



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

LARISSA GOMES SENA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NOS CUSTOS
DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

VITÓRIA – ES
2020

LARISSA GOMES SENA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NOS CUSTOS
DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman

Coorientadoras: Profa. Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves e Dra. Luciana Harue Yamane

VITÓRIA – ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S474a Sena, Larissa Gomes, 1995-
Avaliação do efeito de políticas públicas nos custos de
gerenciamento de resíduos sólidos urbanos / Larissa Gomes Sena.
2020.
135 f. : il.

Orientador: Renato Ribeiro Siman.

Coorientadores: Gisele de Lorena Diniz Chaves, Luciana
Harue Yamane.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento
Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro
Tecnológico.

1. Gestão integrada de resíduos sólidos. 2. Reciclagem. 3.
Coleta seletiva. I. Siman, Renato Ribeiro. II. Chaves, Gisele de
Lorena Diniz. III. Yamane, Luciana Harue. IV. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 628

LARISSA GOMES SENA

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE POLÍTICAS PÚBLICAS NOS CUSTOS DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Aprovada em 18 de dezembro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman
Orientador - PPGES / CT / UFES

Prof^a. D.Sc. Luciana Harue Yamane
Coorientadora - PPