado é considerado uma fonte de energia mais limpa do que as geradas por combustíveis fósseis. Os fatores que influenciam na operação da digestão anaeróbica são temperatura, pH, umidade do substrato, fonte de carbono e a relação entre carbono e nitrogênio presente no substrato. É mencionado de que quando este processo ocorre de forma não controlada em aterros, o biogás e dióxido de carbono liberados no processo são emissões que causam poluição ao meio ambiente.

Jucá (2014) menciona que a viabilidade econômica relacionada aos processos de digestão anaeróbica pode ser alcançada a partir da redução dos custos de disposição em aterro

sanitário, geração de receita derivada da produção e comercialização de energia renovável e também a possibilidade futura de comercialização de créditos de carbono. O autor menciona algumas vantagens desta tecnologia como: o aumento da vida útil dos aterros sanitários, redução das emissões de gases estufa, uma vez que todo biogás gerado é possível de ser coletado e a geração de produtos valorizáveis como o biogás e composto orgânico.

O mesmo autor menciona algumas desvantagens desta tecnologia como a necessidade de posterior compostagem para bioestabilização dos resíduos digeridos e a necessidade de mão de obra qualificada para o processo de operação e monitoramento da planta.

#### 2.2.1.6. Reciclagem

Vergara e Tchobanoglous (2012) definem a reciclagem como sendo o reprocessamento de materiais descartados, gerando novos produtos, que por meio deste reaproveitamento, necessitam de menor quantidade de energia e recursos naturais virgens para sua fabricação. É mencionado que há uma tendência global de aumento de mercado para materiais recicláveis e que há duas forças motrizes para a utilização da reciclagem: o valor econômico da mercadoria a ser reciclada e o valor de serviço, que está relacionado com a economia gerada no sistema de gestão de resíduos, que não necessitará processar o material a ser reciclado.

Lavee (2007) menciona em sua revisão literária que na literatura econômica, os custos diretos da reciclagem são normalmente considerados um pouco mais altos que os custos de aterramento, porém, analisando um cenário que considera fatores externos, conclui-se que a reciclagem é economicamente eficiente.

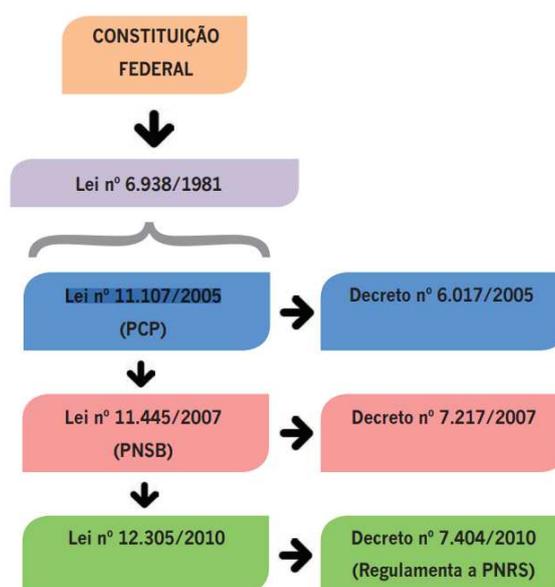
Conforme mencionado em BRASIL (2022), além da reciclagem dos materiais denominados como secos (papéis, plásticos, metais e vidros), considera-se também a compostagem e a digestão anaeróbica como uma forma de reciclagem de materiais orgânicos.

### **2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

Conforme mencionado por Jucá (2014), os principais marcos legais da política pública nacional na área de resíduos sólidos urbanos no Brasil são a Lei de Consórcios Públicos (2005), a Política Nacional de Saneamento Básico (2007) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010). O autor ainda menciona que essas legislações são integradas e complementares para a gestão dos resíduos sólidos urbanos, constituindo a base do sistema jurídico-ambiental brasileiro, que é ilustrado na Figura 3.

É mencionado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2022), que o aterro sanitário ainda é a principal forma de destinação final ambientalmente adequada no país, e que embora seja uma alternativa para eliminar a utilização de aterros controlados e lixões, é essencial implementar políticas de redução de geração, reciclagem e valorização dos resíduos para ampliar a vida útil dos aterros sanitários, mitigar as emissões de gases de efeito estufa e reduzir os custos com a manutenção de tais unidades.

**Figura 3** – Sistema Jurídico-Ambiental de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil



Fonte: Jucá (2014, p.33)

Complementando este pensamento, a Política Nacional de Resíduos Sólidos de BRASIL (2010) define que disposição final ambientalmente adequada é a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, definindo também que rejeitos são resíduos sólidos que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Segundo ABRELPE(2020), em 2020 74,4% dos município do Brasil apresentaram alguma iniciativa de coleta seletiva, salientando que em muitos destes municípios as atividades de coleta seletiva não abrangem a totalidade da população, podendo ser iniciativas pontuais, como pontos de entrega voluntária. Dados levantados por meio de cooperativas e associações do Brasil inteiro demonstram que cerca de 354 mil toneladas foram reciclados pelas empresas analisadas, representando um faturamento de cerca de R\$30 mil por mês e uma redução de emissões de CO2 que supera 174 mil toneladas, que englobam as emissões necessários para processamento de materiais virgens e também as potenciais emissões destes materiais, caso tivessem sido dispostos em aterros sanitários, controlados ou lixões.

Segundo BRASIL (2022), em 2018 estima-se que foram recuperados para reciclagem apenas 2,2% do total de resíduos secos recicláveis (papéis, plásticos, metais e vidros) e 0,2% dos resíduos orgânicos recicláveis, o que evidencia uma baixa cobertura de coleta seletiva e praticamente nenhuma ação que inclua a coleta diferenciada de materiais orgânicos. É mencionado que para viabilizar um tratamento com melhor relação custo-benefício, seria necessária a realização de coleta de resíduos em três frações: recicláveis secos, orgânicos e rejeitos.

### **2.3.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos**

A Lei N° 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é considerada um marco legal brasileiro na gestão de resíduos sólidos, uma vez que a mesma trouxe definições, objetivos, diretrizes e proibições acerca do tema para a discussão do destino adequado dos rejeitos do consumo.

Na definição do objeto e campo de aplicação da Lei, o primeiro artigo da mesma cita:

“Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.” (BRASIL, 2010, s.p.)

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos trouxe importantes objetivos que servem como diretriz para a elaboração deste trabalho, como por exemplo: “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”, “adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais” e “incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados”. (BRASIL, 2010)

Em seu terceiro artigo, a Lei traz importantes definições para a elaboração deste trabalho. Dentre estas, destacam-se a definição de resíduos sólidos:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação 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”

Também trouxe a definição de rejeitos como:

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

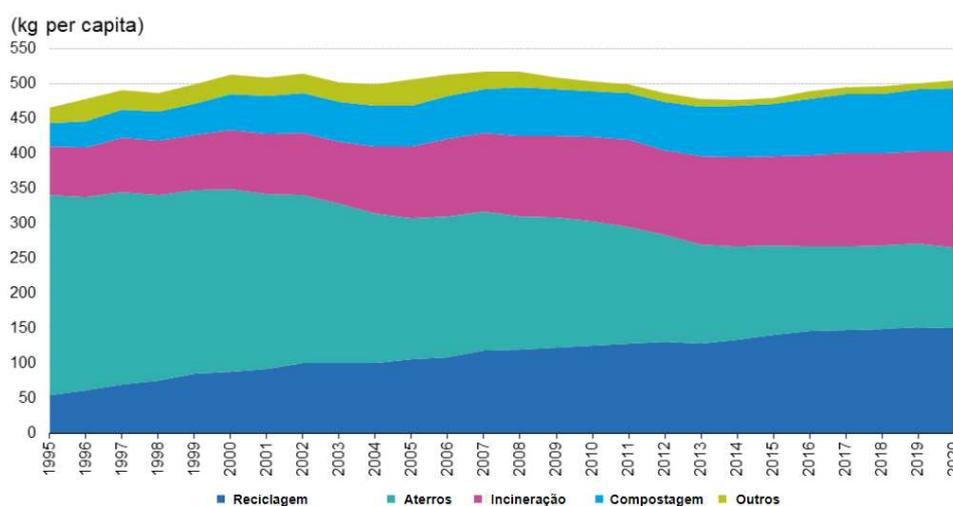
Ainda sobre as definições da Lei, destacam-se também duas sobre destinação final ambientalmente adequada: “destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar impactos ambientais adversos” e também: “distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos”.

Analisando estas definições, observa-se que mesmo a destinação final em aterros sanitários, considerada adequada nos panoramas e levantamentos estatísticos de resíduos

sólidos urbanos, não é ambientalmente adequada de acordo com a lei, se houverem métodos que de alguma forma ainda possam tirar proveito de algum potencial do resíduo, sendo ambientalmente adequada a utilização de aterros sanitários apenas para rejeitos que não possuam mais possibilidade de tratamento ou recuperação.

Ilustrando esta hipótese da diminuição da utilização de aterros, a *European Environment Agency* (2019) menciona a diretiva europeia de aterramento de resíduos sólidos urbanos de 1999 que trouxe como metas a redução significativa da disposição final de resíduos biodegradáveis em aterros e também a limitação da utilização de aterros para no máximo 10% do total de resíduos sólidos urbanos gerados até 2035. A Figura 4 ilustra a evolução com o passar dos anos da utilização das diferentes técnicas de disposição final na Europa, com o objetivo de alcançar as metas estabelecidas nesta diretiva. Observa-se que para atingir a diminuição da utilização de aterros, foi necessária significativa maior implementação de outras técnicas de disposição final de resíduos sólidos urbanos, principalmente a reciclagem, compostagem e incineração.

**Figura 4** – Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos na União Europeia, 1995-2020



Fonte: Adaptado de Eurostat(2021, s.p.)

A evolução da utilização de cada técnica demonstrada na Figura 4 ilustra o desafio a ser superado também no Brasil, pois observa-se que em 25 anos houve uma gradativa diminuição no uso de aterros, em vista ao crescimento de outras técnicas no mesmo período, como a compostagem, a incineração, e principalmente a reciclagem.

### 2.3.1.1. Instrumentos

O artigo 47 da lei destaca as proibições das seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos: “lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos”, “lançamento in natura a céu aberto, excetuados os resíduos de mineração” (portanto, a proibição de lixões) e a “queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade” (portanto, a proibição de queimadas).

A Lei originalmente previa a implantação da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (portanto, o encerramento da utilização de lixões e aterros controlados) até 2014, meta que foi revisada para 2024, seguindo um calendário de etapas de implementação que leva em conta o porte populacional dos municípios.

### **2.3.2. Plano Nacional de Resíduos Sólidos**

Doze anos após a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, o governo nacional publicou em abril de 2022 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) que traz diretrizes, estratégias, ações e metas para modernizar a gestão de resíduos sólidos no Brasil.

De acordo com GOVERNO FEDERAL DO BRASIL (2022), além de implantar as metas para atendimento de diversos pontos da Lei Nacional dos Resíduos Sólidos, o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos determina o aumento crescente da recuperação de resíduos, estabelecendo uma meta de 50% de aproveitamento em 20 anos, o que significa que metade dos resíduos gerados será valorizada por meio da reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética, representando um grande avanço em comparação ao cenário atual em que apenas 3% dos resíduos sólidos urbanos são recuperados.

O plano ainda prevê aumento da reciclagem de resíduos da construção civil, incentiva a reciclagem de materiais, contribui para a criação de empregos verdes, bem como possibilita melhor atendimento a compromissos internacionais e acordos multilaterais com indicações claras para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

O PLANARES de BRASIL (2022) reforça que a disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários cabe apenas aos rejeitos, ou seja, resíduos sólidos que depois

de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação, não apresentem outra possibilidade que não a disposição em aterros sanitários, ressaltando a importância de viabilizar avanços nas demais formas consideradas pela Lei, como a reutilização, reciclagem, compostagem e a recuperação e o aproveitamento energético.

É ainda mencionado que as alternativas de destinação final ambientalmente adequadas previstas na Lei são complementares e devem obedecer à gradação legal, na medida do possível, visando à economia de recursos naturais, de energia, de recursos financeiros e à sustentação econômica dos serviços, e que à exceção da disposição final, todas as demais formas de destinação promovem um melhor uso dos recursos naturais.

É mencionado no PLANARES(2022) que em 2018 menos de 0,5% de toda a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil foi valorizada em unidades de compostagem e que o restante desta matéria orgânica teve como fim mais provável a disposição em aterros sanitários, ou, de maneira inadequada, para aterros controlados e lixões.

Sobre a digestão anaeróbica, o PLANARES menciona que ainda não há muitas iniciativas de projetos, porém, ilustra que o biogás gerado neste processo pode ser aproveitado para geração de calor, energia ou combustível veicular, e exemplifica que se toda matéria orgânica gerada no ano de 2018 tivesse sido tratada pelo método de digestão anaeróbica, cerca de 49 milhões de residências poderiam ser abastecidas pelo potencial de geração de eletricidade proveniente da combustão do biogás.

Sobre a incineração, o PLANARES(2022) menciona que atualmente não foi identificada nenhuma aplicação para resíduos sólidos urbanos, mas que uma unidade na cidade de Barueri/SP está em fase de implementação e que terá capacidade para tratar 825 toneladas/dia, com potência instalada de 20 MW de energia. É mencionado também que outras duas unidades já receberam suas licenças ambientais, uma em Mauá/SP e outra na cidade do Rio de Janeiro/RJ, sendo a primeira com capacidade instalada para tratar 4.000 toneladas/dia de resíduos e potência instalada de 80 MW e a segunda com capacidade para tratar 1.200 toneladas/dia (cerca de 14% dos resíduos coletados em toda cidade do Rio de Janeiro) e potencial de geração de 30 MW de energia. Estima-se que 1 MW de energia seja o suficiente para abastecer uma população de quase 7 mil pessoas.

O PLANARES(2022) define ainda metas para os anos entre 2022 e 2040, levando em conta cenários orientados pelas diretrizes, do Quadro 1 a seguir:

**Quadro 1 – Diretrizes Apresentadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos**

- estruturar sistemas viáveis para aumentar a recuperação de recicláveis secos, associado à educação ambiental e ao fortalecimento de cooperativas e associações de catadores;
-estruturar sistemas para aumentar a recuperação de resíduos orgânicos;
- viabilizar o aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de rejeitos;
- aumentar a recuperação energética de resíduos;
- assegurar a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, com encerramento de lixões e aterros controlados, de forma associada à inclusão social econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, bem como induzir a recuperação ambiental das áreas impactadas pela disposição inadequada.

Fonte: BRASIL (2022, s.p.)

Estas diretrizes deixam claro que um sistema de gerenciamento de RSU mais sustentável passa por um fortalecimento da reciclagem, tanto de resíduos secos como orgânicos, um melhor aproveitamento do potencial energético dos resíduos e pelo encerramento do uso de técnicas não adequadas, como lixões e aterros controlados.

#### 2.3.2.1. Metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos

A seguir, o Quadro 2 apresenta as metas listadas no PLANARES de BRASIL (2022) para os RSU:

**Quadro 2 – Metas Estipuladas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos**

<b>Meta 1</b>	Aumentar a sustentabilidade econômico-financeira do manejo de resíduos pelos municípios;
<b>Meta 2</b>	Aumentar a capacidade de gestão dos municípios;
<b>Meta 3</b>	Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados;
<b>Meta 4</b>	Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada;
<b>Meta 5</b>	Promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;

**Quadro 2 – Metas Estipuladas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (continuação)**

<b>Meta 6</b>	Aumentar a recuperação da fração seca dos RSU;
<b>Meta 7</b>	Aumentar a reciclagem da fração orgânica dos RSU;
<b>Meta 8</b>	Aumentar a recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU;
<b>Meta 9</b>	Aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU;

Fonte: BRASIL (2022)

De maneira direta ou indireta, o modelo matemático desenvolvido neste trabalho impacta e auxilia em todas as metas estipuladas pelo PLANARES, sendo que os valores apresentados nas metas 3, 4, 6, 7 e 9 servem como base, na forma de restrições, para a construção deste modelo matemático.

Desta forma, encerra-se o capítulo da revisão bibliográfica e no capítulo a seguir serão apresentados os aspectos metodológicos empregados na elaboração deste trabalho.

### 3. MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os aspectos metodológicos utilizados na elaboração deste trabalho, mencionando enquadramento metodológico aplicado, as bases para a elaboração do modelo matemático e as técnicas de solução que serão aplicadas.

#### 3.1. ENQUADRAMENTO METODOLÓGICO

A Figura 5 ilustra de maneira simplificada a classificação da pesquisa deste trabalho:

**Figura 5** – Classificação da Pesquisa do Trabalho



Fonte: Adaptado de TURRIONI e MELLO (2012, p.80)

A classificação do resultado da pesquisa é aplicada, pois os resultados das simulações desenvolvidas fornecerão um instrumento de previsão de quais métodos serão mais sustentáveis em cada cenário proposto que auxiliará os tomadores de decisão. Desta forma, o

modelo e suas simulações poderão ser utilizados para determinar qual o melhor conjunto de técnicas de destinação final e tratamento de resíduos sólidos urbanos a ser aplicado visando obter maior sustentabilidade, de acordo com o cenário avaliado.

Este estudo se caracteriza como uma pesquisa quantitativa, uma vez que modelo matemático elaborado será submetido a cenários com objetivo de otimizar recursos por meio do método de programação matemática, que segundo Lachtermacher (2007) descreve um objetivo a ser minimizado ou maximizado por meio de uma função matemática dos recursos escassos (variáveis de decisão). O mesmo autor ainda menciona que as relações entre as variáveis são formalizadas por meio de restrições ao problema expressas como equações e/ou inequações matemáticas. Neste caso será utilizada a programação matemática linear, uma vez que todas as funções-objetivo e restrições serão representadas por funções lineares.

Analisando as classificações descritas por Gil (2002), este trabalho classifica-se como exploratório quanto à natureza do objetivo, uma vez que tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, visando torná-lo mais explícito ou constituir hipóteses. É ainda mencionado pelo mesmo autor que as pesquisas exploratórias têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições.

Quanto à natureza da pesquisa, ela é uma investigação bibliográfica, documental e de modelagem, pois visa refletir sobre um assunto e elaborar um referencial teórico sólido envolvendo uma área de estudo. Posteriormente, serão aplicados os conceitos para desenvolver um modelo de previsão, que será submetido a um teste de conceito.

Esta pesquisa é classificada como sendo de lógica indutiva, devido ao seu processo que consiste na observação de eventos e na identificação de relações entre eles. De acordo com Ruiz (2002), o processo de raciocínio indutivo caminha do registro de fatos singulares ou menos gerais para chegar a uma conclusão desdobrada ou ampliada em um enunciado mais geral.

Quanto à coleta de dados, o processo de pesquisa será realizado por meio de dados secundários referentes aos métodos de disposição final e tratamento de resíduos sólidos urbanos. Serão coletados dados como custo operacional, emissões de gases de efeito estufa e potencial energético de cada método de disposição final e tratamento de resíduos sólidos urbanos, assim como dados de geração e classificação dos resíduos sólidos no Brasil, que

servirão de base para a elaboração do modelo matemático que será utilizado nas simulações deste trabalho.

Para a elaboração da revisão bibliográfica, foram realizadas buscas na base *Scopus*, visando reunir informações sobre os conceitos teóricos que serviram de alicerce para a construção deste trabalho. Foram utilizadas as palavras-chave "*sustainability*", "*sustainable development*", "*triple bottom line*", "*municipal solid waste management*" e "*municipal solid waste treatment*", os artigos foram selecionados com base nos seus respectivos títulos para uma primeira triagem e os selecionados passaram por uma segunda triagem por meio da avaliação dos seus resumos e introduções para verificar a adequação dos mesmos com os assuntos que foram pesquisados.

Esta base foi escolhida pois após uma análise prévia, observou-se como sendo a fonte de maior número de artigos encontrados e também por conta de que os artigos obtidos nesta análise prévia na base *Scopus* foram os de maior relevância para os temas pesquisados.

Para a pesquisa documental foram levantados dados que fazem parte da elaboração das funções objetivo e restrições dos modelos matemáticos elaborados para cada cenário. Dentre estas informações, menciona-se por exemplo: total de resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil, custos operacionais por tonelada de resíduo sólido para cada método de disposição final e tratamento e emissões de gases causadores de efeito estufa para cada método de disposição final e tratamento de resíduos sólidos urbanos.

Estes materiais foram buscados nos websites e relatórios das instituições ABRELPE, WCDE, Ministério do Desenvolvimento Regional, entre outros.

### **3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO E MÉTODO DE SOLUÇÃO**

Para a elaboração do modelo matemático, foi utilizado como base o exemplo de problema otimização linear de meio ambiente demonstrado em Arenales *et al.* (2011) e o modelo conceitual do direcionamento de cada tipo de resíduo para cada técnica de disposição final proposto por Zhao *et al.* (2022).

No seu trabalho, Zhao *et al.* (2022) definiram um planejamento do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos para a cidade de Qingdao na China com base na

quantidade e gravimetria dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade, assim como características das técnicas utilizadas no sistema, como custo e emissões.

O trabalho dos autores propõe uma mudança do cenário atual no gerenciamento de RSU da cidade, onde a técnica predominante é a utilização de aterros sanitários. Por meio da modelagem matemática e simulação multi-critério, os autores verificaram cenários otimizados utilizando técnicas como compostagem, incineração e reciclagem.

O modelo conceitual com as interações entre as técnicas de disposição final de RSU e os tipos de resíduos que podem ser utilizados por cada uma dessas técnicas são premissas que foram baseadas no modelo utilizado por Zhao *et al.* (2022), que com a adição de algumas das metas do PLANARES de BRASIL (2002), formam a base da modelagem matemática deste trabalho.

O foco da modelagem será na seleção e aplicação das técnicas mais adequadas para a satisfação das metas selecionadas do PLANARES, não abrangendo outros fatores envolvidos na gestão de RSU, como por exemplo coleta e transporte.

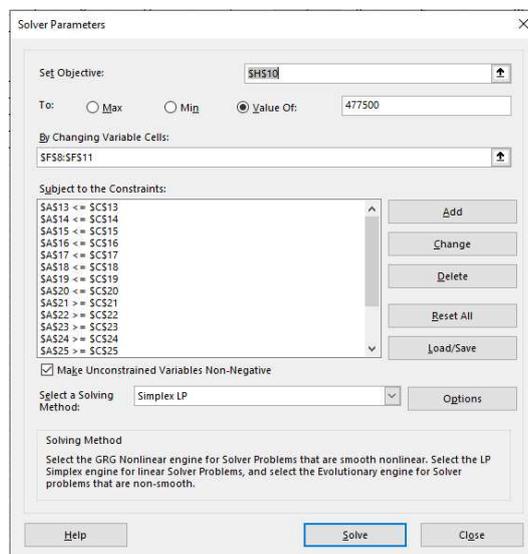
De acordo com SARGENT (2010), para construir um modelo conceitual, é necessário ter dados suficientes sobre o problema para desenvolver teorias que sirvam como base para elaboração do modelo e para desenvolver relações matemáticas e lógicas que permitiram ao modelo a representação adequada do problema e seu propósito.

Para elaboração do modelo conceitual e matemático, foi também utilizada a Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022), que traz dados de custos, emissões de gases causadores de efeito estufa e também potencial de recuperação energética para cada técnica de disposição final de RSU, além também de maiores detalhes sobre balanço de massa, as relações entre si das diferentes técnicas e a aplicabilidade de cada técnica referente ao tipo de resíduo gerado.

Para as simulações deste presente trabalho, será utilizado o módulo Solver do software Microsoft Excel (cuja interface pode ser observada na Figura 6) e o método de solução Simplex, que segundo Arenales *et al.* (2011), foi desenvolvido, formalizado e testado pelo matemático George Dantzig, que a partir de 1947 coordenou junto com o economista Marshall Wood o projeto SCOOP (*Scientific Computation of Optimal Programs*) no Pentágono dos Estados Unidos.

O modelo desenvolvido pode ser encontrado no capítulo 5 deste trabalho.

**Figura 6** – Interface do Solver do Microsoft Excel



Fonte: Do autor(2023)

Para a validação do modelo matemático, o primeiro passo foi a seleção de três cidades de diferentes portes demográficos e regiões geográficas do Brasil, que continham relatórios técnicos sobre a geração de RSU. Em seguida, foram utilizadas técnicas de Validação de Dados Históricos e Racionalismo de Métodos Históricos descritos por SARGENT (2010), assim como o método de comparação de comportamentos de saída de modelo utilizando testes de hipóteses, também descritos por este autor.

Desta forma, foram elencadas hipóteses a serem satisfeitas para os três cenários propostos por este trabalho e simulações matemáticas do modelo foram realizadas afim de verificar o cumprimento destas hipóteses e conseqüentemente, a validação do modelo matemático através deste método.

Com o modelo matemático validado, foram realizadas simulações considerando o panorama nacional de geração de RSU para os três cenários propostos neste trabalho. Os resultados obtidos para estes cenários foram comparados e discutidos entre si e também com o cenário atual do gerenciamento de RSU no Brasil, afim de obter maiores conclusões sobre os dados de saída obtidos do modelo matemático e a relação entre as técnicas utilizadas e os cenários otimizados.

## **4. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

Neste capítulo serão reunidos, por meio de pesquisa documental, dados fundamentais para elaboração das equações de funções objetivo e restrições do modelo matemático, estabelecimento do cenário atual e definição das metas a serem alcançadas pelas simulações que servirão como base para as análises de resultados alcançados pelo trabalho.

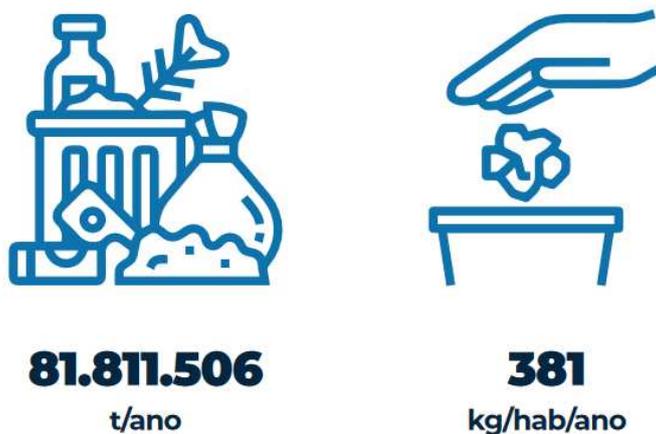
Desta forma, as seções deste capítulo abordam o cenário atual e a prospecção da geração de resíduos sólidos no Brasil, as metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos até 2040, características de balanço de massa para cada técnica de destinação final, e por fim, dados relativos a custos operacionais, emissões de gases de efeito estufa e potencial energético de cada técnica de destinação final.

### **4.1. CENÁRIO ATUAL E PROSPECÇÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

De acordo com Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022 publicado por ABRELPE (2023), em 2022 o Brasil gerou quase 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, o que significa que cada brasileiro gerou em média 381kg por ano, conforme ilustra a Figura 7. Deste total, 76,1 milhões de toneladas foram coletadas por serviços de limpeza urbana, representando uma cobertura de 92,2% do total de resíduos gerados. Apesar da relativa boa cobertura, cerca de 30 milhões de toneladas (quase 40% do total) tiveram disposição final inadequada, como por exemplo, lixões e aterros controlados, como demonstra a Figura 8.

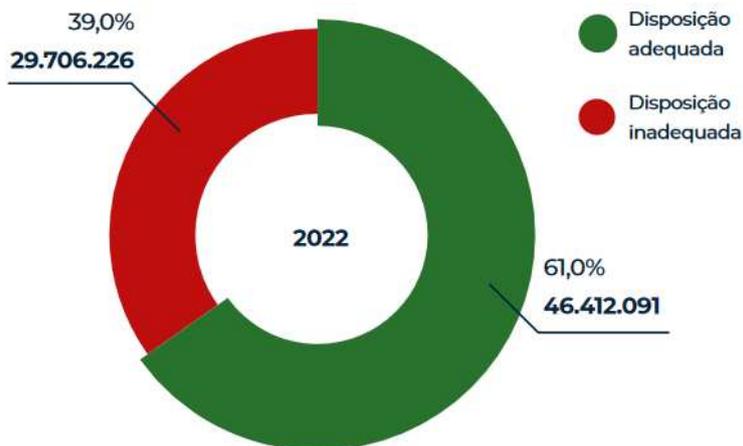
O Plano Nacional de Resíduos Sólidos de BRASIL (2022) estima que até 2040, a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil possa atingir cerca de 100 bilhões de toneladas por ano como consequência do crescimento populacional e desenvolvimento econômico previsto para os próximos anos, o que representaria uma geração de cerca de 20% maior do que a atual, conforme ilustrado na Figura 9.

**Figura 7** – Total de Resíduos Gerados e por habitante no Brasil em 2022



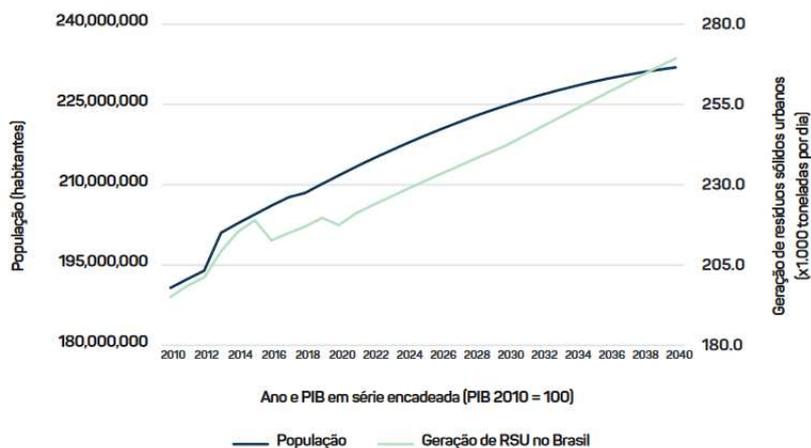
Fonte: ABRELPE (2023, p. 17)

**Figura 8** – Frações de Resíduos com Disposição Final Adequada e Inadequada no Brasil em 2022



Fonte: ABRELPE (2023, p. 27)

**Figura 9** – Estimativa de Crescimento Populacional, de PIB e de geração de resíduos até 2040



Fonte: BRASIL (2022, p. 131)

Para este trabalho será utilizada a estimativa da Figura 8 de 270 mil toneladas por dia de RSU gerados, totalizando 98,55 bilhões de toneladas por ano.

A Tabela 1 resume os dados desta seção que serão utilizados na elaboração de modelos matemáticos e análises neste trabalho:

**Tabela 1** - Resumo das Quantidades de RSU gerados em 2022 e estimativa para 2040

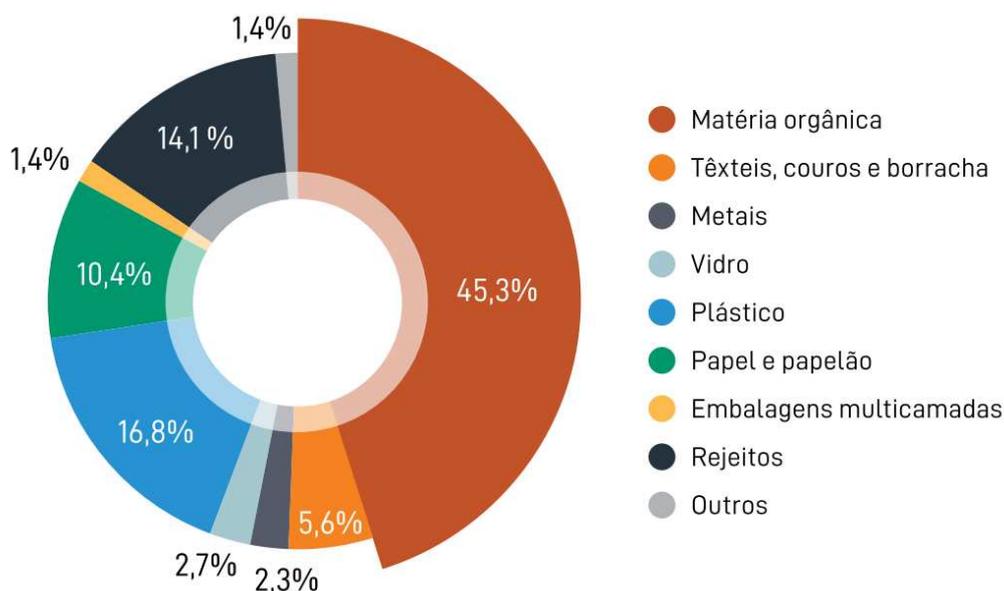
<b>Descrição do Dado</b>	<b>Valor</b>	<b>Fonte</b>
Quantidade de RSU com Destinação Final Aterro Sanitário em 2022	46.412.091 ton	ABRELPE(2023)
Quantidade de RSU com Destinação Final Inadequada em 2022	29.706.226 ton	ABRELPE(2023)
Estimativa da Quantidade de RSU gerados em 2040	98.550.000 ton	BRASIL (2022)

Fonte: Elaborado com base em ABRELPE(2023) e BRASIL(2022).

## 4.2. COMPOSIÇÃO DOS RSU GERADOS NO BRASIL

Segundo ABRELPE (2020) a matéria orgânica representa mais de 45% de toda a massa de RSU gerados no Brasil, enquanto a segunda parcela mais significativa, a de recicláveis secos (que engloba metais, vidro, plástico, papel, papelão e embalagens multicamadas) representa cerca de 33% do total de RSU gerados. A Figura 10 traz por completo a gravimetria dos RSU gerados no Brasil.

Ainda segundo ABRELPE (2020), a parcela classificada como “Rejeitos” inclui resíduos sanitários, materiais não identificados e recicláveis contaminados que não permitiram a separação. A classificação “Outros” contempla resíduos identificados que não deveriam estar no fluxo de RSU como por exemplo resíduos perigosos, eletroeletrônicos e pilhas e baterias, por este motivo, esta parcela será desconsiderada do modelo matemático, uma vez que sua destinação final não deve ocorrer por meio das técnicas avaliadas neste trabalho.

**Figura 10** – Composição dos RSU Gerados no Brasil

Fonte: ABRELPE (2020), p. 39

Para a elaboração deste trabalho, será considerado que a gravimetria dos RSU gerados no Brasil não sofrerá mudanças significativas até 2040.

Considerando o valor projetado de 98,55 bilhões de toneladas de RSU geradas em 2040 e a composição gravimétrica dos mesmos, a Tabela 2 traz as parcelas projetadas de cada tipo de resíduo em toneladas em 2040.

**Tabela 2** - Projeção de Cada Tipo de Resíduo para 2040

<b>Tipo de Resíduo</b>	<b>% Gravimétrico</b>	<b>Projeção 2040 (ton)</b>
Matéria Orgânica	45,3	44.643.150
Têxteis, Couros e Borracha	5,6	5.518.800
Metais	2,3	2.266.650
Vidro	2,7	2.660.850
Plástico	16,8	16.556.400
Papel e Papelão	10,4	10.249.200
Embalagens Multicamadas	1,4	1.379.700
Rejeitos	14,1	13.895.550
<b>Total de RSU Para Destinação Final</b>	<b>100</b>	<b>97.170.300</b>

Fonte: Do Autor.

### 4.3. METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Dentre as metas apresentadas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos BRASIL (2022), foram escolhidas para servir de diretriz para a elaboração do modelo matemático:

- Meta 3: Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados. Esta meta prevê o encerramento dos lixões e aterros controlados até 2024;
- Meta 4: Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada. Esta meta prevê reduzir a utilização de aterros sanitários, desta forma prolongando a vida útil dos mesmos, por meio do aumento da recuperação da massa total de resíduos sólidos urbanos de 2,2% em 2020 para 48,1% em âmbito nacional até 2040. Destes 48,1%, prevê-se que 20% serão relativos ao percentual de recuperação de materiais recicláveis secos, 13,5% relativos a matéria orgânica destinada para tratamento biológico (compostagem e digestão anaeróbica) e 14,6% relativos a recuperação energética;
- Meta 6: Aumentar a recuperação da fração seca dos resíduos sólidos urbanos. Esta meta prevê aumentar os níveis de reciclagem de materiais secos que atualmente estão em 2,2% para 20% até 2040;
- Meta 7: Aumentar a reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Esta meta prevê aumentar os níveis de reciclagem de matéria orgânica que atualmente não tem informação consolidada para 13,5% até 2040, por meio da utilização das técnicas de compostagem e digestão anaeróbica;
- Meta 9: Aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos. Esta meta prevê implementar a recuperação energética de forma a obter um índice de utilização desta tecnologia de 14,6% de todos os resíduos sólidos urbanos gerados até 2040, o que representaria um potencial de potência instalada de 994 MW, que seria suficiente para abastecer 27 milhões de domicílios com eletricidade.

Estas metas foram selecionadas pois trazem valores numéricos que serão utilizados na modelagem matemática deste trabalho, as demais metas que não foram selecionadas após

análise de que tratavam de objetivos mais subjetivos que não teriam aplicação com a modelagem dos cenários propostos.

A Tabela 3 resume os dados das metas apresentadas que serão utilizados na elaboração de modelos matemáticos e análises neste trabalho:

**Tabela 3** - Resumo das Quantidades de RSU gerados em 2021 e 2022 e Metas do PNRS para 2040

<b>Descrição do Dado</b>	<b>Valor Base</b>	<b>Meta 2040</b>
Quantidade de RSU com Destinação Final Inadequada em 2040	29.706.226 ton (2022)	0 ton
Parcela do Total de RSU sendo Recicláveis Secos Recuperados em 2021	2,2% (2021)	20%
Parcela do Total de RSU sendo Matéria Orgânica Recuperada em 2021	0% (2021)	13,5%
Parcela do Total de RSU sendo destinados para Recuperação Energética em 2021	0% (2021)	14,6%

Fonte: Elaborada pelo autor baseado em BRASIL (2022, s.p.) e ABRELPE (2023, s.p.).

Na próxima seção deste capítulo serão apresentadas características de balanço de massa de cada técnica de disposição final de resíduos sólidos que serão importantes na definição dos modelos matemáticos que serão utilizados neste trabalho.

#### **4.4. CARACTERÍSTICAS DE BALANÇO DE MASSA DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Os dados a seguir foram retirados da Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022).

Segundo Melo *et al.* (2019), durante o processo de triagem manual para reciclagem, cerca de 70% do material coletado por coleta seletiva é separado para reciclagem, enquanto os outros 30% são rejeitados. Para a elaboração deste trabalho, irá considerar-se que estes 30% terão como destinação final aterros sanitários.

Sobre a compostagem, (MDR, 2022) menciona que de todo o material compostado, cerca de 40% é biodegradado (incluindo perda de umidade durante o processo), 5% é rejeito na peneira final do processo, que será encaminhado para aterros sanitários e os outros 55% são composto de uso nobre para utilização como fertilizante.

Sobre a biodigestão anaeróbica, é mencionado em (MDR, 2022) que 12% de todo material é biodegradado (incluindo perda de umidade durante o processo) e os outros 88% são considerados composto de uso não-nobre, para utilização como aplicação em solo florestal e/ou cobertura de aterros sanitários. É estimado que por meio da digestão anaeróbica possa-se obter em média 100Nm<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduo processado.

Sobre a incineração, (MDR, 2022) menciona que estima-se que 80% da massa incinerada seja emitida à atmosfera, enquanto os outros 20% se tratam das cinzas de combustão que terão como destinação final os aterros sanitários.

Segundo (MDR, 2022), sobre os aterros sanitários, estima-se que para cada tonelada que tenha como destinação direta os aterros (portanto, não passou previamente por alguma outra técnica de tratamento/disposição final) seja gerado cerca de 0,15Nm<sup>3</sup> de biogás, dos quais cerca de 30% é captado pelos sistemas dos aterros e pode ser utilizado para geração de energia elétrica.

#### **4.5. CUSTOS DE OPERAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Os dados a seguir foram retirados da Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022).

Para a realização deste trabalho, foram considerados os custos operacionais de cada técnica de disposição final, e portanto, não foram levados em conta custos como os de coleta e transporte.

Segundo esta ferramenta (MDR, 2022), o custo por tonelada de resíduo sólido processado por meio de triagem manual visando a reciclagem de materiais secos (plásticos, vidro, metal, etc...) depende da quantidade de resíduo sólido que é processado em uma unidade diariamente. A Tabela 4 traz o resumo destes dados.

Portanto, por meio de uma média calculada dos valores encontrados, estima-se o custo de R\$652,50/ton de material reciclado por meio de triagem manual.

**Tabela 4** - Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Triagem de Reciclados por Faixa de Capacidade de Operação

<b>Capacidade (ton/dia)</b>	<b>Custo Estimado (R\$/ton)</b>
2,5 a 10	705,00
10 a 20	644,00
20 a 30	618,00
Mais de 30	643,00

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Para a compostagem, a Tabela 5 traz os seguintes valores baseados na quantidade processada por dia:

**Tabela 5** – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Compostagem por Faixa de Capacidade de Operação

<b>Capacidade (ton/dia)</b>	<b>Custo Estimado (R\$/ton)</b>
1 a 3	178,00
3 a 30	68,00
30 a 150	31,00
150 a 350	25,00
350 a 750	26,00

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Portanto, por meio de uma média calculada dos valores encontrados, estima-se o custo de R\$65,60/ton de material processado por meio da compostagem.

Para a digestão anaeróbica, a Tabela 6 traz os seguintes valores baseados na quantidade processada por dia:

**Tabela 6** – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Digestão Anaeróbica por Faixa de Capacidade de Operação

<b>Capacidade (ton/dia)</b>	<b>Custo Estimado (R\$/ton)</b>
50 a 150	117,00
150 a 300	86,00
300 a 500	87,00
500 a 1000	87,00
1000 a 1500	87,00

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Portanto, por meio de uma média calculada dos valores encontrados, estima-se o custo de R\$92,80/ton de material processado por meio da digestão anaeróbica.

Para a incineração, a ferramenta traz os seguintes valores baseados na quantidade processada por dia, listados na Tabela 7:

**Tabela 7** – Resumo dos Custos Operacionais de uma Planta de Incineração por Faixa de Capacidade de Operação

<b>Capacidade (ton/dia)</b>	<b>Custo Estimado (R\$/ton)</b>
500 a 1000	271,00
1000 a 2000	255,00
2000 a 3000	243,00
3000 a 4000	237,00
4000 a 5000	233,00

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Portanto, por meio de uma média calculada dos valores encontrados, estima-se o custo de R\$247,80/ton de material processado por meio da incineração.

Para os aterros sanitários, a Tabela 8 traz os seguintes valores baseados na quantidade processada por dia:

**Tabela 8** – Resumo dos Custos Operacionais de um Aterro Sanitário por Faixa de Capacidade de Operação

<b>Capacidade (ton/dia)</b>	<b>Custo Estimado (R\$/ton)</b>
10 a 25	193,27
25 a 100	100,47
100 a 300	61,65
300 a 800	43,85
800 a 2000	31,75

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Portanto, por meio de uma média calculada dos valores encontrados, estima-se o custo de R\$86,20/ton de material processado por meio de aterros sanitários.

A Tabela 9 demonstra um resumo das médias estimadas de custos por tonelada para cada tecnologia.

**Tabela 9** – Resumo dos Custos Estimados por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final

<b>Técnica de Disposição Final de RSU</b>	<b>Custo Estimado por Tonelada (R\$/ton)</b>
Reciclagem por Triagem Manual	652,50
Compostagem	65,60
Digestão Anaeróbica	92,80
Incineração	247,80
Aterro Sanitário	86,20

Fonte: Adaptado de MDR (2022, s.p.)

Estes valores têm referência de maio de 2022, e para uma análise mais atual e precisa, neste trabalho os valores serão corrigidos pelo índice de inflação IPCA, calculado pelo IBGE e disponível para consulta por meio da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil (2023).

O período de correção foi de maio de 2022 até março de 2024, que é o período mais atual para consulta na data de elaboração deste trabalho, e o índice apresentado é de 7,62%, conforme apresentado na Figura 11.

Portanto, a Tabela 10 apresenta os valores corrigidos da Tabela 9, para os custos estimados por tonelada de processamento para cada técnica de disposição final.

**Figura 11** – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Maio/2022 até Março/2024

#### Resultado da Correção pelo IPCA (IBGE)

<b>Dados básicos da correção pelo IPCA (IBGE)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	05/2022
Data final	03/2024
Valor nominal	R\$ 0,00 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	1,07618110
Valor percentual correspondente	7,618110 %
Valor corrigido na data final	R\$ 0,00 ( REAL )

Fazer nova pesquisa

Imprimir

Fonte: Banco Central do Brasil (2024, s.p.)

**Tabela 10** – Valores Corrigidos para o Resumo dos Custos Estimados por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final

<b>Técnica de Disposição Final de RSU</b>	<b>Custo Estimado por Tonelada (R\$/ton)</b>
Reciclagem por Triagem Manual	702,22
Compostagem	70,60
Digestão Anaeróbica	99,87
Incineração	266,68
Aterro Sanitário	92,77

Fonte: Do Autor (2024)

#### **4.6. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Os dados a seguir foram retirados da Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022):

- Para aterros sanitários, cada tonelada de material processado emite cerca de 1,59ton CO<sub>2</sub>-eq/ano, considerando que o material não tenha passado por nenhum método de tratamento previamente. Materiais inertes (que já passaram por outro método de tratamento) não possuem emissão adicional;
- Para compostagem, cada tonelada de material processado emite cerca de 0,04ton CO<sub>2</sub>-eq/ano;
- Para digestão anaeróbica, cada tonelada de material processado emite cerca de 0,04ton CO<sub>2</sub>-eq/ano;
- Para incineração, a tonelada de material processado emite cerca de 0,38ton CO<sub>2</sub>-eq/ano;

No caso da reciclagem de materiais secos, existe uma grande quantidade de emissões evitadas no processo de reciclagem em relação ao obtimento dos materiais virgens. Analisando a média dos materiais listados na ferramenta de referência, será utilizado o valor médio de -2548,72ton CO<sub>2</sub>-eq/ano para cada tonelada de material seco reciclado.

A Tabela 11 apresenta o resumo das emissões de cada técnica de disposição final de resíduos sólidos.

**Tabela 11** – Resumo das Estimativas de Emissões por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final

<b>Técnica de Disposição Final de RSU</b>	<b>Estimativa de Emissões por Tonelada (tonCO<sub>2</sub>-eq/ano.ton)</b>
Reciclagem por Triagem Manual	-2548,72
Compostagem	0,04
Digestão Anaeróbica	0,04
Incineração	0,38
Aterro Sanitário	1,59

Fonte: Adaptado de MDR (2022)

#### **4.7. POTENCIAL ENERGÉTICO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Os dados a seguir foram retirados da Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022).

Para a digestão anaeróbica, estima-se o potencial de geração de 150kWh por tonelada de resíduo processado, através da queima do biogás gerado em geradores.

Para a incineração, baseando-se na atual gravimetria dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, estima-se um potencial de geração de cerca de 570kWh por tonelada de resíduo incinerado, considerando uma eficiência global de 25% no incinerador.

Nos aterros sanitários, estima-se um potencial de geração de cerca de 71kWh por tonelada de resíduo processado (sem ter passado previamente por outras técnicas de destinação final).

As demais técnicas de destinação final não possuem potencial energético.

A Tabela 12 resume o potencial energético por tonelada de material processado para cada técnica.

**Tabela 12** – Resumo do Potencial Energético por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final

<b>Técnica de Disposição Final de RSU</b>	<b>Potencial Energético por Tonelada Processada (kWh/ton)</b>
Reciclagem por Triagem Manual	0
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	150
Incineração	570
Aterro Sanitário	71

Fonte: Adaptado de MDR (2022)

#### **4.8. CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

De acordo com a Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR, 2022), o processo de compostagem faz com que cerca de 40% de toda a massa de RSU processados seja perdida durante o processo, por conta da evaporação da água contida no material. Portanto, para cada tonelada processada nas usinadas de compostagem, cerca de 600kg de composto orgânico são gerados.

De acordo com Garré *et al.* (2016) o composto orgânico processado em compostagem de lixo domiciliar deve atender a valores estabelecidos pelo Ministério da Agricultura para que possa ser comercializado, de acordo com os índices de: matéria orgânica total, nitrogênio total, umidade, relação C/N e pH. O composto gerado é comercializado em geral para as prefeituras, que utilizam no paisagismo municipal e para auxiliar nos gastos de pequenos produtores de agricultura familiar.

Ainda de acordo com os autores, o composto orgânico é comercializado em atacado para portadores de Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas (CNPJ) em média a cerca de R\$0,78/kg quando utilizado como terra vegetal e R\$0,51/kg quando utilizado como adubo orgânico. Realizando uma média dos dois valores, encontra-se o valor médio de R\$0,64/kg.

Considerando que o trabalho de Garré *et al.* (2016) foi publicado em outubro de 2016, o valor médio do composto orgânico é corrigido para a atualidade por meio do índice IPCA (IBGE), por meio do índice acumulado demonstrado na Figura 12.

**Figura 12** – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Outubro/2016 até Março/2024**Resultado da Correção pelo IPCA (IBGE)**

<b>Dados básicos da correção pelo IPCA (IBGE)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	10/2016
Data final	03/2024
Valor nominal	R\$ 0,00 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	1,44901400
Valor percentual correspondente	44,901400 %
Valor corrigido na data final	R\$ 0,00 ( REAL )

Fonte: Banco Central do Brasil (2024, s.p.)

Portanto, o valor médio encontrado pelos autores para o composto orgânico, deve ser corrigido para um índice de atualização de 44,90%, sendo calculado a um valor médio R\$0,93/kg.

Considerando que cada tonelada de material processado por compostagem gera cerca de 600kg de composto, chega-se ao valor de R\$558,00 de potencial de faturamento para cada tonelada processada por compostagem.

#### **4.9. CARACTERÍSTICAS FINANCEIRAS RELACIONADAS A ENERGIA ELÉTRICA**

Para os cálculos relacionados ao potencial de faturamento por meio de geração energética, foi utilizada a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) da concessionária CPFL no estado de São Paulo, com valor de R\$371,62/MWh, apresentada na Figura 13.

Este valor será utilizado para potencial de faturamento por meio da geração de energia elétrica por meio das tecnologias de disposição final de resíduos sólidos digestão anaeróbica, aterro sanitário com recuperação de metano e incineração.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 12 sobre o potencial energético por tonelada de cada técnica de disposição final de resíduos sólidos, a Tabela 13 apresenta dados convertidos e o potencial de faturamento de cada uma das técnicas levando em conta o potencial energético de cada técnica.

**Figura 13** – Taxas e Tarifas Praticados pela Concessionária CPFL de São Paulo

### Tarifa Convencional

Você está sendo atendido pela distribuidora: CPFL Paulista

Tarifa Convencional      Tarifa Social de Baixa Renda      Tarifa Branca

Tarifas Grupo B	TUSD	TE		
	R\$/MWh	Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha
Residencial - Normal	371,62	318,84	348,73	383,84
Rural	371,62	318,84	348,73	383,84
Coop Eletrificação Rural	371,62	318,84	348,73	383,84
Serviço Público de Irrigação	371,62	318,84	348,73	383,84
Demais Classes	371,62	318,84	348,73	383,84

Fonte: CPFL (2023)

**Tabela 13** – Resumo do Potencial de Faturamento por Geração de Energia por Tonelada de Processamento por Técnica de Disposição Final

Técnica de Disposição Final de RSU	Potencial Energético por Tonelada Processada (MWh/ton)	Tarifa Utilizada (R\$/MWh)	Potencial de Faturamento Por Geração de Energia (R\$/ton)
Digestão Anaeróbica	0,150	371,62	55,74
Incineração	0,570	371,62	211,82
Aterro Sanitário	0,071	371,62	26,38

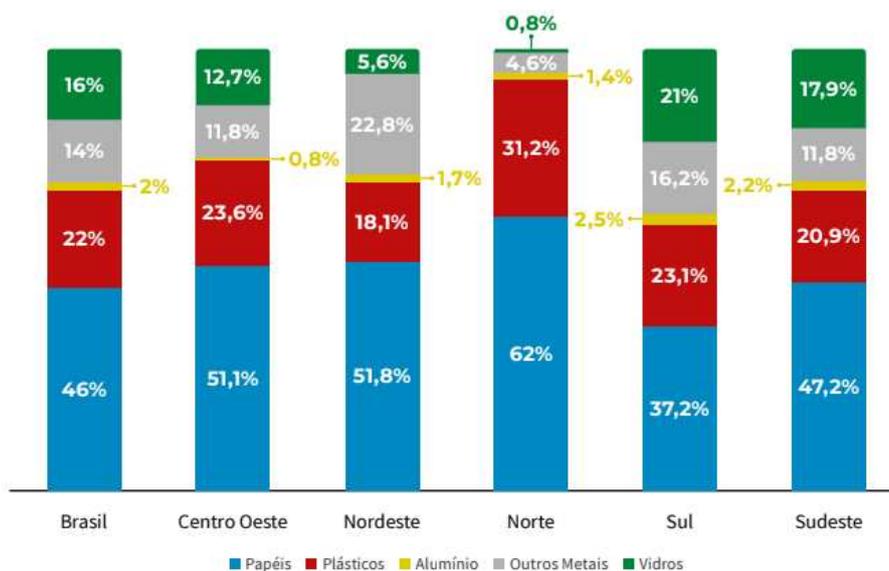
Fonte: Do Autor (2023)

#### 4.10. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS RECICLÁVEIS SECOS

Com a finalidade de definir também o potencial financeiro da comercialização de materiais reciclados obtidos por meio da triagem de coleta seletiva, coletaram-se dados da proporção de cada tipo de reciclável seco gerado e também da precificação média destes tipos de materiais.

A Figura 14 demonstra as proporções de cada tipo de reciclável seco coletados e destinados por região e também pela média nacional em 2021, enquanto a Figura 14 lista os preços por quilograma de cada tipo de material reciclável seco.

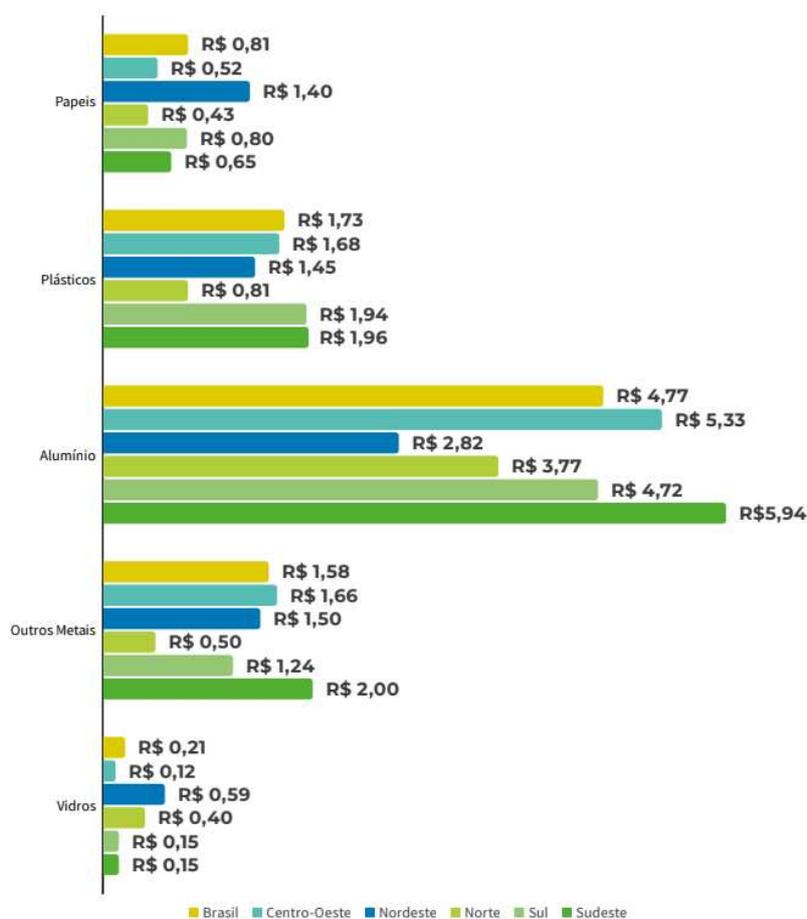
**Figura 14** – Proporções de Recuperação de Materiais Recicláveis Secos em 2021



Fonte: Instituto Pragma (2022, p. 26).

Com a finalidade de obter-se um valor médio por quilograma de material reciclável seco, é realizada uma média ponderada levando em conta os dados obtidos nas Figuras 14 e 15, resumidos na Tabela 14.

Realizando a média ponderada para os diferentes tipos de materiais, obtém-se o valor médio de R\$1,59 por quilograma de material reciclável seco. Considerando este um dado de fechamento de média do ano de 2021 em relatório realizado pelo Instituto Pragma (2022), é feita a atualização do valor pelo índice IPCA (IBGE) considerando o período de dezembro de 2021 até março de 2024, índice demonstrado na Figura 16.

**Figura 15** – Preços Médios de Materiais Recicláveis Secos em 2021

Fonte: Instituto Pragma (2022, p. 27).

**Tabela 14** – Resumo dos Dados de Proporção de Recuperação e Valor Médio Nacional por Quilograma de Cada Tipo de Material Reciclável Seco

Tipo de Material	Proporção de Recuperação	Valor Médio Nacional (R\$/kg)
Papéis	29,1%	0,81
Plásticos	58,7%	1,73
Alumínio	5,1%	4,77
Outros Metais	5,8%	1,58
Vidros	1,3%	0,21

Fonte: Adaptado de Instituto Pragma (2022)

**Figura 16** – Índice de Correção de Valores pelo IPCA (IBGE) para o Período Dezembro/2021 até Março/2024**Resultado da Correção pelo IPCA (IBGE)**

<b>Dados básicos da correção pelo IPCA (IBGE)</b>	
<b>Dados informados</b>	
Data inicial	12/2021
Data final	03/2024
Valor nominal	R\$ 0,00 ( REAL )
<b>Dados calculados</b>	
Índice de correção no período	1,13059200
Valor percentual correspondente	13,059200 %
Valor corrigido na data final	R\$ 0,00 ( REAL )

[Fazer nova pesquisa](#) [Imprimir](#)

Fonte: Banco Central do Brasil (2024, s.p.)

Portanto, multiplicando-se o valor médio encontrado pelo índice de correção monetária encontrado, chega-se ao valor médio corrigido de R\$1,80 por quilograma de material reciclável seco recuperado.

## 5. MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático que será aplicado para as simulações de cenário e posteriores análises de resultados.

Na primeira seção, será explanada a base do modelo e em seguida haverá a definição do balanço de massa no sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, que servirá como base também para as seguintes equações do modelo.

Serão definidas em seguida as equações de restrição que serão utilizadas em cada um dos três cenários que serão simulados. Após esta seção, serão definidas as equações de restrição baseadas nas metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

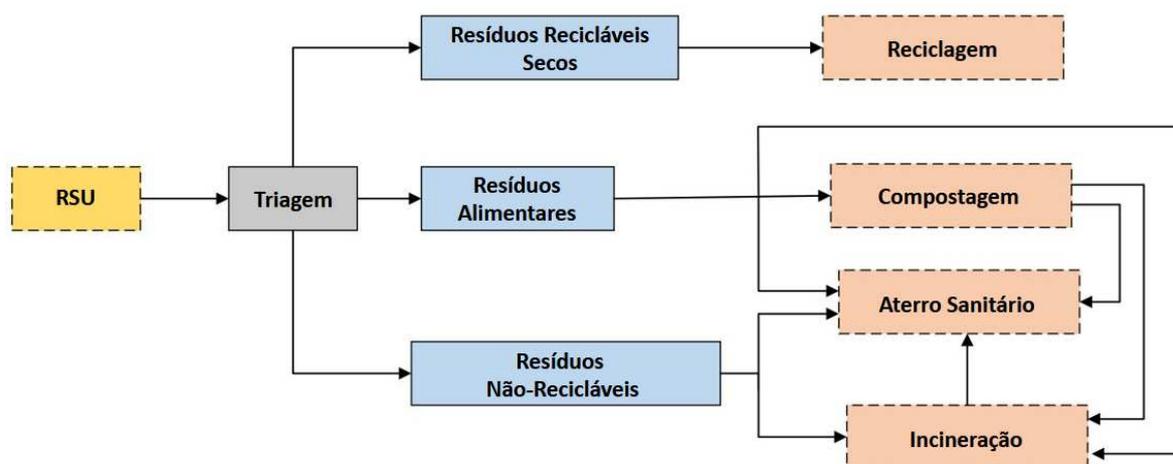
A última seção deste capítulo traz os modelos matemáticos definidos para cada um dos cenários propostos.

Para a definição do modelo matemático deste trabalho, tomou-se como base o modelo conceitual proposto por Zhao *et al.* (2022). Nesse trabalho, os autores definiram um planejamento do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos para a cidade de Qingdao na China com base na quantidade e gravimetria dos resíduos sólidos urbanos gerados na cidade, assim como características das técnicas utilizadas no sistema, como custo e emissões.

O trabalho dos autores propõe uma mudança do cenário atual no gerenciamento de RSU da cidade, onde a técnica predominante é a utilização de aterros sanitários. Por meio da modelagem matemática e simulação multi-critério, os autores geraram cenários otimizados utilizando técnicas como compostagem, incineração e reciclagem.

A Figura 17 demonstra a proposta de modelo dos autores Zhao *et al.* (2022) e as alterações básicas realizada para o modelo deste presente trabalho, são que os autores não previam a utilização da técnica de digestão anaeróbica, enquanto neste trabalho será considerada como uma das alternativas frente ao cenário atual e que os autores consideraram os resíduos orgânicos apenas como sobras alimentares, enquanto neste trabalho também serão considerados demais resíduos orgânicos urbanos como por exemplo resíduos provenientes de podas municipais.

**Figura 17** – Modelo Conceitual Baseado para Elaboração do Modelo Matemático



Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2022, p. 08)

Nas seções seguintes serão descritas as etapas consideradas para a elaboração das equações do modelo matemático.

## 5.1. BALANÇO DE MASSA

A primeira etapa do modelo é a definição do balanço de massa global que é expresso pela quantidade total de resíduos sólidos urbanos como a soma das classificações apresentadas na gravimetria de RSU.

Com base nas características dos resíduos, agrupa-se Metais, Vidros, Plásticos, Embalagens Multicamadas, Papel e Papelão sob a denominação de “Recicláveis Secos”, assim como com base nas características, agrupa-se Rejeitos com Têxteis, Couros e Borrachas. As outras duas rotas possíveis são as de Material Orgânico e de Outros, que conforme mencionado na pesquisa documental, deve ter como destinação final rotas de economia circular, e não o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

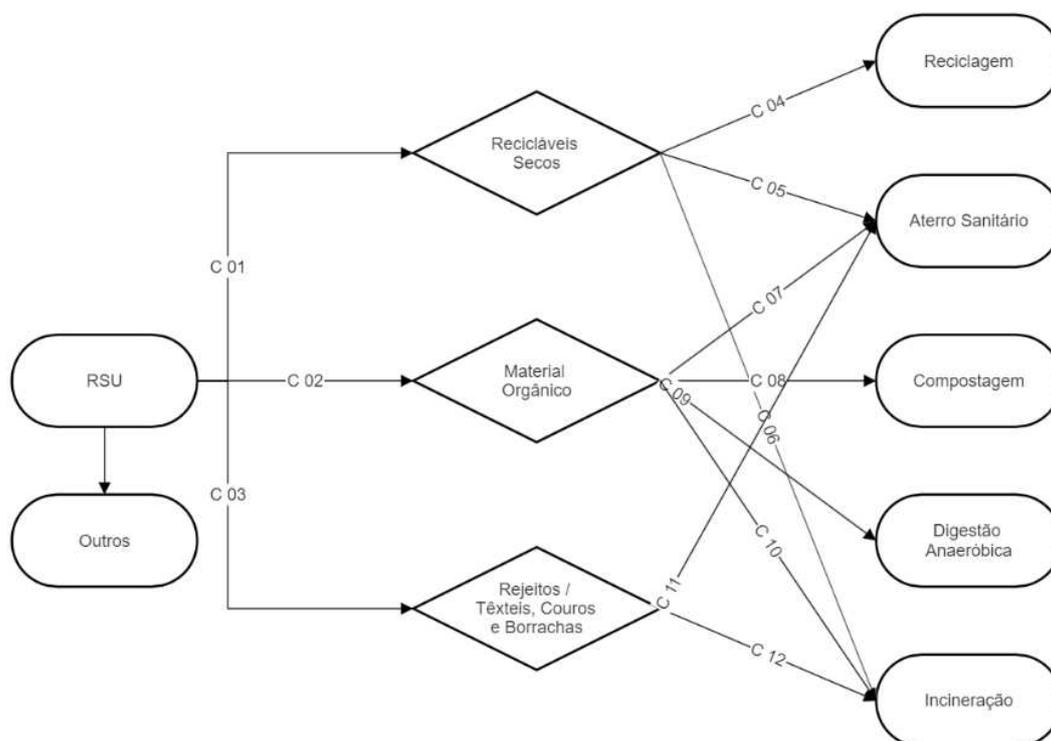
As características de cada técnica de disposição final fazem com que haja limitações no tipo de resíduo que pode ser processado por determinado método. Com base nas informações levantadas na pesquisa bibliográfica, a Tabela 15 demonstra quais tipos de resíduos são compatíveis com determinada técnica de disposição final.

**Tabela 15** - Compatibilidade entre os tipos de resíduos sólidos urbanos e as técnicas de disposição final

Técnica / Tipo de Resíduo	Recicláveis Secos	Material Orgânico	Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas
Reciclagem	X	-	-
Aterro Sanitário	X	X	X
Compostagem	-	X	-
Digestão Anaeróbica	-	X	-
Incineração	X	X	X

Fonte: Do Autor (2024).

Com base nas características apresentadas, a Figura 18 traz a definição de um fluxograma que ilustra o balanço de massa do modelo matemático e as possíveis rotas e correntes de balanço de massa de RSU e as interações entre as técnicas de destinação final.

**Figura 18** – Fluxograma do Modelo Matemático Proposto

Fonte: Do Autor (2024).

Com base no fluxograma apresentado na Figura 18, define-se a Equação 1:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

Onde:

RSU = Projeção da quantidade total de RSU gerados em 2040 em ton;

C 01 = Quantidade de RSU classificados como Recicláveis Secos em ton;

C 02 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico em ton;

C 03 = Quantidade de RSU classificados como Rejeitos, Têxteis, Couros e Borrachas em ton;

OUT = Quantidade de RSU com destinação final Outros em ton.

Com base na gravimetria, englobando parcelas apresentadas na Tabela 2, as Equações 2, 3 e 4 são definidas a seguir::

$$C 01 = 0,336 * RSU \quad (2)$$

$$C 02 = 0,453 * RSU \quad (3)$$

$$C 03 = 0,197 * RSU \quad (4)$$

Considerando o valor total de RSU igual a 98.550.000 ton, os valores para as correntes C 01, C 02 e C 03 são calculados a seguir:

$$C 01 = 33.112.800 \text{ ton}$$

$$C 02 = 44.643.150 \text{ ton}$$

$$C 03 = 19.414.350 \text{ ton}$$

Definido as demais correntes, obtém-se a Equação 5 a seguir, considerando os RSU classificados como Recicláveis Secos:

$$C 01 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

Onde:

C 04 = Quantidade de RSU classificados como Recicláveis Secos com destinação final Reciclagem em ton;

C 05 = Quantidade de RSU classificados como Recicláveis Secos com destinação final Aterro Sanitário em ton;

C 06 = Quantidade de RSU classificados como Recicláveis Secos com destinação final Incineração em ton.

Substituindo-se o valor já conhecido de C 01, obtém-se na Equação 5:

$$33.112.800 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

Definido as demais correntes, obtém-se a Equação 6 a seguir, considerando os RSU classificados como Material Orgânico:

$$C 02 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

Onde:

C 07 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico com destinação final Aterro Sanitário em ton;

C 08 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico com destinação final Compostagem em ton;

C 09 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico com destinação final Digestão Anaeróbica em ton;

C 10 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico com destinação final Incineração em ton.

Substituindo-se o valor já conhecido de C 02, obtém-se na Equação 6:

$$44.643.150 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

Definido as demais correntes, obtém-se a Equação 7 a seguir, considerando os RSU classificados como Rejeitos, Têxteis, Couros e Borrachas:

$$C\ 03 = C\ 11 + C\ 12\ (7)$$

Onde:

C 11 = Quantidade de RSU classificados como Rejeitos, Têxteis, Couros e Borrachas com destinação final Aterro Sanitário em ton;

C 12 = Quantidade de RSU classificados como Rejeitos, Têxteis, Couros e Borrachas com destinação final Incineração em ton.

Substituindo-se o valor já conhecido de C 03, obtém-se na Equação 7:

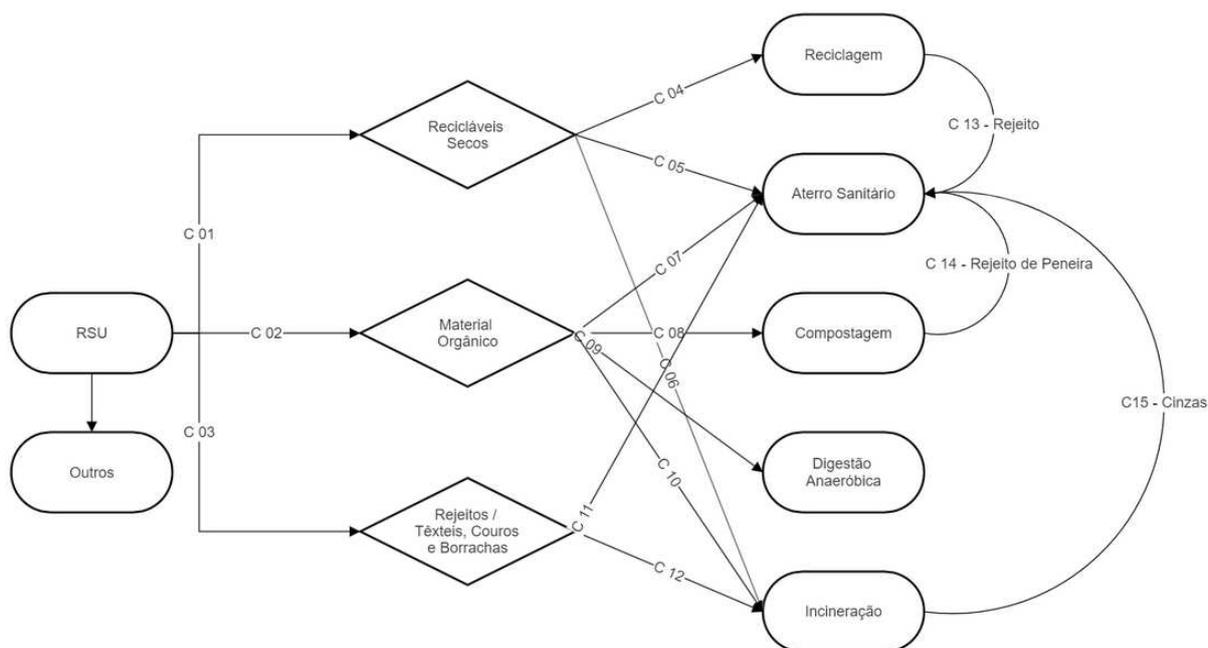
$$19.414.350 = C\ 11 + C\ 12\ (7)$$

Na seção 4.4 deste trabalho foram listadas características de balanço de massa de um sistema de gerenciamento de RSU que serão utilizadas na modelagem matemática, sendo elas:

- 30% de todo material que passa pela triagem de reciclagem é rejeitado e tem como destinação final aterros sanitários;
- 5% de todo material processado na compostagem é rejeito de peneira que tem como destinação final aterros sanitários;
- 20% de todo material processado na incineração resulta em cinzas que tem como destinação final aterros sanitários.

Com base nessas informações, o fluxograma do modelo matemático é incrementado e apresentado na Figura 19:

**Figura 19** – Fluxograma do Modelo Matemático Proposto Com Correntes Adicionais



Fonte: Do Autor (2024).

Com base na informação apresentada do rejeito de materiais destinados a reciclagem, tem-se a definição da Equação 8:

$$C\ 13 = C\ 04 * 0,3\ (8)$$

Onde:

C 13 = Quantidade de RSU classificados como Recicláveis Secos que passam pelo processo de Reciclagem, mas tem como destinação final Aterro Sanitário em ton;

Com base na informação apresentada do rejeito de peneira de compostagem, tem-se a definição da Equação 9:

$$C\ 14 = C\ 08 * 0,05\ (9)$$

Onde:

C 14 = Quantidade de RSU classificados como Material Orgânico que passam pelo processo de Compostagem, mas tem como destinação final Aterro Sanitário em ton;

Com base na informação apresentada das cinzas geradas durante a incineração de RSU, tem-se a definição da Equação 10:

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

Onde:

C 15 = Quantidade de RSU que passam pelo processo de Incineração, mas tem como destinação final Aterro Sanitário em ton;

Definidas todas as correntes do balanço de massa, agrupam-se as correntes de cada técnica de disposição final para definir a quantidade total que cada técnica terá destinada.

Para a Reciclagem, define-se a Equação 11, com base na informação de que 30% do material que passa pela triagem é rejeitado e destinado para Aterro Sanitário. Portanto, considera-se a quantidade de material seco reciclado como sendo 70% da Corrente C 04:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Onde:

REC = Quantidade de RSU que é considerada como Recicláveis Secos reciclados em ton;

Para os Aterros Sanitários, define-se a Equação 12, com base nas correntes definidas de cada classificação de material, adicionando o rejeito da triagem de reciclagem, o rejeito de peneira da compostagem e as cinzas da incineração:

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Onde:

AS = Quantidade de RSU com Destinação Final em Aterros Sanitários em ton;

Para a Compostagem, define-se a Equação 13, com base nas correntes definidas de cada classificação de material:

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Onde:

CO = Quantidade de RSU com Destinação Final Compostagem em ton;

Para a Digestão Anaeróbica, define-se a Equação 14, com base nas correntes definidas de cada classificação de material:

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Onde:

DA = Quantidade de RSU com Destinação Final Digestão Anaeróbica em ton;

Para a Incineração, define-se a Equação 15, com base nas correntes definidas de cada classificação de material:

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \quad (15)$$

Onde:

INC = Quantidade de RSU com Destinação Final Incineração em ton;

Desta forma, a seguir são listadas as equações definidas com base no balanço de massa do sistema de gerenciamento de RSU que servem como restrições do modelo matemático que será utilizado para as simulações:

$$\text{RSU} = \text{C 01} + \text{C 02} + \text{C 03} + \text{OUT} \quad (1)$$

$$33.112.800 = \text{C 04} + \text{C 05} + \text{C06} \quad (5)$$

$$44.643.150 = \text{C 07} + \text{C 08} + \text{C 09} + \text{C 10} \quad (6)$$

$$19.414.350 = \text{C 11} + \text{C 12} \quad (7)$$

$$\text{C 13} = \text{C 04} * 0,3 \quad (8)$$

$$\text{C 14} = \text{C 08} * 0,05 \quad (9)$$

$$\text{C 15} = (\text{C 06} + \text{C 10} + \text{C 12}) * 0,2 \quad (10)$$

Adicionalmente, a seguir são listadas as equações definidas com base no balanço de massa do sistema de gerenciamento de RSU que calcularão dados de saída do modelo matemático:

$$\text{REC} = \text{C 04} * 0,7 \quad (11)$$

$$\text{AS} = \text{C 05} + \text{C 07} + \text{C 11} + \text{C 13} + \text{C 14} + \text{C 15} \quad (12)$$

$$\text{CO} = \text{C 08} \quad (13)$$

$$\text{DA} = \text{C 09} \quad (14)$$

$$\text{INC} = \text{C 06} + \text{C 10} + \text{C 12} \quad (15)$$

É importante salientar que devido as características de alguns processos como a reciclagem, compostagem e incineração, que fazem com que o RSU processados por estas técnicas tenham uma necessidade adicional de destinação final de parcela dos mesmos em aterros sanitários, e portanto, entende-se que um mesmo resíduo nesta situação passe por duas

técnicas diferentes, a soma do conjunto de técnicas utilizadas pode ser superior ao valor inicial de RSU do sistema.

A seguir serão apresentadas e descritas restrições do modelo matemático baseadas nas metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

## **5.2. RESTRIÇÕES COM BASE NAS METAS DO PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Visando garantir o atendimento das metas do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, algumas restrições devem ser adicionadas ao modelo matemático.

Conforme mencionado no Capítulo 4 deste trabalho, a Meta 6 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de BRASIL (2022) tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração seca dos resíduos sólidos para pelo menos 20% do total de RSU gerados em 2040.

Considerando a estimativa para 2040 no total de 97.170.300 toneladas de RSU geradas, seria necessário processar pelo menos 19.434.060 toneladas de RSU na técnica de reciclagem de RSU secos.

Portanto, define-se a Equação 16 a seguir:

$$REC \geq 19.434.060 \quad (16)$$

Substituindo pela corrente, conforme equação (11):

$$C_{04} * 0,7 \geq 19.434.060 \quad (16)$$

Isolando o termo C04:

$$C04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

A Meta 7 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de BRASIL (2022) tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos para pelo menos 13,5% do total de RSU gerados em 2040 através da utilização das técnicas de compostagem e digestão anaeróbica.

Considerando a estimativa para 2040 no total de 97.170.300 toneladas de RSU geradas, seria necessário processar pelo menos 13.117.990,50 toneladas de RSU entre as técnicas de destinação final compostagem e digestão anaeróbica.

Portanto, define-se a Equação 17 a seguir:

$$CO + DA \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

Substituindo pelas correntes, conforme equações (13) e (14):

$$C 08 + C 09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

A Meta 9 do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de BRASIL (2022) tem como objetivo aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos para pelo menos 14,6% do total de RSU gerados em 2040 através da utilização da técnica de incineração.

Considerando a estimativa para 2040 no total de 97.170.300 toneladas de RSU geradas, seria necessário processar pelo menos 14.186.863,80 toneladas de RSU na técnica de incineração.

Portanto, define-se a Equação 18 a seguir:

$$INC \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equação 15:

$$C_{06} + C_{10} + C_{12} \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

A seguir são listadas as equações que serão utilizadas como restrições do modelo matemático que têm como base as metas definidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos para 2040 de BRASIL (2022).

$$C_{04} \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C_{08} + C_{09} \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C_{06} + C_{10} + C_{12} \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Na seguinte seção será definida a função objetivo do modelo matemático para o cenário de otimização de custos operacionais.

### **5.3. DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL**

Para o primeiro cenário, de otimização de custos do sistema de gestão da disposição final de resíduos sólidos urbanos, devem ser considerados os custos por tonelada de cada técnica de disposição final, dado presente na Tabela 10.

Adicionalmente, deve-se levar em conta também a possibilidade de faturamento financeiro proveniente da geração de produtos, como por exemplo o composto orgânico resultante da compostagem, ou então da geração energética, como por exemplo no caso da técnica de incineração.

Portanto, a função objetivo para este cenário se torna uma equação que busca minimizar o somatório dos custos de cada técnica empregada, subtraindo os valores agregados dos produtos obtidos por meio da técnica de disposição final.

O primeiro passo é realizar a somatória dos custos, multiplicando as técnicas por seus custos unitários por tonelada, conforme valores da Tabela 10:

$$\min f(REC, AS, CO, DA, INC) = (REC * 702,22) + (AS * 92,77) + (CO * 70,60) + (DA * 99,87) + (INC * 266,68) \quad (19)$$

Substituindo as técnicas pelas suas correntes definidas conforme equações 11 a 15, obtém-se:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C04 * 0,7) * 702,22) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 92,77) + (C08 * 70,60) + (C09 * 99,87) + ([C06 + C10 + C12] * 266,68) \quad (20)$$

O próximo passo é adicionar o valor agregado gerado por tonelada para cada técnica de disposição.

No caso da reciclagem, observa-se pela Equação 8 que apenas cerca de 70% de todo material que passa pela triagem é de fato reciclável (portanto, 700kg a cada 1 tonelada) e com base no valor médio encontrado na seção 4.10 deste trabalho, obtém-se o o valor médio agregado por tonelada de material reciclado:

$$700\text{kg/ton} * 1,80 \text{ R\$/kg} = \text{R\$}1260 / \text{ton} \quad (21)$$

No caso da compostagem, os valor já foi calculado na seção 4.8 deste trabalho, e é igual a R\\$558 / ton.

Nos casos das técnicas de aterro sanitário, digestão anaeróbica e incineração, os valores também já foram calculados e estão resumidos na Tabela 13.

Portanto, obtém-se a nova função objetivo, considerando também os valores agregados para cada técnica de disposição final:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C04 * 0,7) * [702,22 - 1260]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * [92,77 - 26,38]) + (C08 * [70,60 - 558]) + (C09 * [99,87 - 55,74]) + ([C06 + C10 + C12] * [266,68 - 211,82]) \quad (22)$$

Realizando as subtrações e obtendo-se a função objetivo final:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C04 * 0,7) * [- 577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [- 487,40]) + (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \quad (23)$$

É importante observar que no caso da simulação retornar um valor negativo, significa que o conjunto das soluções na verdade representa uma combinação resultante em lucro, considerando apenas aspectos operacionais e os valores agregados dos produtos gerados.

#### 5.4. RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO CUSTO OPERACIONAL

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C04 * 0,7) * [-577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [-487,40]) + (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \quad (23)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C01 + C02 + C03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C04 + C05 + C06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C07 + C08 + C09 + C10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C11 + C12 \quad (7)$$

$$C13 = C04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C14 = C08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C15 = (C06 + C10 + C12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C08 + C09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C06 + C10 + C12 \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Na seguinte seção será definida a função objetivo do modelo matemático para o cenário de minimização das emissões de gases do efeito estufa.

#### 5.5. DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA

Para o segundo cenário, de minimização de emissões de gases estufa, devem ser considerados os valores de emissão por tonelada de cada técnica de disposição final, dado presente na Tabela 11.

Estes dados já abrangem, no caso da reciclagem, a compensação pela quantidade de recursos não comprometidos ao utilizar-se de material reciclado ao invés do uso de matéria-prima virgem, e por isso o valor calculado de emissões no caso de reciclagem tem resultado negativo.

Neste caso, dá-se a função objetivo como a minimização da somatória das quantidades de tonelada de material processado por cada técnica multiplicado pelo valor de emissões de gases estufa por tonelada:

$$\min f(REC, AS, CO, DA, INC) = (REC * [- 2548,72]) + (AS * 1,59) + (CO * 0,04) + (DA * 0,04) + (INC * 0,38) \quad (24)$$

Nesta etapa da modelagem é importante observar que as cinzas da incineração que são dispostas em aterro sanitário já não possuem mais potencial de emissões de gases estufa, e portanto, a corrente C15 é retirada deste cálculo.

Adicionalmente, como visto anteriormente, apenas 60% do material reciclável seco que passa pela triagem de reciclagem é de fato reciclado, portanto é considerado como reciclado apenas 60% da corrente C04.

Substituindo pelas correntes, obtém-se:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0,7 * [- 2548,72]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (25)$$

Simplificando o primeiro termo da equação:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [- 1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (26)$$

## 5.6. RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES ESTUFA

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [- 1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (26)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Na seguinte seção será definida a função objetivo do modelo matemático para o cenário de otimização de geração energética.

## **5.7. DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO ENERGÉTICA**

Para o último cenário, de otimização da geração energética, devem ser considerados os valores de potencial de geração energética por tonelada de cada técnica de disposição final, dado presente na Tabela 12.

Neste caso, apenas três técnicas (Aterro Sanitário, Digestão Anaeróbica e Incineração) têm potencial de geração de energia elétrica, e portanto, a função objetivo conta apenas com estas três técnicas com valor diferente de zero. Os valores das demais técnicas, serão definidos pela simulação por conta das restrições presentes no modelo matemático.

Portanto, dá-se a função objetivo como a maximização da somatória das quantidades de tonelada de material processado por cada técnica multiplicado pelo valor de potencial de geração energética por tonelada.

Assim como no segundo cenário, é importante observar que as cinzas da incineração que são dispostas em aterro sanitário já não possuem mais potencial de geração de energia elétrica, e portanto, a corrente C15 é retirada deste cálculo.

$$\max f(REC, AS, CO, DA, INC) = (REC * 0) + (AS * 71) + (CO * 0) + (DA * 150) + (INC * 570) \quad (27)$$

Substituindo pelas correntes, obtém-se a função objetivo final:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

## 5.8. RESUMO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO ENERGÉTICA

Função Objetivo:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C 04 + C 05 + C06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

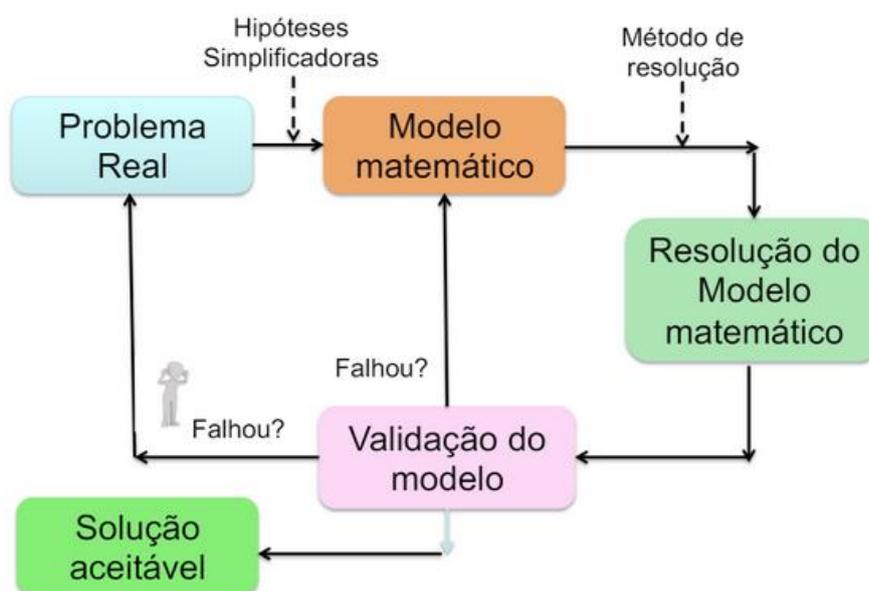
No próximo capítulo será apresentado o método utilizado para validação do modelo matemático elaborado.

## 6. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Conforme mencionado em SARGENT (2010), a validação de um modelo matemático é usualmente definida como a comprovação de que um modelo computadorizado, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui um grau satisfatório de precisão e consistente com o intuito da aplicação do modelo. O autor menciona que isso usualmente requer identificar as variáveis de saída de interesse do modelo e especificar a gama aceitável de precisão para cada uma destas variáveis.

Conforme observado na Figura 20 e explicado por ANDRETTA (2024), o modelo matemático consiste na simplificação matemática de um problema real, que é submetido a um método de resolução e a validação busca a avaliação se o conjunto solução do modelo é aceitável para o problema real inicialmente identificado, ou se o modelo matemático precisa ser ajustado para que as soluções apresentem o nível de aceitação requerido.

**Figura 20** – Representação de Fluxograma de Modelagem, Resolução e Validação de um problema



Fonte: Andretta (2024).

Para a validação do modelo matemático proposto por este trabalho, foram selecionadas duas técnicas mencionadas por SARGENT (2010) para validação de modelos:

- Validação de Dados Históricos: onde coletam-se dados históricos de um sistema e parte deles são utilizados para construção do modelo e outra parte é utilizada para determinar se o modelo se comporta como o sistema;
- Racionalismo de métodos históricos: onde requiere-se que hipóteses sobre o modelo estejam claramente declaradas e aceitas, então deduções lógicas são realizadas destas assunções com finalidade de desenvolver um modelo válido.

Para a validação operacional foi utilizado o método mencionado por SARGENT (2010), de comparação de comportamentos de saída do modelo utilizando testes de hipóteses, que segundo o autor é um método indicado para validação operacional de um modelo pois permite a tomada de decisões objetivas.

Neste método, testes de hipóteses são realizados para comparar dados obtidos através de variáveis de saída de um modelo matemático com informações de um sistema para determinar se as saídas do modelo simulado possuem características aceitáveis dentro de uma faixa de precisão.

O autor ainda menciona que o primeiro passo é declarar as hipóteses a serem testadas, de forma a discriminar hipóteses que tornam o modelo válido para uma faixa aceitável de precisão e hipóteses que tornam o modelo inválido para esta mesma faixa.

A validação do modelo matemático ocorrerá por meio de simulação do mesmo para três diferentes cidades brasileiras que serão selecionadas posteriormente, os resultados dessa simulação serão analisados de acordo com as hipóteses listadas a seguir, que devem ser satisfeitas para a efetiva validação do modelo.

## **6.1. TESTE DE HIPÓTESES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO**

Para a realização do teste de hipóteses para validação do modelo matemático, as seguintes hipóteses foram criadas e devem ser satisfeitas com a finalidade de validar o modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do

modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

- Hipótese 03: Para o cenário de otimização de custos, o custo total do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

- Hipótese 04: Para o cenário de redução de emissões, o total de emissões do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

- Hipótese 05: Para o cenário de otimização de recuperação energética, o total de geração de kWh do conjunto deve ser superior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

As hipóteses 01 e 02 devem ser satisfeitas nos três cenários propostos para as cidades que serão selecionadas para a devida validação do sistema, enquanto as hipóteses 03, 04 e 05 devem ser satisfeitas para os cenários mencionados nelas.

## **6.2. SELEÇÃO DE CIDADES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO**

Para a validação do modelo matemático, foram selecionadas três cidades brasileiras e o modelo foi simulado para cada uma destas cidades para verificação da aplicabilidade do conjunto solução de forma satisfatória ao teste de hipóteses. A seleção das cidades ocorreu seguindo os seguintes critérios:

- Uma cidade com população inferior a 50 mil habitantes, uma cidade com população

entre 50 mil e 100 mil habitantes e uma cidade com população superior a 100 mil habitantes que segundo a Política Nacional de Assistência Social (PNAS) de MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL E COMBATE À FOME(2004), teriam respectivamente a classificação de Pequenos I ou Pequenos II (para até 50 mil habitantes), Médios (entre 50.001 a 100.000 habitantes) e Grandes ou Metrôpoles (para acima de 100.001 habitantes);

- Cada cidade selecionada deve pertencer a uma diferente região geográfica do Brasil;
- Disponibilidade de dados secundários recentes: relatórios técnicos, plano municipal de resíduos sólidos, gravimetria de resíduos sólidos, emitidos a partir de 2021.

Satisfazendo os critérios listados, foram selecionados os seguintes municípios para análise:

- Cabedelo, situada no estado da Paraíba, região Nordeste, com população estimada de 66.519 pessoas de acordo com IBGE(2024);
- Adrianópolis, situada no estado do Paraná, região Sul, com população estimada de 6.256 pessoas de acordo com IBGE(2024);
- Valinhos, situada no estado de São Paulo, região Sudeste, com população estimada de 126.373 pessoas de acordo com IBGE(2024).

Na próxima sessão será realizada a adequação do modelo matemático para cada uma das três cidades selecionadas para realizar a validação do mesmo. Após esta adequação do modelo para cada uma das situações, ele será simulado e posteriormente será realizado o teste de hipóteses definido para investigar a validação do modelo matemático.

### **6.3. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE CABEDELLO-PB**

Para o primeiro município a ser utilizado para validação do modelo matemático, selecionou-se a cidade de Cabedelo, do estado da Paraíba, com população estimada de 66.519

pessoas de acordo com IBGE(2024).

Para a obtenção dos dados necessários para adequação do modelo matemático, foi utilizado o relatório 1º Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB realizado por Prefeitura Municipal de Cabedelo (2023).

De acordo com este relatório, todos os 24 bairros da cidade de Cabedelo-PB somados, geram em torno de 81,4 toneladas de RSU por dia, dado que projetado para 365 dias por ano, resulta no total de 29.711 toneladas de RSU gerados anualmente. Este valor dividido pelo número de habitantes, resulta em cerca de 446,65 kg/hab.ano , valor acima de média nacional de 381 kg/hab.ano, conforme relatório da ABRELPE (2023).

O resultado da gravimetria realizada é apresentado na Tabela 16:

**Tabela 16 -** Resultado do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB

ITEM	CATEGORIAS	QUANTID. (KG)	(%)	QTDE. DE BOMBONAS	MASSA ESP. (KG/M3)
1	Restos de Alimentos (fração orgânica)	6095,6	27,33%	93	327,7
2	Madeira e Poda	3888	17,43%	71	273,8
3	Diversos (finos e misturados)	3185,2	14,28%	57	279,4
4	Tecido, Trapo, Couro e Borracha	1050,6	4,71%	40	131,3
5	Vidro	605,2	2,71%	30	100,9
6	Papel	424,1	1,90%	28	75,7
7	Papelão	1685	7,56%	81	104,0
8	Construção Civil/ Demolição/Isopor	826,2	3,70%	42	98,4
9	Metais Não Ferrosos/ Alumínio e Outros	278,4	1,25%	21	66,3
10	Plástico Grosso (Catemba)	879,3	3,94%	58	75,8
11	Especiais (perigosos, infectantes, inflamáveis)	167,6	0,75%	13	64,5
12	Embalagens Compostas e Higiene Pessoal	1495,4	6,71%	49	152,6
13	Plásticos Finos (sacolas plásticas)	1490,6	6,68%	67	111,2
14	Metais Ferrosos	229,8	1,03%	20	57,5
<b>TOTAL</b>		<b>22301</b>	<b>100,00%</b>	<b>670</b>	<b>166,4</b>

Fonte: Prefeitura Municipal de Cabedelo, p. 39 (2023).

A categoria “Construção Civil / Demolição / Isopor”, foi desconsiderada da análise, pois os resíduos da construção civil não são considerados RSU, assim como a categoria “Especiais (perigosos, infectantes, inflamáveis)”, pois resíduos desta natureza também devem ser coletados de forma separada, não sendo considerados RSU. Estas duas categorias

somaram 4,45% do total analisado, e portanto, da quantidade total anual de RSU, anteriormente considerada 29.711 toneladas, subtraindo-se esta porcentagem, para os cálculos do modelo, o total de RSU gerado anualmente será considerado 28.388,86 toneladas.

As porcentagens da gravimetria foram recalculadas sem os pesos das categorias mencionadas, resultando nos dados da Tabela 17:

**Tabela 17** - Resultados Ajustados do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB

<b>Categoria do Resíduo</b>	<b>Percentual</b>
Restos de Alimentos	28.11%
Madeira e Poda	18.25%
Diversos (finos e misturados)	14.95%
Tecido, Trapo, Couro e Borracha	4.93%
Vidro	2.84%
Papel	1.99%
Papelão	7.91%
Metais Não Ferrosos / Alumínio e Outros	1.81%
Plástico Grosso	4.13%
Embalagens Compostas e de Higiene Pessoal	7.02%
Plásticos Finos	7.00%
Metais Ferrosos	1.08%
<b>Total</b>	<b>100.00%</b>

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Cabedelo (2023).

Para adequação ao modelo matemático, as seguintes adequações e agrupamento de categorias foram realizadas:

- “Restos de Alimentos” e “Madeira e Poda” foram reclassificadas como “Material Orgânico”;
- “Diversos (finos e misturados)” e “Tecido, Trapo, Couro e Borracha” foram reclassificadas como “Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas”;
- “Vidro”, “Papel”, “Papelão”, “Metais Não Ferrosos / Alumínio e Outros”, “Plástico Grosso”, “Embalagens Compostas e de Higiene Pessoal”, “Plásticos Finos” e “Metais Ferrosos” foram reclassificadas como “Recicláveis Secos”.

Portanto, após estas adequações e agrupamentos, se obteve os percentuais observados na Tabela 18.

Estes valores aproximam-se bastante da média nacional que é de 33,6% para Recicláveis Secos, 45,3% para Material Orgânico e 19,7% para Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas, segundo ABRELPE (2023).

**Tabela 18** - Resultados Agrupados do Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB

<b>Categoria do Resíduo</b>	<b>Percentual</b>
Recicláveis Secos	33.76%
Material Orgânico	46.36%
Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas	19.88%
Total	100.00%

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Cabedelo (2023).

Estes valores aproximam-se bastante da média nacional que é de 33,6% para Recicláveis Secos, 45,3% para Material Orgânico e 19,7% para Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas, segundo ABRELPE (2023).

Trazendo estes valores para o modelo matemático definido, obtém-se as equações 2, 3 e 4 para este cenário de validação:

$$C 01 = 0,3376 * RSU \text{ (2)}$$

$$C 02 = 0,4636 * RSU \text{ (3)}$$

$$C 03 = 0,1988 * RSU \text{ (4)}$$

Considerando o valor total de RSU gerados anualmente como sendo 28.388,86 toneladas, os valores para as correntes C 01, C 02 e C 03 são calculados a seguir:

$$C 01 = 9.584,08 \text{ ton (2)}$$

$$C 02 = 13.161,07 \text{ ton (3)}$$

$$C 03 = 5.643,61 \text{ ton (4)}$$

Substituindo-se estes valores nas equações 5, 6 e 7, obtém-se:

$$9.584,08 = C 04 + C 05 + C 06 \text{ (5)}$$

$$13.161,07 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \text{ (6)}$$

$$5.643,61 = C 11 + C 12 \text{ (7)}$$

O próximo passo é ajustar as equações do modelo referentes a restrições relacionadas às metas de 2040 do PLANARES. A primeira é a Meta 6, que tem como objetivo aumentar a

reciclagem da fração seca dos resíduos sólidos para pelo menos 20% do total de RSU gerados.

Para um valor total de RSU de 28.388,86 toneladas, 20% desta quantia representa 5.677,77 toneladas, valor que é substituído na Equação 16 do modelo:

$$REC \geq 5.677,77 \quad (16)$$

Substituindo pela corrente, conforme Equação 11:

$$C\ 04 * 0,7 \geq 5.677,77 \quad (16)$$

Isolando o termo C 04:

$$C\ 04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

A próxima equação é referente a Meta 7 do PLANARES, que tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos para pelo menos 13,5% do total de RSU gerados através da utilização das técnicas de compostagem e digestão anaeróbica.

Para um valor total de RSU de 28.388,86 toneladas, 13,5% desta quantia representa 3.832,50 toneladas, valor que é substituído na Equação 17 do modelo:

$$CO + DA \geq 3.832,50 \quad (17)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equações 13 e 14:

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

Por último, a Meta 9 do PLANARES tem como objetivo aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU para pelo menos 14,6% do total gerado através da utilização da técnica de incineração.

Para um valor total de RSU de 28.388,86 toneladas, 14,6% desta quantia representa 4.144,77 toneladas, valor que é substituído na Equação 18 do modelo:

$$INC \geq 4.144,77 \quad (18)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equação 15:

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

A seguir são listadas as equações ajustadas para o município de Cabedelo-PB que

serão utilizadas como restrições do modelo matemático que têm como base as metas definidas pelo PLANARES:

$$C\ 04 \geq 8.111,10 \text{ (16)}$$

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 3.832,50 \text{ (17)}$$

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77 \text{ (18)}$$

As demais equações permanecem inalteradas em relação ao modelo original, portanto, para o primeiro cenário, de otimização de custos, o modelo matemático para os dados do município de Cabedelo-PB é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = & ((C\ 04 * 0,7) \\ & * [- 577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [- 487,40]) + \\ & (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \text{ (23)} \end{aligned}$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C\ 01 + C\ 02 + C\ 03 + OUT \text{ (1)}$$

$$9.584,08 = C\ 04 + C\ 05 + C\ 06 \text{ (5)}$$

$$13.161,07 = C\ 07 + C\ 08 + C\ 09 + C\ 10 \text{ (6)}$$

$$5.643,61 = C\ 11 + C\ 12 \text{ (7)}$$

$$C\ 13 = C\ 04 * 0,3 \text{ (8)}$$

$$C\ 14 = C\ 08 * 0,05 \text{ (9)}$$

$$C\ 15 = (C\ 06 + C\ 10 + C\ 12) * 0,2 \text{ (10)}$$

$$C\ 04 \geq 8.111,10 \text{ (16)}$$

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 3.832,50 \text{ (17)}$$

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77 \text{ (18)}$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 21 e 22:

**Figura 21** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de custos

Microsoft Excel 16.0 Answer Report  
 Worksheet: [Simulação.xlsx]Custos Cabedelo  
 Report Created: 10/06/2024 14:52:14  
 Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
 Solver Engine  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,094 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
 Solver Options  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 22** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de custos

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	R\$ 0,00	-R\$ 9.612.237,96

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	9584,08	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	0	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	13161,07	Contin
\$G\$3	C09	0	0	Contin
\$H\$3	C10	0	0	Contin
\$I\$3	C11	0	1498,84	Contin
\$J\$3	C12	0	4144,77	Contin
\$K\$3	C13	0	3833,632	Contin
\$L\$3	C14	0	658,0535	Contin
\$M\$3	C15	0	828,954	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 21, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,094 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 22, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -R\$9.612.237,96, o que se tratando de um custo, representa na verdade um potencial de faturamento, uma vez que as técnicas de reciclagem e compostagem tem saldo positivo financeiro dos produtos gerados em relação ao custo do processamento da técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do

modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \text{ (11)}$$

Substituindo C 04:

$$REC = 9.584,08 * 0,7 \text{ (11)}$$

$$\mathbf{REC = 6.708,86 \text{ ton (11)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.708,86 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \text{ (12)}$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 1.498,84 + 3.833,632 + 658,0535 + 828,954 \text{ (12)}$$

$$\mathbf{AS = 6.819,4795 \text{ (12)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.819,4795 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \text{ (13)}$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 13.161,07 \text{ (13)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 13.161,07 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a compostagem.

$$DA = C 09 \text{ (14)}$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 0 \text{ (14)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de digestão anaeróbica não seria utilizada.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$\text{INC} = 0 + 0 + 4.144,77 \text{ (15)}$$

$$\text{INC} = \mathbf{4.144,77 \text{ (15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 4.144,77 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 19 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização de custos aplicado para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB:

**Tabela 19** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Cabedelo-PB

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	6.708,856
Aterro	6.819,4795
Compostagem	13.161,07
Digestão Anaeróbica	0
Incineração	4.144,77

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 22 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \text{ (29)}$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 22:

$$9.584,08 + 13.161,07 + 5.643,61 = 9.584,08 + 0 + 0 + 0 + 13.161,07 + 0 + 0 + 1.498,84 + 4.144,77$$

$$28.388,76 = 28.388,76$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Cabedelo-PB:

$$C\ 04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 22:

$$\mathbf{9.584,08 \geq 8.111,10 \quad (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 22:

$$13.131,07 + 0 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

$$\mathbf{13.131,07 \geq 3.832,50 \quad (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 22:

$$0 + 0 + 4144,77 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

$$\mathbf{4.144,77 \geq 4.144,77 \quad (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 03: Para o cenário de otimização de custos, o custo total do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o custo encontrado pela função objetivo de -R\$9.612.237,96 deve ser menor do que o valor considerando que as 28.388,76 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um custo de R\$66,39. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de R\$1.884.729,78, portanto, considera-se que a Hipótese 03 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 03 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização de custos para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB.

O cenário seguinte a ser validado, é o de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 26. Portanto, para o segundo cenário, de minimização de emissões, o modelo matemático para os dados do município de Cabedelo-PB é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [- 1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (26)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$9.584,08 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$13.161,07 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$5.643,61 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 23 e 24:

**Figura 23** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário minimização de emissões

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet: [Simulação.xlsx]Emissões Cabedelo**  
**Report Created: 10/06/2024 15:35:11**  
**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,109 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 24** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário minimização de emissões

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	0	-17088434,31

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	9584,08	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	0	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	13161,07	Contin
\$H\$3	C10	0	0	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	5643,61	Contin
\$K\$3	C13	0	3833,632	Contin
\$L\$3	C14	0	0	Contin
\$M\$3	C15	0	1128,722	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 23, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,109 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 24, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -17.088.434,31(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano) , o que representa um saldo negativo de emissões, pois observando a corrente C 04, referente à reciclagem, que possui um alto potencial de neutralizar e também compensar emissões, uma vez que uma série de recursos deixa de ser utilizada e fabricada quando materiais são reciclados, o que contribui para uma pegada de carbono positiva com a utilização desta técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7\ (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 9.584,08 * 0,7\ (11)$$

$$\mathbf{REC = 6.708,86\ ton\ (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.708,86 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C\ 05 + C\ 07 + C\ 11 + C\ 13 + C\ 14 + C\ 15\ (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 3.833,632 + 0 + 1.128,722\ (12)$$

$$\mathbf{AS = 4.962,354\ (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 4.962,354 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C\ 08\ (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0\ (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C\ 09\ (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 13.161,07 (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 13.161,07 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$\text{INC} = \text{C 06} + \text{C 10} + \text{C 12} \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$\text{INC} = 0 + 0 + 5.643,61 \text{ (15)}$$

$$\mathbf{\text{INC} = 5.643,61 (15)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 5.643,61 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 20 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa aplicado para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB:

**Tabela 20** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Cabedelo-PB

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	6.708,856
Aterro	4.962,354
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	13.161,07
Incineração	5.643,61

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 24 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 24:

$$9.584,08 + 13.161,07 + 5.643,61 = 9.584,08 + 0 + 0 + 0 + 0 + 13.161,07 + 0 + 0 + 5.643,61$$

$$28.388,76 = 28.388,76$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Cabedelo-PB:

$$C04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 24:

$$\mathbf{9.584,08 \geq 8.111,10 \quad (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C08 + C09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 24:

$$0 + 13.131,07 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

$$\mathbf{13.131,07 \geq 3.832,50 \quad (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77\ (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 24:

$$0 + 0 + 5.643,61 \geq 4.144,77\ (18)$$

$$\mathbf{5.643,61 \geq 4.144,77\ (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 04: Para o cenário de redução de emissões, o total de emissões do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de emissões encontrado pela função objetivo do modelo matemático de -17.088.434,31(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano) deve ser menor do que o valor considerando que as 28.388,76 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 1,59(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano). Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 45.138,13(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), portanto, considera-se que a Hipótese 04 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 04 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de minimização de emissões de gases do efeito estufa para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB.

O cenário seguinte a ser validado, é o de otimização do potencial de geração energética, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 28. Portanto, para o terceiro cenário, de otimização do potencial de geração energética, o modelo matemático para os dados do município de Cabedelo-PB é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$9.584,08 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$13.161,07 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$5.643,61 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 25 e 26:

**Figura 25** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de potencial de geração energética

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**

**Worksheet: [Simulação.xlsx]Potencial Energético Cabedelo**

**Report Created: 10/06/2024 16:25:01**

**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**

**Solver Engine**

Engine: Simplex LP

Solution Time: 0,109 Seconds.

Iterations: 11 Subproblems: 0

**Solver Options**

Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling

Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 26** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Cabedelo-PB, cenário otimização de potencial de geração energética

Objective Cell (Max)				
Cell	Name	Original Value	Final Value	
\$P\$5	FO	0	10178971,44	

Variable Cells				
Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	8111,1	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	1472,98	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	3832,5	Contin
\$H\$3	C10	0	9328,57	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	5643,61	Contin
\$K\$3	C13	0	3244,44	Contin
\$L\$3	C14	0	0	Contin
\$M\$3	C15	0	3289,032	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 25, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,109 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 26, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor de 10.178.971,44kWh como sendo o potencial de geração energética para o conjunto solução encontrado.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7\ (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 8.111,10 * 0,7\ (11)$$

$$REC = 5.677,77\ ton\ (11)$$

Portanto, para este conjunto solução, 5.677,77 toneladas de RSU teriam como técnica

de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 3.244,44 + 0 + 3.289,032 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 6.533,472 \text{ ton (12)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.533,472 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0 \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 3.832,5 \text{ ton(14)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 3.832,5 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \quad (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 1.472,98 + 9.328,57 + 5.643,61 \quad (15)$$

$$\mathbf{INC = 16.445,16 \text{ ton(15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 16.445,16 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 21 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de

otimização de potencial de geração energética aplicado para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB:

**Tabela 21** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Cabedelo-PB

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	5.677,77
Aterro	6.533,472
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	3.832,50
Incineração	16.445,16

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 26 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 26:

$$9.584,08 + 13.161,07 + 5.643,61 = 8.111,1 + 0 + 1.472,98 + 0 + 0 + 3.832,5 + 9.328,57 + 0 + 5.643,61$$

$$28.388,76 = 28.388,76$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de

restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Cabedelo-PB:

$$C\ 04 \geq 8.111,10 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 26:

$$\mathbf{8.111,10 \geq 8.111,10 \quad (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 26:

$$0 + 13.131,07 \geq 3.832,50 \quad (17)$$

$$\mathbf{13.131,07 \geq 3.832,50 \quad (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 26:

$$1.472,98 + 9.328,57 + 5.643,61 \geq 4.144,77 \quad (18)$$

$$\mathbf{16.445,16 \geq 4.144,77 \quad (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 05: Para o cenário otimização de recuperação energética, o total de geração de kWh do conjunto deve ser superior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de potencial de geração energética encontrado pela função objetivo do modelo matemático de 10.178.971,44kWh deve ser maior do que o valor

considerando que as 28.388,76 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 71kWh/ton. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 2.015.601,96kWh, portanto, considera-se que a Hipótese 05 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 05 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização do potencial de geração energética para os dados obtidos do município de Cabedelo-PB, e também se conclui que o modelo está validado para os três diferentes cenários que se propõe para este município.

#### **6.4. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE ADRIANÓPOLIS-PR**

Para o segundo município a ser utilizado para validação do modelo matemático, selecionou-se a cidade de Adrianópolis, do estado do Paraíba, com população estimada de 6.256 pessoas de acordo com IBGE(2024).

Para a obtenção dos dados necessários para adequação do modelo matemático, foi utilizado o relatório Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira realizado pelo consórcio CONRESOL (2022).

De acordo com este relatório, o município de Adrianópolis gera em torno de 694,18 toneladas de RSU anualmente. Este valor dividido pelo número de habitantes, resulta em cerca de 110,96 kg/hab.ano, valor bastante abaixo de média nacional de 381 kg/hab.ano, conforme relatório da ABRELPE (2023). Adicionalmente, observa-se neste relatório do município de Adrianópolis-PR, que devido a baixa população, os RSU gerados na cidade são encaminhados a Curitiba-PR para tratamento e disposição final.

O resultado da gravimetria realizada neste relatório é apresentado na Tabela 22:

**Tabela 22** - Resultado do Estudo de Gravimetria do Município de Adrianópolis-PR

<b>Material</b>	<b>Porcentagem</b>
Alumínio	0,00%
Metais Ferrosos	0,00%
Papelão	3,49%
Papel Misto	1,83%
Papel Branco	3,14%
Jornal e Revista	0,00%
Embalagem Cartonada Longa Vida	4,30%
Higiênicos	4,45%
Fralda	14,43%
PET Cristal	2,04%
PET Colorida	0,00%
PEAD Rígido	4,44%
PP Rígido	1,97%
Plástico Filme	4,51%
Plástico Metalizado	0,00%
Isopor e Espumas	0,00%
Tapo	8,99%
Borracha	1,54%
Madeira	2,18%
Pedra	0,00%
Vidro	4,86%
Lixo Eletrônico	0,00%
Rejeito Papel	0,00%
Rejeito Papelão	3,20%
Rejeito Plástico Filme	1,82%
Rejeito Plástico Rígido	0,00%
Orgânicos	32,81%

Fonte: Adaptado de CONRESOL(2022, p. 40).

Para adequação ao modelo matemático, as seguintes adequações e agrupamento de categorias foram realizadas:

- “Orgânicos” foi reclassificada como “Material Orgânico”;
- “Alumínio”, “Metais Ferrosos”, “Papelão”, “Papel Misto”, “Papel Branco”, “Jornal e Revista”, “Embalagem Cartonada Longa Vida”, “PET Cristal”, “PET Colorida”, “PEAD Rígido”, “PP Rígido”, “Plástico Filme”, “Plástico Metalizado”, “Isopor e Espumas” e “Vidro” foram reclassificadas como “Recicláveis Secos”.
- “Higiênicos”, “Fralda”, “Tapo”, “Borracha”, “Madeira”, “Pedra”, “Lixo Eletrônico”, “Rejeito Papel”, “Rejeito Papelão”, “Rejeito Plástico Filme” e

“Rejeito Plástico Rígido” foram reclassificadas como “Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas”;

Portanto, após estas adequações e agrupamentos, se obteve os percentuais observados na Tabela 23:

**Tabela 23** - Resultados Agrupados do Estudo de Gravimetria do Município de Adrianópolis-PR

<b>Categoria do Resíduo</b>	<b>Percentual</b>
Recicláveis Secos	30,58%
Material Orgânico	32,81%
Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas	36,61%
Total	100,00%

Fonte: Adaptado de CONRESOL (2022).

O valor percentual dos recicláveis secos aproximam-se da média nacional que é de 33,6%, mas com alguma diferença para as categorias Material Orgânico e Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas que possuem média nacional de 45,3% e 19,7% respectivamente, segundo ABRELPE (2023).

Trazendo estes valores para o modelo matemático definido, obtém-se as equações 2, 3 e 4 para este cenário de validação:

$$C\ 01 = 0,3058 * RSU\ (2)$$

$$C\ 02 = 0,3281 * RSU\ (3)$$

$$C\ 03 = 0,3661 * RSU\ (4)$$

Considerando o valor total de RSU gerados anualmente como sendo 694,18 toneladas, os valores para as correntes C 01, C 02 e C 03 são calculados a seguir:

$$C\ 01 = 212,28\ ton\ (2)$$

$$C\ 02 = 227,76\ ton\ (3)$$

$$C\ 03 = 254,14\ ton\ (4)$$

Substituindo-se estes valores nas equações 5, 6 e 7, obtém-se:

$$212,28 = C\ 04 + C\ 05 + C\ 06\ (5)$$

$$227,76 = C\ 07 + C\ 08 + C\ 09 + C\ 10\ (6)$$

$$254,14 = C\ 11 + C\ 12\ (7)$$

O próximo passo é ajustar as equações do modelo referentes a restrições relacionadas às metas de 2040 do PLANARES. A primeira é a Meta 6, que tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração seca dos resíduos sólidos para pelo menos 20% do total de RSU gerados.

Para um valor total de RSU de 694,18 toneladas, 20% desta quantia representa 138,84 toneladas, valor que é substituído na Equação 16 do modelo:

$$\text{REC} \geq 138,84 \quad (16)$$

Substituindo pela corrente, conforme Equação 11:

$$C\ 04 * 0,7 \geq 138,84 \quad (16)$$

Isolando o termo C 04:

$$C\ 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

A próxima equação é referente a Meta 7 do PLANARES, que tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos para pelo menos 13,5% do total de RSU gerados através da utilização das técnicas de compostagem e digestão anaeróbica.

Para um valor total de RSU de 694,18 toneladas, 13,5% desta quantia representa 93,71 toneladas, valor que é substituído na Equação 17 do modelo:

$$CO + DA \geq 93,71 \quad (17)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equações 13 e 14:

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

Por último, a Meta 9 do PLANARES tem como objetivo aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU para pelo menos 14,6% do total gerado através da utilização da técnica de incineração.

Para um valor total de RSU de 694,18 toneladas, 14,6% desta quantia representa 101,35 toneladas, valor que é substituído na Equação 18 do modelo:

$$\text{INC} \geq 101,35 \quad (18)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equação 15:

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

A seguir são listadas as equações ajustadas para o município de Adrianópolis-PR que serão utilizadas como restrições do modelo matemático que têm como base as metas definidas pelo PLANARES:

$$C\ 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

As demais equações permanecem inalteradas em relação ao modelo original, portanto, para o primeiro cenário, de otimização de custos, o modelo matemático para os dados do município de Adrianópolis-PR é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = & ((C\ 04 * 0,7) \\ & * [-\ 577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [-\ 487,40]) + \\ & (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \quad (23) \end{aligned}$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C\ 01 + C\ 02 + C\ 03 + OUT \quad (1)$$

$$212,28 = C\ 04 + C\ 05 + C\ 06 \quad (5)$$

$$227,76 = C\ 07 + C\ 08 + C\ 09 + C\ 10 \quad (6)$$

$$254,14 = C\ 11 + C\ 12 \quad (7)$$

$$C\ 13 = C\ 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C\ 14 = C\ 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C\ 15 = (C\ 06 + C\ 10 + C\ 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C\ 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 27 e 28:

**Figura 27** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de custos

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet: [Simulação.xlsx]Custos Adrianópolis**  
**Report Created: 11/06/2024 11:49:19**  
**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,11 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 28** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de custos

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	R\$ 0,00	-R\$ 173.456,25

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	212,28	Contín
\$C\$3	C05	0	0	Contín
\$D\$3	C06	0	0	Contín
\$E\$3	C07	0	0	Contín
\$F\$3	C08	0	227,76	Contín
\$G\$3	C09	0	0	Contín
\$H\$3	C10	0	0	Contín
\$I\$3	C11	0	152,79	Contín
\$J\$3	C12	0	101,35	Contín
\$K\$3	C13	0	84,912	Contín
\$L\$3	C14	0	11,388	Contín
\$M\$3	C15	0	20,27	Contín

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 27, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,11 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 28, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -R\$173.456,25, o que se tratando de um custo, representa na verdade um potencial de faturamento, uma vez que as técnicas de reciclagem e compostagem tem saldo positivo financeiro dos produtos gerados em relação ao custo do processamento da técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 212,27 * 0,7 \quad (11)$$

$$\mathbf{REC = 148,589 \text{ ton} \quad (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 148,589 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 152,79 + 101,35 + 11,388 + 20,27 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 269,36 \text{ ton} \quad (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 269,36 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 227,76 \text{ ton} \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 227,76 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a compostagem.

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 0 \quad (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de digestão anaeróbica não seria utilizada.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \quad (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$\text{INC} = 0 + 0 + 101,35 \text{ (15)}$$

$$\text{INC} = \mathbf{101,35 \text{ ton (15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 101,35 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 24 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização de custos aplicado para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR:

**Tabela 24** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Adrianópolis-PR

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	148,589
Aterro	269,36
Compostagem	227,76
Digestão Anaeróbica	0
Incineração	101,35

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 28 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \text{ (29)}$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 28:

$$212,28 + 227,76 + 254,14 = 212,28 + 0 + 0 + 0 + 227,76 + 0 + 0 + 152,79 + 101,35$$

$$694,18 = 694,18$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Adrianópolis-PR:

$$C\ 04 \geq 198,34\ (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 28:

$$\mathbf{212,28 \geq 198,34\ (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 93,71\ (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 28:

$$227,76 + 0 \geq 93,71\ (17)$$

$$\mathbf{227,76 \geq 93,71\ (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 101,35\ (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 28:

$$0 + 0 + 101,35 \geq 101,35\ (18)$$

$$\mathbf{101,35 \geq 101,35\ (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 03: Para o cenário de otimização de custos, o custo total do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o custo encontrado pela função objetivo de -R\$173.456,25 deve ser menor do que o valor considerando que as 694,18 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um custo de R\$66,39. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de R\$46.086,61, portanto, considera-se que a Hipótese 03 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 03 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização de custos para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR.

O cenário seguinte a ser validado, é o de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 26. Portanto, para o segundo cenário, de minimização de emissões, o modelo matemático para os dados do município de Adrianópolis-PR é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [-1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (26)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$212,28 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$227,76 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$254,14 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os

resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 29 e 30:

**Figura 29** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário minimização de emissões

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet: [Simulação.xlsx]Emissões Adrianópolis**  
**Report Created: 11/06/2024 12:23:35**  
**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,125 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 30** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário minimização de emissões

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	0	-378408,0869

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	212,28	Contín
\$C\$3	C05	0	0	Contín
\$D\$3	C06	0	0	Contín
\$E\$3	C07	0	0	Contín
\$F\$3	C08	0	0	Contín
\$G\$3	C09	0	227,76	Contín
\$H\$3	C10	0	0	Contín
\$I\$3	C11	0	0	Contín
\$J\$3	C12	0	254,14	Contín
\$K\$3	C13	0	84,912	Contín
\$L\$3	C14	0	1,77636E-15	Contín
\$M\$3	C15	0	50,828	Contín

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 29, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,125 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 30, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo

de -378.408,0869(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), o que representa um saldo negativo de emissões, pois observando a corrente C 04, referente à reciclagem, que possui um alto potencial de neutralizar e também compensar emissões, uma vez que uma série de recursos deixa de ser utilizada e fabricada quando materiais são reciclados, o que contribui para uma pegada de carbono positiva com a utilização desta técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7\ (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 212,28 * 0,7\ (11)$$

$$\mathbf{REC = 148,596\ ton\ (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 148,596 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C\ 05 + C\ 07 + C\ 11 + C\ 13 + C\ 14 + C\ 15\ (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 84,912 + 1,77636E-15 + 50,828\ (12)$$

$$\mathbf{AS = 135,74\ ton\ (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 135,74 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C\ 08\ (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0\ (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C\ 09\ (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 227,76\ ton\ (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 227,76 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$\text{INC} = \text{C } 06 + \text{C } 10 + \text{C } 12 \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$\text{INC} = 0 + 0 + 254,14 \text{ (15)}$$

$$\text{INC} = \mathbf{254,14 \text{ ton (15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 254,14 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 25 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa aplicado para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR:

**Tabela 25** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Adrianópolis-PR

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	148,596
Aterro	135,74
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	227,76
Incineração	254,14

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 30 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 30:

$$212,28 + 227,76 + 254,14 = 212,28 + 0 + 0 + 0 + 0 + 227,76 + 0 + 0 + 254,14$$

$$694,18 = 694,18$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Adrianópolis-PR:

$$C 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 30:

$$\mathbf{212,28 \geq 198,34 \quad (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 08 + C 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 30:

$$0 + 227,76 \geq 93,71 \quad (17)$$

$$\mathbf{227,76 \geq 93,71 \quad (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 30:

$$0 + 0 + 254,14 \geq 101,35 \quad (18)$$

$$\mathbf{254,14 \geq 101,35 \quad (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 04: Para o cenário de redução de emissões, o total de emissões do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de emissões encontrado pela função objetivo do modelo matemático de -378.408,0869(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano) deve ser menor do que o valor considerando que as 694,18 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 1,59(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano). Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 1.103,7462(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), portanto, considera-se que a Hipótese 04 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 04 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de minimização de emissões de gases do efeito estufa para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR.

O cenário seguinte a ser validado, é o de otimização do potencial de geração energética, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 28. Portanto, para o terceiro cenário, de otimização do potencial de geração energética, o modelo matemático para os dados do município de Adrianópolis-PR é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$212,28 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$227,76 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$254,14 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 198,34 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 93,71 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 101,35 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 31 e 32:

**Figura 31** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de potencial de geração energética

Microsoft Excel 16.0 Answer Report  
 Worksheet: [Simulação.xlsx]Potencial Energético Adrianópolis  
 Report Created: 11/06/2024 12:41:30  
 Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
 Solver Engine  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,109 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
 Solver Options  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 32** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Adrianópolis-PR, cenário otimização de potencial de geração energética

Objective Cell (Max)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	0	248903,456

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	198,34	Contín
\$C\$3	C05	0	0	Contín
\$D\$3	C06	0	13,94	Contín
\$E\$3	C07	0	0	Contín
\$F\$3	C08	0	0	Contín
\$G\$3	C09	0	93,71	Contín
\$H\$3	C10	0	134,05	Contín
\$I\$3	C11	0	0	Contín
\$J\$3	C12	0	254,14	Contín
\$K\$3	C13	0	79,336	Contín
\$L\$3	C14	0	1,77636E-15	Contín
\$M\$3	C15	0	80,426	Contín

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 31, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,109 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 32, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor de 248.903,456kWh como sendo o potencial de geração energética para o conjunto solução encontrado.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 198,34 * 0,7 \quad (11)$$

$$\mathbf{REC = 138,838 \text{ ton} \quad (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 138,838 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 79,336 + 1,77636E-15 + 80,426 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 159,762 \text{ ton} \quad (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 159,762 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0 \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 93,71 \text{ ton} \quad (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 93,71 toneladas de RSU teriam como técnica de

disposição final a digestão anaeróbica.

$$\text{INC} = \text{C } 06 + \text{C } 10 + \text{C } 12 \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$\text{INC} = 13,94 + 134,05 + 254,14 \text{ (15)}$$

$$\text{INC} = \mathbf{402,13 \text{ ton (15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 402,13 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 26 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização do potencial de geração energética aplicado para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR:

**Tabela 26** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Adrianópolis-PR

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	138,838
Aterro	159,762
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	93,71
Incineração	402,13

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 32 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$\text{C01} + \text{C02} + \text{C03} = \text{C04} + \text{C05} + \text{C06} + \text{C07} + \text{C08} + \text{C09} + \text{C10} + \text{C11} + \text{C12} \text{ (29)}$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 32:

$$212,28 + 227,76 + 254,14 = 198,34 + 0 + 13,94 + 0 + 0 + 93,71 + 134,05 + 0 + 254,14$$

$$694,18 = 694,18$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Adrianópolis-PR:

$$C\ 04 \geq 198,34 \text{ (16)}$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 32:

$$\mathbf{198,34 \geq 198,34 \text{ (16)}}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 93,71 \text{ (17)}$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 32:

$$0 + 93,71 \geq 93,71 \text{ (17)}$$

$$\mathbf{93,71 \geq 93,71 \text{ (17)}}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 101,35 \text{ (18)}$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 32:

$$13,94 + 134,05 + 254,14 \geq 101,35 \text{ (18)}$$

$$\mathbf{402,13 \geq 101,35 \text{ (18)}}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 05: Para o cenário otimização de recuperação energética, o total de geração de kWh do conjunto deve ser superior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de potencial de geração energética encontrado pela função objetivo do modelo matemático de 248.903,456kWh deve ser maior do que o valor considerando que as 694,18 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 71kWh/ton. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 49.286,78kWh, portanto, considera-se que a Hipótese 05 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 05 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização do potencial de geração energética para os dados obtidos do município de Adrianópolis-PR, e também se conclui que o modelo está validado para os três diferentes cenários que se propõe para este município.

## **6.5. VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA O MUNICÍPIO DE VALINHOS-SP**

Para o segundo município a ser utilizado para validação do modelo matemático, selecionou-se a cidade de Valinhos, do estado de São Paulo, com população estimada de 126.373 pessoas de acordo com IBGE(2024).

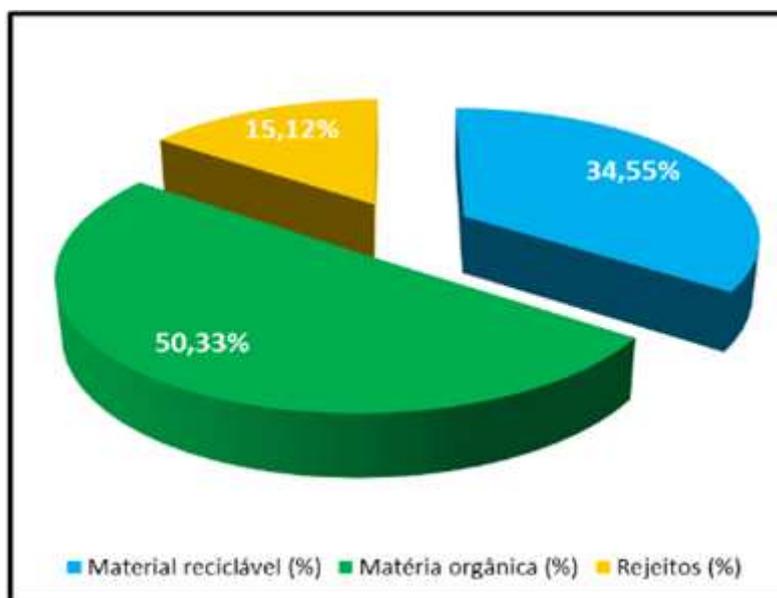
Para a obtenção dos dados necessários para adequação do modelo matemático, foi utilizado o relatório Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos realizado pela PREFEITURA MUNICIPAL DE VALINHOS (2022).

De acordo com este relatório, o município de Valinhos gera em torno de 44.510 toneladas de RSU anualmente. Este valor dividido pelo número de habitantes, resulta em cerca de 352,21 kg/hab.ano, valor próximo de média nacional de 381 kg/hab.ano, conforme

relatório da ABRELPE (2023).

O resultado da gravimetria realizada neste relatório é apresentado na Figura 33:

**Figura 33** – Composição Gravimétrica Simplificada do Município de Valinhos.



Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE VALINHOS (2022, p. 75)

Estes valores aproximam-se da média nacional que é de 33,6% para Recicláveis Secos, 45,3% para Material Orgânico e 19,7% para Rejeitos / Têxteis, Couros e Borrachas, segundo ABRELPE (2023).

Trazendo os valores da Figura 33 para o modelo matemático definido, obtém-se as equações 2, 3 e 4 para este cenário de validação:

$$C\ 01 = 0,3455 * RSU\ (2)$$

$$C\ 02 = 0,5033 * RSU\ (3)$$

$$C\ 03 = 0,1512 * RSU\ (4)$$

Considerando o valor total de RSU gerados anualmente como sendo 44.510 toneladas, os valores para as correntes C 01, C 02 e C 03 são calculados a seguir:

$$C\ 01 = 15.378,21\ ton\ (2)$$

$$C\ 02 = 22.401,883\ ton\ (3)$$

$$C\ 03 = 6.729,91\ ton\ (4)$$

Substituindo-se estes valores nas equações 5, 6 e 7, obtém-se:

$$15.378,205 = C_{04} + C_{05} + C_{06} \quad (5)$$

$$22.401,883 = C_{07} + C_{08} + C_{09} + C_{10} \quad (6)$$

$$6.729,912 = C_{11} + C_{12} \quad (7)$$

O próximo passo é ajustar as equações do modelo referentes a restrições relacionadas às metas de 2040 do PLANARES. A primeira é a Meta 6, que tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração seca dos resíduos sólidos para pelo menos 20% do total de RSU gerados.

Para um valor total de RSU de 44.510 toneladas, 20% desta quantia representa 8902 toneladas, valor que é substituído na Equação 16 do modelo:

$$REC \geq 8.902 \quad (16)$$

Substituindo pela corrente, conforme Equação 11:

$$C_{04} * 0,7 \geq 8.902 \quad (16)$$

Isolando o termo C 04:

$$C_{04} \geq 12.717,14 \quad (16)$$

A próxima equação é referente a Meta 7 do PLANARES, que tem como objetivo aumentar a reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos para pelo menos 13,5% do total de RSU gerados através da utilização das técnicas de compostagem e digestão anaeróbica.

Para um valor total de RSU de 44.510 toneladas, 13,5% desta quantia representa 6.008,85 toneladas, valor que é substituído na Equação 17 do modelo:

$$CO + DA \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equações 13 e 14:

$$C_{08} + C_{09} \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Por último, a Meta 9 do PLANARES tem como objetivo aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU para pelo menos 14,6% do total gerado através da utilização da técnica de incineração.

Para um valor total de RSU de 44.510 toneladas, 14,6% desta quantia representa 6.498,46 toneladas, valor que é substituído na Equação 18 do modelo:

$$INC \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Substituindo pelas correntes, conforme Equação 15:

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

A seguir são listadas as equações ajustadas para o município de Adrianópolis-PR que serão utilizadas como restrições do modelo matemático que têm como base as metas definidas pelo PLANARES:

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

As demais equações permanecem inalteradas em relação ao modelo original, portanto, para o primeiro cenário, de otimização de custos, o modelo matemático para os dados do município de Valinhos-SP é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C 04 * 0,7) * [- 577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [- 487,40]) + (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \quad (23)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$15.378,205 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$22.401,883 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$6.729,912 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

$$C\ 08 + C\ 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$C\ 06 + C\ 10 + C\ 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 34 e 35:

**Figura 34** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de custos

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet:** [Simulação.xlsx]Custos Valinhos  
**Report Created:** 11/06/2024 13:52:13  
**Result:** Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,093 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 35** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de custos

Objective Cell (Min)					
Cell	Name	Original Value	Final Value		
\$P\$5	FO	R\$ 0,00	-R\$ 16.199.672,64		

Variable Cells					
Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer	
\$B\$3	C04	0	15378,205	Contín	
\$C\$3	C05	0	0	Contín	
\$D\$3	C06	0	0	Contín	
\$E\$3	C07	0	0	Contín	
\$F\$3	C08	0	22401,883	Contín	
\$G\$3	C09	0	0	Contín	
\$H\$3	C10	0	0	Contín	
\$I\$3	C11	0	231,452	Contín	
\$J\$3	C12	0	6498,46	Contín	
\$K\$3	C13	0	6151,282	Contín	
\$L\$3	C14	0	1120,09415	Contín	
\$M\$3	C15	0	1299,692	Contín	

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 34, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,093 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 35, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -R\$16.199.672,64 , o que se tratando de um custo, representa na verdade um potencial de faturamento, uma vez que as técnicas de reciclagem e compostagem tem saldo positivo financeiro dos produtos gerados em relação ao custo do processamento da técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 15.378,205 * 0,7 \quad (11)$$

$$\mathbf{REC = 10.764,7435 \text{ ton} \quad (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 10.764,7435 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 231,452 + 6.151,282 + 1.120,09415 + 1.299,692 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 8.802,52015 \text{ ton} \quad (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 8.802,52015 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 22.401,883 \text{ ton} \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 22.401,883 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a compostagem.

$$DA = C 09 (14)$$

Substituindo C 09:

$$DA = 0 (14)$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de digestão anaeróbica não seria utilizada.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 0 + 0 + 6.498,46 (15)$$

$$INC = 6.498,46 \text{ ton (15)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.498,46 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 27 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização de custos aplicado para os dados obtidos do município de Valinhos-SP:

**Tabela 27** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados do Município de Valinhos-SP

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	10.764,7435
Aterro	8.802,52015
Compostagem	22.401,883
Digestão Anaeróbica	0
Incineração	6.498,46

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 35 que todas correntes

convergir para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 35:

$$15.378,205 + 22.401,883 + 6.729,912 = 15.378,205 + 0 + 0 + 0 + 22.401,883 + 0 + 0 + 231,452 + 6.498,46$$

$$44.510 = 44.510$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Valinhos-SP:

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 35:

$$15.378,205 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 08 + C 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 35:

$$22.401,883 + 0 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$22.401,883 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 35:

$$0 + 0 + 6.498,46 \geq 6.498,46 \text{ (18)}$$

$$\mathbf{6.498,46 \geq 6.498,46 \text{ (18)}}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 03: Para o cenário de otimização de custos, o custo total do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o custo encontrado pela função objetivo de -R\$16.199.672,64 deve ser menor do que o valor considerando que as 44.510 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um custo de R\$66,39. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de R\$2.955.018,90, portanto, considera-se que a Hipótese 03 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 03 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização de custos para os dados obtidos do município de Valinhos-SP.

O cenário seguinte a ser validado, é o de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 26. Portanto, para o segundo cenário, de minimização de emissões, o modelo matemático para os dados do município de Valinhos-SP é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [-1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \text{ (26)}$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \text{ (1)}$$

$$15.378,205 = C 04 + C 05 + C 06 \text{ (5)}$$

$$22.401,883 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \text{ (6)}$$

$$6.729,912 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 36 e 37:

**Figura 36** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário minimização de emissões

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet:** [Simulação.xlsx]Emissões Valinhos  
**Report Created:** 11/06/2024 14:33:43  
**Result:** Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,156 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 37** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário minimização de emissões

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	0	-27420942,96

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	15378,205	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	0	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	22401,883	Contin
\$H\$3	C10	0	0	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	6729,912	Contin
\$K\$3	C13	0	6151,282	Contin
\$L\$3	C14	0	2,27374E-13	Contin
\$M\$3	C15	0	1345,9824	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 36, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,156 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 37, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -27.420.942,96(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), o que representa um saldo negativo de emissões, pois observando a corrente C 04, referente à reciclagem, que possui um alto potencial de neutralizar e também compensar emissões, uma vez que uma série de recursos deixa de ser utilizada e fabricada quando materiais são reciclados, o que contribui para uma pegada de carbono positiva com a utilização desta técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7\ (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 15.378,205 * 0,7\ (11)$$

$$\mathbf{REC = 10.764,7435\ ton\ (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 10.764,7435 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C\ 05 + C\ 07 + C\ 11 + C\ 13 + C\ 14 + C\ 15\ (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 6.151,282 + 2,27374E-13 + 1345,9824\ (12)$$

$$\mathbf{AS = 7.497,2644\ ton\ (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 7.497,2644 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C\ 08\ (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0\ ton\ (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 (14)$$

Substituindo C 09:

$$DA = 22.401,883 (14)$$

Portanto, para este conjunto solução, 22.401,883 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 0 + 0 + 6.729,912 (15)$$

$$INC = 6.729,912 \text{ ton (15)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.729,912 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 28 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa aplicado para os dados obtidos do município de Valinhos-SP:

**Tabela 28** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados do Município de Valinhos-SP

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	10.764,7435
Aterro	7.497,2644
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	22.401,883
Incineração	6.729,912

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes

(C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 37 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 28:

$$15.378,205 + 22.401,883 + 6.729,912 = 15.378,205 + 0 + 0 + 0 + 0 + 22.401,883 + 0 + 0 + 6.729,912$$

$$44.510 = 44.510$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Valinhos-SP:

$$C04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 37:

$$15.378,205 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C08 + C09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 37:

$$0 + 22.401,883 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$22.401,883 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C06 + C10 + C12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 37:

$$0 + 0 + 6.729,912 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

$$\mathbf{6.729,912 \geq 6.498,46 \quad (18)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 04: Para o cenário de redução de emissões, o total de emissões do conjunto solução deve ser inferior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de emissões encontrado pela função objetivo do modelo matemático de -27.420.942,96(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano) deve ser menor do que o valor considerando que as 44.510 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 1,59(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano). Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 70.770,90(tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), portanto, considera-se que a Hipótese 04 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 04 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de minimização de emissões de gases do efeito estufa para os dados obtidos do município de Valinhos-SP.

O cenário seguinte a ser validado, é o de otimização do potencial de geração energética, e este modelo possui as mesmas restrições do cenário anterior, mas sua função objetivo é definida pela Equação 28. Portanto, para o terceiro cenário, de otimização do potencial de geração energética, o modelo matemático para os dados do município de Valinhos-SP é descrito abaixo:

Função Objetivo:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$15.378,205 = C 04 + C 05 + C 06 \quad (5)$$

$$22.401,883 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$6.729,912 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 38 e 39:

**Figura 38** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de potencial de geração energética

Microsoft Excel 16.0 Answer Report  
 Worksheet: [Simulação.xlsx]Potencial Energético Valinhos  
 Report Created: 11/06/2024 14:59:11  
 Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
 Solver Engine  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,094 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
 Solver Options  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 39** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado ao Município de Valinhos-SP, cenário otimização de potencial de geração energética

Objective Cell (Max)				
Cell	Name	Original Value	Final Value	
\$P\$5	FO	0	15959379,98	

Variable Cells				
Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	12717,14	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	2661,065	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	6008,85	Contin
\$H\$3	C10	0	16393,033	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	6729,912	Contin
\$K\$3	C13	0	5086,856	Contin
\$L\$3	C14	0	1,7053E-13	Contin
\$M\$3	C15	0	5156,802	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 38, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,094 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 39, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor de 15.959.379,98kWh como sendo o potencial de geração energética para o conjunto solução encontrado.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 12.717,14 * 0,7 \quad (11)$$

$$\mathbf{REC = 8.901,998 \text{ ton} \quad (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 8.901,998 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 5.086,856 + 1,7053E-13 + 5.156,802 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 10.243,658 \text{ ton} \quad (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 10.243,658 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0 \text{ ton} \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Substituindo C 09:

$$DA = 6.008,85 \text{ (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 6.008,85 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 2.661,065 + 16.393,033 + 6.729,912 \text{ (15)}$$

$$INC = 25.784,01 \text{ ton (15)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 25.784,01 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 29 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização do potencial de geração energética aplicado para os dados obtidos do município de Valinhos-SP:

**Tabela 29** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados do Município de Valinhos-SP

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	8.901,998
Aterro	10.243,658
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	6.008,85
Incineração	25.784,01

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, com os resultados obtidos, realiza-se os teste de hipótese mencionados para confirmação da validação do modelo:

- Hipótese 01: Modelo deve convergir para uma solução com todas as correntes do modelo convergindo para resultados maiores ou iguais a zero e a soma das correntes (C04;C05;C06;C07;C08;C09;C10;C11;C12) deve ser igual à soma das correntes (C01;C02;C03) ;

Para validação desta hipótese, verifica-se na Figura 39 que todas correntes convergiram para valores maiores ou iguais a zero, enquanto a verificação da somatória é realizada na Equação 29 a seguir:

$$C01 + C02 + C03 = C04 + C05 + C06 + C07 + C08 + C09 + C10 + C11 + C12 \quad (29)$$

Substituindo pelos valores encontrados pelas equações 02, 03, 04 e pela Figura 39:

$$15.378,205 + 22.401,883 + 6.729,912 = 12.717,14 + 0 + 2.661,065 + 0 + 0 + 6.008,85 + 16.393,033 + 0 + 6.729,912$$

$$44.510 = 44.510$$

Portanto, considera-se que a Hipótese 01 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 02: Em todos os cenários simulados, o conjunto solução deve satisfazer as metas do PLANARES selecionadas para servirem de base para a construção de restrições do modelo, para as metas que possuem valores numéricos absolutos, uma proporção com base no número de habitantes será realizada para a validação;

As metas do PLANARES, convertidas em restrições para o modelo matemático, são expressadas pelas Equações 16, 17 e 18 adaptadas para os dados do município de Valinhos-SP:

$$C 04 \geq 12.717,14 \quad (16)$$

Substituindo C04 pelo valor encontrado na solução da Figura 39:

$$\mathbf{12.717,14 \geq 12.717,14 \quad (16)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 08 + C 09 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

Substituindo C08 e C09 pelos valores encontrados na solução da Figura 39:

$$0 + 6.008,85 \geq 6.008,85 \quad (17)$$

$$\mathbf{6.008,85 \geq 6.008,85 \quad (17)}$$

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

Substituindo C06, C10 e C12 pelos valores encontrados na solução da Figura 39:

$$2.661,065 + 16.393,033 + 6.729,912 \geq 6.498,46 \quad (18)$$

**25.784,01  $\geq$  6.498,46 (18)**

Portanto, a condição desta restrição foi satisfeita.

Desta forma, considera-se que a Hipótese 02 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

- Hipótese 05: Para o cenário otimização de recuperação energética, o total de geração de kWh do conjunto deve ser superior à solução de disposição final de 100% dos RSU em aterros sanitários;

Neste caso, o valor de potencial de geração energética encontrado pela função objetivo do modelo matemático de 15.959.379,98kWh deve ser maior do que o valor considerando que as 44.510 toneladas geradas pelo município tivessem como destinação final a técnica de aterro sanitário, que possui um valor atrelado de emissões de 71kWh/ton. Fazendo a multiplicação para o cenário de 100% dos RSU destinados a aterros sanitários, obtém-se o valor de 3.160.210kWh, portanto, considera-se que a Hipótese 05 está satisfeita pelo conjunto solução encontrado nesta simulação do modelo.

Desta forma, com as Hipóteses 01, 02 e 05 satisfeitas, considera-se que o modelo matemático está validado para o cenário de otimização do potencial de geração energética para os dados obtidos do município de Valinhos-SP, e também se conclui que o modelo está validado para os três diferentes cenários que se propõe para este município.

Portanto, este capítulo é concluído com a elaboração do modelo matemático para os três cenários que se deseja investigar, com todas as funções objetivos e restrições definidas e apresentadas, assim como a validação deste modelo através do método de teste de hipóteses para os três municípios selecionados de acordo com os critérios apresentados.

No próximo capítulo, com o modelo matemático definido e validado, serão apresentados resultados levando em conta dados nacionais e também será realizada discussão de resultados comparando os diferentes cenários e analisando os dados de saída das simulações do modelo.

## 7. SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS

Nesta seção do trabalho, o modelo matemático validado será submetido a simulações dos cenários, utilizando os dados nacionais de geração de RSU com o objetivo de definir conjuntos de técnicas capazes de cumprir com as metas do PLANARES e verificar os dados de saída do modelo para os três cenários diferentes. Os resultados serão analisados e comparados entre si e também com um cenário onde hipoteticamente 100% dos RSU são destinados a aterros sanitários. Serão analisados o custo global, emissões de gases causadores de efeito estufa e potencial de geração energética do conjunto solução encontrado para cada cenário.

### 7.1. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS

Para a simulação do cenário de otimização dos custos operacionais considerando os dados nacionais, será utilizado o modelo definido na seção 5.4 deste trabalho, apresentado a seguir:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15) = ((C04 * 0,7) * [-577,78]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14 + C15] * 66,39) + (C08 * [-487,40]) + (C09 * 44,13) + ([C06 + C10 + C12] * 54,68) \quad (23)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C01 + C02 + C03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C04 + C05 + C06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C07 + C08 + C09 + C10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C11 + C12 \quad (7)$$

$$C13 = C04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C14 = C08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 40 e 41:

**Figura 40** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet:** [Simulação.xlsx]Custos Nacionais  
**Report Created:** 16/07/2024 11:41:57  
**Result:** Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,078 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 41** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	R\$ 0,00	-R\$ 32.815.028.562,64

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	33112800	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	0	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	44643150	Contin
\$G\$3	C09	0	0	Contin
\$H\$3	C10	0	0	Contin
\$I\$3	C11	0	5227486,2	Contin
\$J\$3	C12	0	14186863,8	Contin
\$K\$3	C13	0	13245120	Contin
\$L\$3	C14	0	2232157,5	Contin
\$M\$3	C15	0	2837372,76	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 40, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,078 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 41, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -R\$32.815.028.562,64, o que se tratando de um custo, representa na verdade um potencial de faturamento, uma vez que as técnicas de reciclagem e compostagem tem saldo positivo

financeiro dos produtos gerados em relação ao custo do processamento da técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 33112800 * 0,7 \quad (11)$$

$$\mathbf{REC = 23.178.960 \text{ ton} \quad (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 23.178.960 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C 05 + C 07 + C 11 + C 13 + C 14 + C 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 5.227.486,2 + 13.245.120 + 2.232.157,5 + 2.837.372,76 \quad (12)$$

$$\mathbf{AS = 23.542.136,46 \quad (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 23.542.136,46 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \quad (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 44.643.150 \quad (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 44.643.150 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a compostagem.

$$DA = C 09 \quad (14)$$

Substituindo C 09:

$$\mathbf{DA = 0 \quad (14)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de digestão anaeróbica não seria utilizada.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \quad (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 0 + 0 + 14.186.863,8 \quad (15)$$

$$INC = 14.186.863,8 \quad (15)$$

Portanto, para este conjunto solução, 14.186.863,8 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 30 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização de custos aplicado para os dados nacionais de geração de RSU:

**Tabela 30** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Custos para os Dados Nacionais

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	23.178.960
Aterro	23.542.136,46
Compostagem	44.643.150
Digestão Anaeróbica	0
Incineração	14.186.863,80

Fonte: Do Autor (2024).

## 7.2. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE MINIMIZAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES CAUSADORES DO EFEITO ESTUFA

Para a simulação do segundo cenário, referente a minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa considerando os dados nacionais, será utilizado o modelo definido na seção 5.6 deste trabalho, apresentado a seguir:

Função Objetivo:

$$\min f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * [- 1784,104]) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 1,59) + (C08 * 0,04) + (C09 * 0,04) + ([C06 + C10 + C12] * 0,38) \quad (26)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C 04 + C 05 + C06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C_{11} + C_{12} \quad (7)$$

$$C_{13} = C_{04} * 0,3 \quad (8)$$

$$C_{14} = C_{08} * 0,05 \quad (9)$$

$$C_{15} = (C_{06} + C_{10} + C_{12}) * 0,2 \quad (10)$$

$$C_{04} \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C_{08} + C_{09} \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C_{06} + C_{10} + C_{12} \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 42 e 43:

**Figura 42** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, Cenário Minimização de Emissões de Gases Causadores do Efeito Estufa

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet: [Simulação.xlsx]Emissões Nacionais**  
**Report Created: 16/07/2024 12:21:50**  
**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,078 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 43** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos dados nacionais, cenário otimização de custos

Objective Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
\$P\$5	FO	0	-59040282248,10

Variable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	33112800	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	0	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	44643150	Contin
\$H\$3	C10	0	0	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	19414350	Contin
\$K\$3	C13	0	13245120	Contin
\$L\$3	C14	0	0	Contin
\$M\$3	C15	0	3882870	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 42, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,078 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 43, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor negativo de -59.040.282.248,1 (tonCO<sub>2</sub>-eq/ano), o que representa um saldo negativo de emissões, pois observando a corrente C 04, referente à reciclagem, que possui um alto potencial de neutralizar e também compensar emissões, uma vez que uma série de recursos deixa de ser utilizada e fabricada quando materiais são reciclados, o que contribui para uma pegada de carbono positiva com a utilização desta técnica.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7\ (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 33.112.800 * 0,7\ (11)$$

$$\mathbf{REC = 23.178.960\ ton\ (11)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 23.178.960 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C\ 05 + C\ 07 + C\ 11 + C\ 13 + C\ 14 + C\ 15\ (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 13.245.120 + 0 + 3.882.870\ (12)$$

$$\mathbf{AS = 17.127.990\ (12)}$$

Portanto, para este conjunto solução, 17.127.990 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C\ 08\ (13)$$

Substituindo C 08:

$$\mathbf{CO = 0\ (13)}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 (14)$$

Substituindo C 09:

$$DA = 44.643.150 (14)$$

Portanto, para este conjunto solução, 44.643.150 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 (15)$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 0 + 0 + 19.414.350 (15)$$

$$INC = 19.414.350 (15)$$

Portanto, para este conjunto solução, 19.414.350 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 31 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de minimização de emissões de gases causadores do efeito estufa aplicado para os dados nacionais:

**Tabela 31** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Minimização de Emissões para os Dados Nacionais

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	23.178.960
Aterro	17.127.990
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	44.643.150
Incineração	19.414.350

Fonte: Do Autor (2024).

### **7.3. SIMULAÇÃO DO CENÁRIO DE OTIMIZAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO ENERGÉTICA**

Para a simulação do terceiro cenário, referente a otimização do potencial de geração energética considerando os dados nacionais, será utilizado o modelo definido na seção 5.8 deste trabalho, apresentado a seguir:

Função Objetivo:

$$\max f(C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14) = (C04 * 0) + ([C05 + C07 + C11 + C13 + C14] * 71) + (C08 * 0) + (C09 * 150) + ([C06 + C10 + C12] * 570) \quad (28)$$

Sujeito às restrições:

$$RSU = C 01 + C 02 + C 03 + OUT \quad (1)$$

$$33.112.800 = C 04 + C 05 + C06 \quad (5)$$

$$44.643.150 = C 07 + C 08 + C 09 + C 10 \quad (6)$$

$$19.414.350 = C 11 + C 12 \quad (7)$$

$$C 13 = C 04 * 0,3 \quad (8)$$

$$C 14 = C 08 * 0,05 \quad (9)$$

$$C 15 = (C 06 + C 10 + C 12) * 0,2 \quad (10)$$

$$C04 \geq 27.762.942,86 \quad (16)$$

$$C 08 + C 09 \geq 13.117.990,50 \quad (17)$$

$$C 06 + C 10 + C 12 \geq 14.186.863,80 \quad (18)$$

Simulando o modelo neste cenário com o módulo *Solver* do *Microsoft Excel*, os resultados e informações obtidos são observados nas Figuras 44 e 45:

**Figura 44** – Informações referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, cenário otimização de potencial de geração energética

**Microsoft Excel 16.0 Answer Report**  
**Worksheet: [Simulação.xlsx]Potencial Energético Nacional**  
**Report Created: 16/07/2024 13:05:35**  
**Result: Solver found a solution. All Constraints and optimality conditions are satisfied.**  
**Solver Engine**  
 Engine: Simplex LP  
 Solution Time: 0,063 Seconds.  
 Iterations: 11 Subproblems: 0  
**Solver Options**  
 Max Time Unlimited, Iterations Unlimited, Precision 0,000001, Use Automatic Scaling  
 Max Subproblems Unlimited, Max Integer Sols Unlimited, Integer Tolerance 1%, Assume NonNegative

Fonte: Do Autor (2024).

**Figura 45** – Resultados referentes à Solução do Modelo Aplicado aos Dados Nacionais, cenário otimização de potencial de geração energética

Objective Cell (Max)				
Cell	Name	Original Value	Final Value	
\$P\$5	FO	0	34841105137,024	

Variable Cells				
Cell	Name	Original Value	Final Value	Integer
\$B\$3	C04	0	27762942,86	Contin
\$C\$3	C05	0	0	Contin
\$D\$3	C06	0	5349857,14	Contin
\$E\$3	C07	0	0	Contin
\$F\$3	C08	0	0	Contin
\$G\$3	C09	0	13117990,5	Contin
\$H\$3	C10	0	31525159,5	Contin
\$I\$3	C11	0	0	Contin
\$J\$3	C12	0	19414350	Contin
\$K\$3	C13	0	11105177,14	Contin
\$L\$3	C14	0	0	Contin
\$M\$3	C15	0	11257873,33	Contin

Fonte: Do Autor (2024).

Portanto, observa-se na Figura 44, que para a solução deste modelo e cenário, o *software* realizou 11 iterações no método programação linear *Simplex* em 0,063 segundos, encontrando uma solução que satisfaz todas restrições e condição especificadas do modelo.

Na Figura 45, observa-se que a função objetivo da solução resultou no valor de 34.841.105.137,024 kWh como sendo o potencial de geração energética para o conjunto solução encontrado.

Na mesma figura, observa-se também o valor de toneladas de cada corrente do modelo matemático, o que substituindo nas equações 11, 12, 13, 14 e 15 do modelo, obtém-se o total de utilização de cada técnica de disposição final de RSU:

$$REC = C\ 04 * 0,7 \quad (11)$$

Substituindo C 04:

$$REC = 27.762.942,86 * 0,7 \quad (11)$$

$$REC = 19.434.060 \text{ ton} \quad (11)$$

Portanto, para este conjunto solução, 19.434.060 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a reciclagem.

$$AS = C\ 05 + C\ 07 + C\ 11 + C\ 13 + C\ 14 + C\ 15 \quad (12)$$

Substituindo C 05; C 07 ; C 11 ; C 13 ; C 14 e C15:

$$AS = 0 + 0 + 0 + 11.105.177,14 + 0 + 11.257.873,33 \text{ (12)}$$

$$AS = \mathbf{22.363.050,47 \text{ ton (12)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 22.363.050,47 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final o aterro sanitário.

$$CO = C 08 \text{ (13)}$$

Substituindo C 08:

$$CO = \mathbf{0 \text{ (13)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, a técnica de compostagem não seria utilizada.

$$DA = C 09 \text{ (14)}$$

Substituindo C 09:

$$DA = \mathbf{13.117.990,5 \text{ ton(14)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 13.117.990,5 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a digestão anaeróbica.

$$INC = C 06 + C 10 + C 12 \text{ (15)}$$

Substituindo C 06 ; C 10 e C 12:

$$INC = 5.349.857,14 + 31.525.159,5 + 19.414.350 \text{ (15)}$$

$$INC = \mathbf{56.289.366,64 \text{ ton(15)}}$$

Portanto, para este conjunto solução, 56.289.366,64 toneladas de RSU teriam como técnica de disposição final a incineração.

A Tabela 32 resume a utilização de técnicas de disposição final para o cenário de otimização de potencial de geração energética aplicado para os dados nacionais:

**Tabela 32** - Resumo da Utilização de Técnicas para Modelo Aplicado ao Cenário de Cenário de Otimização de Potencial de Geração Energética para os Dados Nacionais

<b>Técnica</b>	<b>Toneladas</b>
Reciclagem	19.434.060
Aterro	22.363.050,47
Compostagem	0
Digestão Anaeróbica	13.117.990,50
Incineração	56.289.366,64

Fonte: Do Autor (2024).

## 7.4. RESULTADOS DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Nesta seção são comparados os dados de saída dos cenários obtidos das simulações dos modelos matemáticos para os cenários propostos e adicionalmente, serão considerados os dados obtidos de um cenário considerando que os RSU seriam destinados na sua totalidade a aterros sanitários, com intuito de ter uma base de comparação com a situação atual do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil.

Apesar de atualmente ainda grande parcela dos RSU terem como destino lixões e aterros controlados, que possuem dados de saída piores do que os aterros sanitários, para esta comparação foi tomado como base os dados de aterros sanitários uma vez que se espera que até 2040 estas técnicas de disposição final inadequada não sejam mais utilizadas.

A Tabela 33 traz o resumo dos dados de saída para os três cenários considerados (minimização de custos, minimização de emissões e maximização do potencial energético):

**Tabela 33** - Resumo dos Dados de Saída de Custos, Emissões e Potencial Energético para os Cenários Propostos

	<b>Saldo de Custos (R\$)</b>	<b>Emissões (tonCO2-eq/ano)</b>	<b>Potencial Energético (kWh)</b>
<b>Cenário 1</b>	-32.821.892.099	-59.036.581.623	9.556.550.589
<b>Cenário 2</b>	-9.230.213.301	-59.046.456.011	18.703.055.520
<b>Cenário 3</b>	-6.095.850.368	-49.492.405.498	34.841.105.137
<b>100% Aterro</b>	6.413.239.800	154.500.777	6.899.091.300

Fonte: Do Autor (2024).

A primeira análise que fica evidente com os dados da Tabela 33, é a de que o cenário que considera a diretriz atual, com os RSU sendo destinados na totalidade para aterros é o único cenário que possui um custo global positivo, ou seja, os custos operacionais superam as receitas provenientes das técnicas utilizadas.

O mesmo ocorre na análise das emissões, uma vez que os outros três cenários possuem um saldo global negativo de emissões, por conta da utilização da técnica de reciclagem que possui o potencial de neutralizar as emissões do sistema de gerenciamento de RSU, bem como de gerar um saldo negativo de emissões, uma vez que a utilização de materiais reciclados dispensa o uso de vários recursos quando comparada com a produção dos mesmos materiais equivalentes virgens.

Analisa-se também que o cenário com os RSU destinados na totalidade a aterros é o cenário com menor potencial energético. Desta forma, evidencia-se a urgência na adoção de novas técnicas de tratamento e disposição final de RSU, uma vez que a utilização de aterros se mostra não ser uma técnica eficiente em termos monetários, ambientais e energéticos.

Na comparação entre os cenários 1 e 2, de otimização de custos e minimização de emissões respectivamente, observa-se que a diferença de emissões entre os dois cenários é relativamente pequena, porém, o potencial de geração de renda do Cenário 1 é mais que três vezes maior do que o do Cenário 2, uma indicação de que de forma geral, o cenário 1 é provavelmente mais interessante do que o Cenário 2.

Porém, o Cenário 2 possui um potencial energético cerca de duas vezes maior do que o Cenário 1, o que levaria a uma análise mais aprofundada para os gestores públicos, sobre qual caminho poderia ser mais interessante: o de reduzir os custos ao máximo possível e ao mesmo tempo garantir que esta solução estaria muito próxima também do objetivo de minimizar as emissões de gases causadores de efeito estufa, ou reduzir ao máximo as emissões e simultaneamente gerar um potencial energético mais significativo.

O custo negativo expresso nos cenários 1, 2 e 3, representam o potencial de geração de renda através do processamento dos RSU pelas técnicas selecionadas. Este potencial de geração de renda representa a possibilidade de financiar investimentos necessários para a viabilização da implementação das técnicas, como por exemplo: equipamentos e estruturas necessárias, coletas seletivas adicionais, triagens adicionais, contratações de mão-de-obra, entre outros.

O Cenário 3, focado na otimização do potencial de geração energética, traz uma geração de renda e de emissões relativamente pior do que os cenários 1 e 2, em contrapartida, apresenta um potencial de geração energética próximo de 35.000GWh por ano. Segundo dados da EPE(2024) no Anuário Estatístico de Energia Elétrica, o Brasil consumiu um total de 531.872GWh em 2023 e 509.441 em 2022, portanto, o potencial energético apresentado pelo Cenário 3 seria suficiente para cobrir o aumento de consumo de 2023 em comparação com 2022 e também significaria uma parcela de cerca de 6,5% do total da energia elétrica consumida no Brasil.

## 7.5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS CONJUNTOS DE TÉCNICAS SELECIONADAS PARA CADA CENÁRIO

Nesta etapa é discutida a participação de cada técnica nos cenários apresentados, relacionando também os efeitos potenciais de cada técnica nos dados de saída apresentados na seção anterior. A Tabela 34 traz o resumo da participação de cada técnica em cada cenário.

**Tabela 34** - Resumo da Participação em Toneladas de cada Técnica nos Cenários Propostos

<b>Técnica</b>	<b>Cenário 1 (ton)</b>	<b>Cenário 2 (ton)</b>	<b>Cenário 3 (ton)</b>
Reciclagem	23.178.960	23.178.960	19.434.060
Aterro	23.542.136,46	17.127.990	22.363.050,47
Compostagem	44.643.150	0	0
Digestão Anaeróbica	0	44.643.150	13.117.990,50
Incineração	14.186.863,80	19.414.350	56.289.366,64

Fonte: Do Autor (2024).

Observa-se na Tabela 34 a participação semelhante da técnica de reciclagem nos cenários 1 e 2, o que evidencia a grande importância desta técnica tanto no potencial de geração de renda proveniente de RSU, quanto na redução de emissões de gases causadores de efeito estufa. No Cenário 3, a utilização da reciclagem foi baseada nas restrições do modelo matemático, provenientes das metas do PLANARES e não da maximização da função objetivo do modelo em si.

Da utilização dos aterros sanitários, observam-se valores relativamente próximos nos três cenários, o que evidencia que esta técnica ainda será relevante para o sistema de gerenciamento de RSU, especialmente pela relação que ela tem com as outras técnicas (por exemplo, cinzas provenientes da incineração têm como destino os aterros). Porém, é também evidente que esta é uma técnica que terá participação cada vez menor mediante o avanço de outras técnicas mais sustentáveis. Para efeito de comparação, segundo dados da ABRELPE(2023), em 2022 mais de 46 milhões de toneladas de RSU tiveram como destinação final aterros sanitários no Brasil, o que representa quase o dobro do total de RSU com esta destinação final no Cenário 1, que é o que apresenta o maior valor para aterros sanitários.

A compostagem e a digestão anaeróbica são duas técnicas que estão diretamente relacionadas à disposição final de material orgânico e, portanto, são técnicas concorrentes para esses materiais. Observa-se que no Cenário 1 o modelo direcionou este tipo de resíduo para a técnica de compostagem, que apresenta um potencial econômico maior que a digestão anaeróbica. No Cenário 2, apesar das duas técnicas apresentarem o mesmo nível de emissões por tonelada processada, houve um direcionamento para a digestão anaeróbica por conta do potencial energético desta técnica, enquanto no Cenário 3, também houve o direcionamento para digestão anaeróbica por conta do potencial energético, porém, o valor encontrado deve-se às restrições do modelo matemático provenientes das metas do PLANARES.

Sobre esta concorrência entre estas duas técnicas, a preferência por uma ou por outra é uma discussão que gestores de órgãos públicos devem levar em conta fatores sócioeconômicos da região em análise. Focando no potencial de renda gerada, a compostagem se apresenta como uma técnica mais interessante, especialmente em regiões com foco na agricultura, uma vez que o composto gerado tem seu valor agregado para esta finalidade.

A digestão anaeróbica se apresenta como uma alternativa mais interessante focando simultaneamente na redução de emissões de gases causadores do efeito estufa aliada com a geração de potencial energético. Regiões com dificuldade na geração e distribuição de energia elétrica, ou alto consumo devido grande população, podem ter adicional interesse no tratamento da parcela de material orgânico de RSU através da digestão anaeróbica.

A incineração se mostra como uma técnica de alto custo e por isso, no Cenário 1 a utilização desta técnica baseou-se nas restrições do modelo matemático provenientes das

metas do PLANARES. No Cenário 2, observa-se um aumento da utilização da técnica em relação ao Cenário 1, aliado a uma diminuição da utilização dos aterros sanitários, o que se explica com o fato de que a incineração tem um nível de emissões relativamente inferior aos aterros sanitários (cerca de 75% menor).

É no Cenário 3 onde destaca-se a participação da técnica de incineração em sistemas de gerenciamento de RSU, pois trata-se da técnica com o maior potencial de geração energética e observa-se que neste cenário mais da metade do total de RSU tiveram como destinação a incineração. A opção de gestores públicos em direção a um sistema com grande participação da técnica de incineração, como o observado no Cenário 3, deve estar fortemente ligada a uma previsão de expansão no consumo energético nacional, onde a energia proveniente da incineração possa ter uma participação importante no cumprimento desta demanda crescente de energia, pois trata-se de uma técnica com alto custo operacional e também não é a mais eficiente em termos de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa.

Analisando a diminuição da utilização dos aterros sanitários, em função do aumento da utilização de outras técnicas nos resultados encontrados, é possível concluir que os conjuntos de soluções encontrados estão alinhados com a migração de técnicas observadas ao longo dos anos nos países da comunidade europeia, ilustrada na Figura 4.

## **7.6. COMPARATIVO DAS CORRENTES DO MODELO SELECIONADAS PARA CADA CENÁRIO**

Nesta etapa da pesquisa são analisadas não apenas a técnica utilizada em cada cenário proposto, mas também as quantidades das correntes de massa do modelo matemático (que relacionam cada tipo de resíduo com uma técnica utilizada), para desta forma investigar de forma mais profunda as causas e efeitos de cada seleção realizada pelas simulações do modelo matemático em cada cenário.

A Tabela 35 traz a relação de correntes e suas quantidades para cada cenário simulado, assim como uma breve descrição da origem e destino de cada corrente, que pode ser observada no fluxograma conceitual do modelo matemático deste trabalho, na Figura 19.

**Tabela 35** - Resumo das Correntes de Massa para Cada Cenário Proposto

<b>Correntes</b>	<b>Descrição</b>	<b>Cenário 1 (ton)</b>	<b>Cenário 2 (ton)</b>	<b>Cenário 3 (ton)</b>
C04	Recicláveis → Reciclagem	33.112.800	33.112.800	27.762.943
C05	Recicláveis → Aterros	0	0	0
C06	Recicláveis → Incineração	0	0	5.349.857
C07	Orgânicos → Aterro Sanitário	0	0	0
C08	Orgânicos → Compostagem	44.643.150	0	0
C09	Orgânicos → Dig. Anaeróbica	0	44.643.150	13.117.991
C10	Orgânicos → Incineração	0	0	31.525.160
C11	Rejeitos/Outros → Aterros	5.227.486,20	0	0
C12	Rejeitos/Outros → Incineração	14.186.863,80	19.414.350	19.414.350
C13	Rej. Reciclagem → Aterros	13.245.120	13.245.120	11.105.177
C14	Rej. Compostagem → Aterros	2.232.157,5	0	0
C15	Cinzas Incineração → Aterros	2.837.372,76	3.882.870	11.257.873

Fonte: Do Autor (2024).

Sobre a corrente C04, que relaciona materiais recicláveis secos com a técnica de reciclagem, observa-se que nos três cenários o modelo considerou fortemente esta opção. Nos cenários 1 e 2, a alta utilização desta corrente está relacionada simultaneamente com o alto potencial de geração de renda e o alto saldo negativo de emissões ao utilizar a técnica de reciclagem. No Cenário 3, a utilização da técnica de reciclagem está relacionada com as restrições do modelo matemático baseadas nas metas do PLANARES.

É importante observar que de maneira geral a utilização de materiais recicláveis tem também o potencial de redução significativo de consumo energético em comparação à produção de materiais equivalentes de matérias-primas virgens, porém, analisando o potencial de geração energético, esta redução de consumo não foi considerada nesta análise.

Analisando a corrente C05, observa-se que em nenhum dos o modelo considerou-a, o que evidencia o grande desperdício que é o direcionamento de recicláveis secos a aterros sanitários e aponta para a urgência da necessidade de alterar a situação atual da baixa taxa de reciclagem no Brasil.

A corrente C06, que relaciona materiais recicláveis secos com a técnica de incineração é presente apenas no Cenário 3, o que reforça a indicação de que o foco na técnica de incineração deve estar fortemente relacionado a uma política direcionada a recuperação energética.

Sobre a corrente C07, assim como na análise da corrente C05, observa-se que o modelo não direcionou para a utilização desta corrente em nenhum cenário, o que evidencia que assim como no caso dos recicláveis secos, o direcionamento de material orgânico para aterros sanitários também é um grande desperdício de potencial econômico e energético com grande ocorrência na situação atual do Brasil. Adicionalmente, todas as outras possibilidades de tratamento de material orgânico apresentam menores valores de emissão de gases causadores do efeito estufa do que a utilização de aterros sanitários.

A técnica de compostagem é representada pela corrente C08, que foi presente com grande participação no Cenário 1, o que reforça a análise feita na seção anterior, de que a compostagem se apresenta como uma boa opção no tratamento de material orgânico quando o foco é direcionado na questão econômica.

A corrente C09, que relaciona materiais orgânicos à técnica de digestão anaeróbica, foi presente nos cenários 2 e 3, uma vez que além das baixas emissões provenientes desta técnica, há também potencial de geração energética na utilização dela.

Sobre a corrente C10, observa-se novamente que o direcionamento para a técnica de incineração deve ser considerado apenas em situações com grande foco na geração energética, uma vez que para material orgânica, as técnicas de compostagem e digestão anaeróbica são mais interessantes do ponto de vista econômico e ambiental.

As correntes C11 e C12 que relacionam Rejeitos, Têxteis, Couros e Borrachas com as técnicas de Aterro Sanitário e Incineração respectivamente, mostram que estas duas técnicas também são concorrentes para este tipo de resíduo. A presença da corrente C11 no Cenário 1 se deve ao fato de que a utilização de aterros sanitários representa um custo menor do que a técnica de incineração. Por outro lado, a ausência da corrente C11 nos cenários 2 e 3 aponta ao fato de que a incineração é um método com menor nível de emissões e com maior potencial de geração energética.

A corrente C13 é relacionada ao rejeito de triagem na técnica de reciclagem, que tem como destinação final os aterros sanitários. Portanto, em todos cenários onde houver a presença da corrente C04 haverá também a presença da corrente C13.

Da mesma forma, a corrente C14 é referente ao rejeito de peneira da compostagem que tem como destino os aterros sanitários e portanto, a corrente C14 é presente nos cenários onde também é presente a corrente C08.

Relação semelhante ocorrente na corrente C15, que é relacionada a geração de cinzas provenientes da incineração que são direcionadas a aterros sanitários e, portanto, em todos cenários onde a incineração se faz presente, a corrente C15 também é utilizada.

Desta forma conclui-se esta discussão com foco nas correntes dos conjuntos de solução e na próxima seção serão analisados o impacto dos dados de saída do modelo nas metas do PLANARES.

## **7.7. IMPACTO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS NAS METAS DO PLANARES**

Esta etapa tem como finalidade relacionar os impactos dos cenários propostos sobre as metas estipuladas no PLANARES. O Quadro 2 (página 47) traz as nove metas do PLANARES e abaixo são discutidos os impactos dos cenários propostos sobre elas.

A Meta 1 traz como objetivo aumentar a sustentabilidade econômico-financeira do manejo de resíduos sólidos pelos municípios e observa-se que nos três cenários propostos o custo global foi menor do que o cenário considerando a totalidade dos RSU direcionados a aterros sanitários.

Observa-se também a possibilidade de geração de renda a partir do processamento de RSU através da recuperação de materiais reciclados, produção de composto orgânico por meio da compostagem e geração de energia elétrica por meio de recuperação de metano em aterros, produção de metano por meio da digestão anaeróbica e incineração de resíduos.

Adicionalmente, como observado na pesquisa bibliográfica deste trabalho, a utilização de métodos inadequados de disposição final como aterros e lixões gera também prejuízos financeiros por conta da proliferação de doenças que são tratadas no sistema público de saúde, recuperação de solos e mananciais, entre outros.

Sobre a Meta 2, que menciona o aumento da capacidade de gestão dos municípios, observa-se novamente a possibilidade de redução de custos operacionais no tratamento e disposição final de RSU e também a geração de renda por meio destes métodos. Adicionalmente, o fato de que o modelo matemático sugere conjuntos de solução de acordo com o objetivo que se deseja otimizar, é uma ferramenta para auxílio de gestão do sistema de gerenciamento de RSU.

A Meta 3 tem como objetivo a eliminação de práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados, e visando o cumprimento da mesma, estas práticas não foram consideradas na elaboração do modelo matemático, o que faz com que nenhum dos conjuntos de soluções apresentados tenham a presença destas técnicas em nenhum dos cenários.

Sobre a Meta 4, que menciona a redução da quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para aterros sanitários, é possível observar que nos três cenários propostos, a utilização desta técnica representou menos da metade da quantidade de RSU direcionados a aterros sanitários atualmente no Brasil. Dessa forma, conclui-se o atingimento também desta meta através dos conjuntos de soluções propostas pelo modelo matemático.

A Meta 5 do PLANARES traz como objetivo promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. A difusão da reciclagem, presente nos três cenários apresentados, apresentaria também uma expansão da quantidade de materiais disponíveis e também da gama de possíveis clientes para catadores, possibilitando assim um maior potencial financeiro nas atividades de catadores. Desta forma, o modelo contribui para esta meta, pois resíduos com potencial de geração de renda e que no cenário atual estariam destinados a aterros sanitários ou técnicas inadequadas de disposição final, estarão destinados a técnicas que possibilitem a atividade econômica de catadores.

As metas 6 e 7 mencionam o objetivo de aumentar a recuperação tanto da fração seca quanto orgânica dos RSU e observa-se nos três cenários este aumento nos dois tipos de resíduos, através de maior utilização de técnicas de reciclagem, compostagem e digestão anaeróbica.

As metas 8 e 9 trazem como objetivo o aumento da recuperação e aproveitamento energético através de biogás de RSU e tratamento térmico de RSU e observa-se na Tabela 33 que nos três cenários propostos o potencial de geração energética foi significativamente maior do que no cenário onde considerou-se a totalidade dos RSU direcionados a aterros sanitários. Portanto, é possível considerar que o modelo matemático é útil para determinar caminhos para que todas as metas propostas no PLANARES sejam cumpridas.

Desta forma, encerra-se a discussão de resultados concluindo que o atual sistema de gerenciamento de RSU no Brasil é obsoleto e ineficaz. Enquanto países desenvolvidos avançam na redução da dependência de aterros sanitários, buscando técnicas que otimizem o aproveitamento dos diversos potenciais dos resíduos, cerca de 40% dos RSU gerados no

Brasil ainda são inadequadamente destinados a lixões e aterros controlados, que não apenas desperdiçam o potencial dos resíduos, mas também resultam em danos econômicos, ambientais e sociais. Isso ocorre mesmo após mais de uma década da implementação da Lei Nacional dos Resíduos Sólidos, que proibiu tais práticas.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecido em 2022, define diretrizes e metas que buscam a transição do sistema atual para um mais sustentável, com prazo estabelecido para esta transição até o ano de 2040. Para o cumprimento do prazo destas metas serão necessárias análises técnicas de gestores públicos, levando em conta as quantidades e tipos de resíduos gerados em cada região, assim como quais potenciais dos RSU são mais interessantes a exploração, para finalmente selecionar as técnicas que melhor alinham geração e aproveitamento dos resíduos sólidos.

Com a discussão dos resultados apresentada neste capítulo, conclui-se que o modelo matemático desenvolvido pode ser uma ferramenta de alto potencial para a realização destas análises técnicas para tomadas de decisão relacionadas a melhorias do sistema de gerenciamento de RSU.

O Quadro 3 apresenta de forma resumida a relação entre as metas, resultados e contribuições modelo nas mesmas e também requisitos e premissas necessárias que foram identificadas de forma geral no sistema de gerenciamento de RSU para possibilitar estas mudanças de direcionamento que viabilizem o cumprimento das metas.

**Quadro 3 – Relações entre Metas do PLANARES e Contribuições e Resultados do Modelo (continua)**

<b>Meta PLANARES</b>	<b>Contribuição do Modelo</b>	<b>Resultados do Modelo</b>	<b>Requisitos e Premissas Necessárias</b>
Meta 1 - Aumentar a sustentabilidade econômico-financeira do manejo de resíduos pelos municípios	Elaborar conjunto solução que direcione a um melhor resultado econômico financeiro do sistema de gerenciamento de RSU	Nos três cenários o custo global encontrado foi menor que no cenário considerando a totalidade dos RSU direcionados a aterros sanitários.	- Coletas Seletivas Adicionais; - Conscientização e Engajamento Social; - Investimento em infraestrutura.

**Quadro 3 – Relações entre Metas do PLANARES e Contribuições e Resultados do Modelo (continuação)**

<b>Meta PLANARES</b>	<b>Contribuição do Modelo</b>	<b>Resultados do Modelo</b>	<b>Requisitos e Premissas Necessárias</b>
Meta 2 - Aumentar a capacidade de gestão dos municípios;	Sugestão de conjuntos de solução de acordo com o objetivo que se deseja otimizar, sendo ferramenta de auxílio na gestão dos RSU.	Três cenários otimizados em rápida solução matemática de um problema que necessitaria de muitos recursos para solucionar de forma empírica.	- Treinamento de gestores públicos; - Implementação do modelo matemático e sistemas de simulação na tomada de decisões públicas voltadas a RSU.
Meta 3 - Eliminar práticas de disposição final inadequada e encerrar lixões e aterros controlados;	Sugestão de conjuntos de solução que não consideram a utilização destas práticas inadequadas, substituindo-as por outras mais sustentáveis.	Conjuntos de solução em três cenários diferentes utilizando técnicas como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica e incineração.	- Encerramento da utilização dos lixões e aterros controlados; - Viabilização da utilização de novas técnicas; - Conscientização e Engajamento Social;
Meta 4 - Reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada;	Sugestão de conjuntos de solução que contemplam a utilização de outras técnicas além de aterros sanitários.	Conjuntos de solução em três cenários diferentes em que a maior utilização de aterros sanitários representaria cerca de metade do que é utilizada atualmente.	- Viabilização da utilização de novas técnicas; - Coletas Seletivas Adicionais; - Conscientização e Engajamento Social; - Investimento em infraestrutura.

**Quadro 3 – Relações entre Metas do PLANARES e Contribuições e Resultados do Modelo (continuação)**

<b>Meta PLANARES</b>	<b>Contribuição do Modelo</b>	<b>Resultados do Modelo</b>	<b>Requisitos e Premissas Necessárias</b>
Meta 5 - Promover a inclusão social e emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis;	Sugestão de conjuntos de solução com maior utilização das técnicas de reciclagem e compostagem.	Nos três cenários, os resultados apresentam um grande aumento na reciclagem, o que contribuiria para aumento de renda para os catadores.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coletas Seletivas Adicionais;</li> <li>- Conscientização e Engajamento Social;</li> <li>- Investimento em infraestrutura.</li> </ul>
Meta 6 - Aumentar a recuperação da fração seca dos RSU;	Sugestão de conjuntos de solução com maior utilização das técnicas de reciclagem.	Nos três cenários, os resultados apresentam um grande aumento na reciclagem, o que contribui para o atingimento da meta.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coletas Seletivas Adicionais;</li> <li>- Conscientização e Engajamento Social;</li> <li>- Investimento em infraestrutura.</li> </ul>
Meta 7 - Aumentar a reciclagem da fração orgânica dos RSU;	Sugestão de conjuntos de solução com utilização das técnicas de compostagem e/ou digestão anaeróbica.	Nos três cenários, os resultados apresentam uma grande utilização das técnicas de compostagem e/ou digestão anaeróbica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Viabilização da utilização de novas técnicas;</li> <li>- Coletas Seletivas Adicionais;</li> <li>- Conscientização e Engajamento Social;</li> <li>- Investimento em infraestrutura.</li> </ul>

**Quadro 3 – Relações entre Metas do PLANARES e Contribuições e Resultados do Modelo (continuação)**

<b>Meta PLANARES</b>	<b>Contribuição do Modelo</b>	<b>Resultados do Modelo</b>	<b>Requisitos e Premissas Necessárias</b>
Meta 8 - Aumentar a recuperação e aproveitamento energético de biogás de RSU;	Sugestão de conjuntos de solução com utilização da técnica de digestão anaeróbica.	Em dois dos cenários, os resultados apresentam utilização da técnica de digestão anaeróbica para tratamento da parcela orgânica dos RSU	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Viabilização da utilização de novas técnicas;</li> <li>- Coletas Seletivas Adicionais;</li> <li>- Conscientização e Engajamento Social;</li> <li>- Investimento em infraestrutura.</li> </ul>
Meta 9 - Aumentar a recuperação e aproveitamento energético por meio de tratamento térmico de RSU;	Sugestão de conjuntos de solução com utilização da técnica de incineração de RSU.	Nos três cenários, os resultados apresentam uma grande utilização da técnica de incineração.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Viabilização da utilização de novas técnicas;</li> <li>- Coletas Seletivas Adicionais;</li> <li>- Conscientização e Engajamento Social;</li> <li>- Investimento em infraestrutura.</li> </ul>

Observa-se portanto no Quadro 3, que o modelo matemático tem impactos consideráveis em todas as metas de RSU estabelecidas pelo PLANARES, mas salienta-se que estes resultados terão de ser viabilizados mediante investimentos em aspectos como infraestrutura, coletas seletivas e conscientização social. A redução de custos e geração de renda através da utilização de técnicas mais sustentáveis no sistema de gerenciamento de RSU serão fundamentais para a viabilização econômica destes investimentos.

## 7.8. RESUMO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS

### 7.8.1. Principais Benefícios

Os resultados das simulações dos cenários indicam benefícios significativos em termos de sustentabilidade ambiental, econômica e social. Dentre os principais benefícios, destacam-se:

- **Redução de Custos Operacionais:** No cenário de otimização de custos operacionais, a simulação indicou um potencial saldo financeiro de R\$32.821.892.100, o que significa que com a aplicação de técnicas de reciclagem e compostagem que geram um saldo financeiro positivo, o potencial de faturamento destas técnicas supera os custos de processamento, fator que deve ser decisivo para a viabilização econômica da implementação de um sistema de gerenciamento de RSU otimizado;
- **Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa:** No cenário de minimização das emissões de gases causadores de efeito estufa, a simulação resultou em um saldo negativo de emissões de -59.046.456.011 tonCO<sub>2</sub>-eq/ano. A técnica de reciclagem, em particular, mostrou-se altamente eficaz na neutralização e compensação de emissões. Observou-se também que o conjunto solução encontrado no Cenário 1 (otimização de custos) teve um resultado bastante próximo do observado no Cenário 2 (minimização de emissões), porém, o Cenário 1 apresentou um potencial de faturamento mais de três vezes maior do que o Cenário 2, o que indica que muito provavelmente o Cenário 1 seria mais interessante de ser colocado em prática do que o Cenário 2, pois traria um grande impacto econômico e ao mesmo tempo também apresentaria um resultado de emissões muito próximo ao melhor possível. Futuras oportunidades no mercado de comercialização de créditos de carbono podem ter grande impacto econômico, colocando em prática um sistema que possua saldo negativo de emissões;
- **Otimização do Potencial de Geração Energética:** No cenário de otimização do potencial de geração energética, foi observado um potencial de geração de 34.841.105.137 kWh por ano, destacando a técnica de incineração como a principal

contribuinte para a geração de energia a partir do processamento de RSU. Os cenários 1 e 2 também atingiram a Meta 9 do PLANARES que especifica que no mínimo 14,6% dos RSU sejam destinados a incineração para geração de energia elétrica.

### 7.8.2. Principais Obstáculos

Apesar dos benefícios encontrados pelo modelo matemático, os cenários simulados enfrentariam alguns obstáculos identificados no sistema global de gerenciamento de RSU que precisam ser considerados para a viabilização das técnicas sugeridas pelo modelo:

- **Investimento Inicial e Custos de Implementação:** A implementação das técnicas otimizadas requer investimentos iniciais significativos, especialmente para infraestruturas de reciclagem, compostagem, digestão anaeróbica e incineração;
- **Gestão e Logística:** A gestão eficiente dos RSU e a logística para a triagem, coleta e transporte adequado dos resíduos são desafios que necessitam de soluções robustas e integradas;
- **Regulamentações e Políticas Públicas:** A ausência de regulamentações específicas e políticas públicas adequadas pode dificultar a adoção ampla das técnicas otimizadas, necessitando de um forte suporte governamental;
- **Conscientização e Engajamento Social:** Para a devida viabilização de técnicas que processam tipos específicos de RSU, como por exemplo a compostagem que processa apenas materiais orgânicos, serão necessários conscientização e engajamento da população para a separação dos resíduos gerados nos domicílios. Para isto, deve-se considerar investimentos que busquem conscientizar e engajar a população sobre os benefícios de novas técnicas para o meio ambiente e para a sociedade.

### 7.8.3. Impacto do Modelo na Base Tripla da Sustentabilidade

Os cenários simulados apresentam impactos significativos nas três dimensões da sustentabilidade: ambiental, econômica e social.

#### 7.8.3.1. Benefícios Ambientais

- **Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa:** As técnicas de reciclagem, compostagem e digestão anaeróbica mostraram um impacto positivo na redução de emissões, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas;
- **Preservação de Recursos Naturais:** A reciclagem ajuda a preservar recursos naturais ao reutilizar materiais, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos e também reduzindo o consumo de energia para produção de materiais;
- **Minimização do Uso de Aterros Sanitários e Eliminação de Aterros Controlados e Lixões:** Eliminando o uso de aterros controlados e lixões, é possível diminuir a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Além disso, uma menor dependência da utilização de aterros sanitários prolonga a vida útil dos aterros existentes.

#### 7.8.3.2. Benefícios Econômicos

- **Geração de Receitas:** A reciclagem e compostagem geram produtos comercializáveis, como materiais reciclados e adubo, criando novas fontes de receita;
- **Economia de Custos:** A utilização de técnicas mais viáveis economicamente, como demonstrado no cenário de otimização de custos, pode resultar em economia significativa para os municípios. Além disso, são economizados recursos financeiros necessários para recuperação de solos e águas por conta de danos ambientais ocorridos da utilização de aterros controlados e lixões, e também tratamento de doenças que se proliferam por conta da existência destas técnicas;
- **Geração de Energia:** A incineração e a digestão anaeróbica geram energia a partir dos resíduos, contribuindo para a matriz energética e gerando valor econômico adicional. A recuperação de biogás em aterros sanitários, ainda que possua um potencial energético menor que a incineração e a digestão anaeróbica, deve ser implementada para reduzir as emissões provenientes do uso desta técnica.

#### 7.8.3.3. Benefícios Sociais

- **Criação de Empregos e Geração de Renda:** A implementação de novas infraestruturas e a operação das técnicas de disposição final de RSU criam empregos diretos e indiretos, beneficiando a comunidade local. Adicionalmente, uma maior aplicação da técnica de reciclagem faz com que catadores possam ampliar sua renda, devido a uma maior disponibilidade de materiais e também maior rede de clientes para venda dos mesmos;
- **Melhoria da Qualidade de Vida:** A redução de resíduos destinados a aterros e a minimização de emissões de gases de efeito estufa resultam em um ambiente mais saudável, melhorando a qualidade de vida da população. A eliminação da utilização de lixões e aterros controlados faz também com que haja redução em doenças que se proliferam por conta de contaminações oriundas destes locais;
- **Educação e Conscientização:** A implementação de programas de reciclagem e compostagem pode aumentar a conscientização ambiental e educar a população sobre práticas sustentáveis.

Finalizando este capítulo, observa-se que as simulações dos cenários demonstram que é possível alcançar significativos benefícios ambientais, econômicos e sociais através da otimização das técnicas de disposição final de RSU.

No entanto, para que esses benefícios sejam efetivamente alcançados, é necessário superar obstáculos relacionados aos investimentos iniciais, gestão eficiente e suporte regulatório. A adoção de políticas públicas robustas e a promoção de parcerias público-privadas podem ser caminhos viáveis para a implementação bem-sucedida das soluções propostas.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões finais deste trabalho, considerando as principais contribuições do mesmo, assim como suas limitações e sugestões de futuras pesquisas para aprofundamento dos temas apresentados.

## 8. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático visando otimizar o uso de técnicas de tratamento e disposição final de RSU com o objetivo de cumprir com as metas estabelecidas no PLANARES.

Para isso, elaborou-se uma pesquisa aplicada, exploratória e quantitativa, utilizando o método *Simplex* de otimização linear em conjunto com o módulo *Solver* do *software Microsoft Excel*. Os dados nacionais de geração de resíduos, as características de cada técnica de tratamento e disposição final de RSU e as metas do PLANARES serviram como base para elaboração das funções objetivo e restrições do modelo matemático para cada cenário.

A contribuição principal deste estudo foi o desenvolvimento de um modelo matemático destinado a auxiliar na seleção de técnicas para o tratamento e a disposição final de resíduos sólidos, em conformidade com as metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, em três diferentes cenários de otimização.

Com base nos resultados apresentados para os três diferentes cenários propostos, é possível concluir que a aplicação do modelo matemático proposto para otimização de custos operacionais, minimização de emissões de gases causadores de efeito estufa e maximização do potencial de geração energética traz possibilidades de melhoria significativas e orienta políticas públicas e práticas de gestão ambiental.

Os cenários simulados demonstram que a simples disposição dos RSU em aterros sanitários representa um custo significativo e um impacto ambiental considerável, contrastando com os cenários otimizados que mostram potencial de redução de custos, emissões e aproveitamento energético. A reciclagem emerge como uma estratégia fundamental, não apenas por seu potencial econômico positivo (redução de custos e geração de receita), mas também por sua capacidade de mitigar emissões através da economia de recursos e da redução na produção de materiais virgens.

Adicionalmente, a diversificação das técnicas de disposição final, incluindo compostagem, digestão anaeróbica e incineração, reflete um movimento em direção à sustentabilidade e à maximização do potencial dos recursos. Cada técnica contribui de

maneira particular para os objetivos específicos de cada cenário, seja na redução de emissões, na geração de energia renovável ou na minimização dos custos operacionais.

A escolha do cenário a ser otimizado requer uma análise das condições regionais, das metas ambientais e das capacidades técnicas e financeiras disponíveis. No entanto, os resultados apresentados sublinham a importância de políticas públicas que incentivem a inovação e a adoção de práticas sustentáveis no gerenciamento de resíduos, alinhando-se com metas globais de sustentabilidade e mudança climática.

Os resultados obtidos do modelo matemático apresentam um forte potencial de impacto na base tripla da sustentabilidade, uma vez que o modelo atual de gerenciamento de RSU, baseado na utilização de aterros, é ineficaz em termos econômicos e ambientais. Do ponto de vista social, a promoção da reciclagem tem o potencial de impulsionar a inclusão social e emancipação econômica dos catadores. A compostagem também pode oferecer uma oportunidade de renda e integração econômica para um público diverso.

Os conjuntos soluções apresentados na discussão de que estão alinhados com as metas descritas no PLANARES, evidenciam que o modelo matemático elaborado neste trabalho contribui para o avanço do conhecimento de práticas mais sustentáveis para gestão de RSU no Brasil e portanto, esta ferramenta pode ser útil a gestores públicos que busquem embasamento técnico para o cumprimento das metas do PLANARES.

O potencial de resultados apresentado, também sugere que este trabalho pode ser um ponto de partida para uma série de outros, que busquem definir caminhos e ferramentas para atingir um maior nível de sustentabilidade na gestão de RSU.

## **8.1. LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Para uma análise global e generalista do cenário de geração, tratamento e disposição final de RSU no Brasil, foram necessárias hipóteses e simplificações no modelo matemático, que podem não capturar completamente a complexidade real do sistema de gestão de RSU em cada região.

Por exemplo, os custos operacionais das técnicas foram considerados, mas não as coletas adicionais de RSU necessárias nem os investimentos em infraestrutura para viabilizá-

las. Além disso, não foram incluídos investimentos em educação, divulgação e conscientização social, essenciais para a implementação eficaz do sistema de gerenciamento de RSU.

Os valores financeiros utilizados são também médias obtidas, o que pode não representar uma situação aplicável em todas as regiões e não levam em conta possíveis flutuações de mercado, como por exemplo, valores de materiais reciclados e variação do mercado de energia.

O potencial de geração de renda através da comercialização de créditos de carbono não foi considerado neste trabalho, uma vez que o mercado ainda não é regularizado e a prática ainda não é difundida no Brasil.

## **8.2. PESQUISAS FUTURAS**

As futuras pesquisas poderiam focar em preencher as lacunas e limitações identificadas. Expandir a modelagem para considerar as particularidades e limitações regionais, além de aprofundar temas como os investimentos necessários para viabilizar o sistema de gestão de RSU, traria maior robustez às análises realizadas. Essas decisões sobre o sistema de gerenciamento de RSU competem aos municípios ou regiões metropolitanas, e uma análise mais detalhada poderia fornecer diretrizes mais específicas e adaptáveis.

Uma análise de viabilidade econômica a longo prazo também seria uma oportunidade de pesquisa futura, uma vez que neste trabalho foram realizadas comparações entre diferentes cenários, mas não uma análise aprofundada da sustentabilidade econômica da mudança do sistema de gestão de RSU, considerando os custos iniciais de infraestrutura, economias e geração de renda a longo prazo, benefícios socioeconômicos, entre outros fatores.

Um ponto que pode ter grande impacto futuro na viabilização e geração de renda através do sistema de gerenciamento de RSU é a comercialização de créditos de carbono, que ainda é uma prática não consolidada, mas dado o potencial de redução de emissões apresentado nos resultados dos cenários analisados, este pode ser um fator chave futuro na discussão sobre disposição final e tratamento de resíduos sólidos.

Outra possibilidade de pesquisa seria a análise de fatores sociais que contribuíram para o sucesso de engajamento em países que possuem um sistema de gerenciamento de RSU mais sustentável, e como estes fatores poderiam ser aplicados no Brasil. O sucesso desta transição proposta dependerá fortemente do engajamento social e da conscientização pública.

Portanto, um estudo detalhado sobre os fatores sociais que facilitaram o engajamento eficaz em países com sistemas de gestão de RSU mais sustentáveis poderia oferecer compreensões valiosas para o contexto brasileiro. Isso poderia incluir análises das políticas de educação ambiental, campanhas de sensibilização, iniciativas de responsabilidade social corporativa e envolvimento ativo de comunidades locais. Além disso, entender como esses fatores são adaptados e implementados em diferentes contextos culturais e econômicos pode fornecer um roteiro estratégico para melhorar a aceitação e a adesão a novas práticas de gestão de resíduos no Brasil.

Adicionalmente, explorar as barreiras sociais e culturais específicas que podem impedir a adoção de práticas sustentáveis de gestão de RSU também é crucial. Isso pode envolver pesquisas sobre percepções públicas, resistências institucionais, interesses comerciais conflitantes e desigualdades socioeconômicas que afetam a implementação de políticas eficazes de gestão de resíduos. Compreender esses desafios permitirá o desenvolvimento de estratégias mais inclusivas e adaptadas, visando garantir que a transição para um sistema de gestão de resíduos mais sustentável no Brasil seja não apenas viável tecnicamente, mas também socialmente aceitável e economicamente viável.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE. **Caderno Informativo Recuperação Energética: Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: Editora Abrelpe, 2012. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-caderno/>. Acesso em: 15 mai. 2022.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: Editora Abrelpe, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 18 mai. 2022.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Editora Abrelpe, 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2022/>. Acesso em: 22 abr. 2024.
- ABRELPE. **Saúde Desperdiçada: o caso dos lixões**. São Paulo: Grappa Editora e Comunicação, 2015. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-saude-desperdicada/>. Acesso em: 13 fev. 2022
- AD LANSINK. **Ladder van Lansink**. Disponível em: <https://www.adlansink.nl/voorbeeld-pagina/>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- ALI, S. M. *et al.* Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. **Journal of King Saud University - Science**, v. 26, n. 1, p. 59–65, 2014.
- ANDRETTA, M. **Pesquisa Operacional e Modelagem Matemática**. Disponível em: <https://sites.icmc.usp.br/andretta/ensino/aulas/sme0510-2-19/aula1.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2024.
- ARENALES, M. *et al.* Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 542 p.
- AYRES, R. U.; VAN DEN BERGH, J. C. J. M.; GOWDY, J. M. Strong versus weak sustainability: Economics, natural sciences, and “consilience”. **Environmental Ethics**. Environmental Philosophy Inc, , 2001.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=1>. Acesso em: 22 abr. 2024.

BEER, J. *et al.* Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) or poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. **Agroforestry Systems**, v. 12, n. 3, p. 229-249, dez. 1990. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00137286>.

BRASIL. Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em maio 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Nacional Lixão Zero**. Brasília, 2019.

CHENG, H.; HU, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. **Bioresource Technology**, jun. 2010.

CONRESOL. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômico-Financeira (EVTE): Sistema Integrado e Descentralizado de Tratamento de Resíduos e Disposição Final de Rejeitos**. Curitiba: Conresol, 2022.

COSTANZA, R. Ecological economics: a research agenda. **Structural Change And Economic Dynamics**, v. 2, n. 2, p. 335-357, dez. 1991. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0954-349x\(05\)80007-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0954-349x(05)80007-4).

COSTANZA, R.; DALY, H. E. Natural Capital and Sustainable Development. **Conservation Biology**, v. 6, n. 1, p. 37-46, mar. 1992.

CPFL. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <https://servicosonline.cpfl.com.br/agencia-webapp/#/taxas-tarifas>. Acesso em: 06 ago. 2023.

ELKINGTON, J. **Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. 1. ed. Oxford: Capstone Publishing Limited, 1997. v. 1

ESTADÃO. **Lixões geram prejuízo anual de US\$ 370 mi para sistema de saúde**. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/ciencia/lixoes-geram-custo-anual-de-us-370-milhoes-para-sistema-de-saude/>. Acesso em: 15 ago. 2023.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024**. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario>. Acesso em: 16 jul. 2024.

European Environment Agency. **The European environment - state and outlook 2020**. Copenhagen, Dinamarca: European Environment Agency, 2019.

EUROSTAT. **Municipal waste treatment, EU, 1995-2020 (kg per capita)**. 2021. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal\\_waste\\_treatment,\\_EU,\\_1995-2020\\_\(kg\\_per\\_capita\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Municipal_waste_treatment,_EU,_1995-2020_(kg_per_capita).png). Acesso em: 19 jun. 2022.

FILHO, W. L. Dealing with misconceptions Dealing with misconceptions on the concept of sustainability. **International Journal of Sustainability in Higher Education**. [s.l.] # MCB University Press, 2000. Disponível em: <[http://www.mcbup.com/research\\_registers/emh.asp](http://www.mcbup.com/research_registers/emh.asp)>.

GARRÉ, S. O. *et al.* Análise econômica para implantação de uma usina de compostagem de resíduo orgânico urbano. **Espacios**, Caracas, v. 38, n. 17, p. 3-19, out. 2016.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

GIMENEZ, C.; SIERRA, V.; RODON, J. Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 1, p. 149–159, nov. 2012.

GIUSTI, L. A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, ago. 2009.

GOODLAND, R. The concept of environmental sustainability. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 26, p. 1–24, 1995.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. **Governo Federal acaba com espera de mais de 10 anos e publica decreto do Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/governo-federal-acaba-com-a-espera-de-mais-de-10-anos-e-publica-decreto-do-plano-nacional-de-residuos-solidos>. Acesso em: 19 jun. 2022.

HASAN, S. E. **Public Awareness Is Key to Successful Waste Management**. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. **Anais**.2004.

IBGE. **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 25 abr. 2024.

INSTITUTO PRAGMA. **Anuário da Reciclagem 2022**. Brasília: Instituto Pragma, 2022.

IQBAL, A.; LIU, X.; CHEN, G. H. Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. **Science of the Total Environment**. Elsevier B.V., , 10 ago. 2020.

JOYCE, A.; PAQUIN, R. L.. The triple layered business model canvas: a tool to design more sustainable business models. **Journal Of Cleaner Production**, v. 135, p. 1474-1486, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.067>.

JUCÁ, J. F. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboatão dos Guararapes: Fade - Ufpe, 2014.

KARAK, T.; BHAGAT, R. M.; BHATTACHARYYA, P. Municipal solid waste generation, composition, and management: The world scenario. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 8 jan. 2012.

KHALID, A. *et al.* The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, ago. 2011.

KIMMINS, J. P.. Modelling the Sustainability of Forest Production and Yield for a Changing and Uncertain Future. **The Forestry Chronicle**, v. 66, n. 3, p. 271-280, 1 jun. 1990. Canadian Institute of Forestry. <http://dx.doi.org/10.5558/tfc66271-3>.

LACHTERMACHER, G. Pesquisa Operacional na tomada de decisões. Rio de Janeiro: Campus, 2007. 226 p.

LAVEE, D. Is Municipal Solid Waste Recycling Economically Efficient? **Environmental Management**, v. 40, n. 6, p. 926–943, 26 nov. 2007.

LIM, S. L.; LEE, L. H.; WU, T. Y. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**. Elsevier Ltd, , 10 jan. 2016.

MARSHALL, J. D.; TOFFEL, M. W. Framing the elusive concept of sustainability: A sustainability hierarchy. **Environmental Science and Technology**, 1 fev. 2005.

MARSHALL, R. E.; FARAHBAKHS, K. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 988–1003, abr. 2013.

MDR. **Ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil**: metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/calculadora-de-200bemissoes-de-gases-de-efeito-estufa-gee-no-manejo-de-rsu>. Acesso em: 16 abr. 2023.

MDR. **Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b>. Acesso em: 16 abr. 2023.

MELO, D. A. *et al.* Avaliação Quali-Quantitativa dos Rejeitos Gerados nas Cooperativas de Catadores de Materiais Recicláveis no Município de Goiânia, Brasil. **Revista Terceiro Incluído**, Goiânia, v. 9, n. 1, p. 209–225, 2019. DOI: 10.5216/teri.v9i1.61153. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/teri/article/view/61153>. Acesso em: 3 jun. 2024.

MEBRATU, D. Sustainability and sustainable development: Historical and conceptual review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 18, n. 6, p. 493–520, 1998.

MIEZAH, K. *et al.* Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana. **Waste Management**, v. 46, p. 15–27, 1 dez. 2015.

Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome. **Política Nacional de Assistência Social**. Brasília, 2004.

NORMAN, W.; MACDONALD, C. Getting to the Bottom of “Triple Bottom Line.” **Business Ethics Quarterly**, v. 14, n. 2, p. 243–262, 23 abr. 2004.

PICHTEL, J. WASTE MANAGEMENT PRACTICES. **Municipal, Hazardous, and Industrial Second Edition**. [s.l: s.n.].

PREFEITURA MUNICIPAL DE CABEDELLO. **1º Estudo de Gravimetria do Município de Cabedelo-PB**. Cabedelo: Prefeitura Municipal de Cabedelo, 2023.

PREFEITURA MUNICIPAL DE VALINHOS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Valinhos: Prefeitura Municipal de Valinhos-SP, 2022.

PURVIS, B.; MAO, Y.; ROBINSON, D. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. **Sustainability Science**, v. 14, n. 3, p. 681–695, 3 maio 2019.

RENOSAM. **The most efficient waste management system in Europe: Waste-to-energy in Denmark**. Varde, Dinamarca: Pe Offset, 2006.

RUIZ, J. A. Metodologia Científica: guia para eficiência nos estudos. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 180 p.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Proceedings Of The 2010 Winter Simulation Conference**, p. 183-198, dez. 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2010.5679166>.

SHARMA, A.; GUPTA, A. K.; GANGULY, R. Impact of open dumping of municipal solid waste on soil properties in mountainous region. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 4, p. 725–739, 1 ago. 2018.

SHI, L. *et al.* The Evolution of Sustainable Development Theory: Types, Goals, and Research Prospects. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, 1 dez. 2019.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**: metodologia de pesquisa em engenharia de produção estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas. Itajubá: Unifei, 2012.

VAVERKOVÁ, M. D. Landfill impacts on the environment— review. **Geosciences (Switzerland)**. MDPI AG, , 1 out. 2019.

VERGARA, S. E.; TCHOBANOGLOUS, G. Municipal solid waste and the environment: A global perspective. **Annual Review of Environment and Resources**, nov. 2012.

WCED. **World Comission on Environment and Development: Our Common Future**. Oslo, 1987.

WILLIAMS, C. C.; MILLINGTON, A. C. The diverse and contested meanings of sustainable development. **Geographical Journal**, v. 170, n. 2, p. 99–104, jun. 2004.

WILSON, D. C. Development drivers for waste management. **Waste Management and Research**, v. 25, n. 3, p. 198–207, jun. 2007.

ZHAO, Shifen *et al.* Multi-period Planning of Municipal Solid Waste Management: a case study in Qingdao. **Process Integration And Optimization For Sustainability**, v. 7, n. 1-2, p. 107-126, 30 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41660-022-00279-7>.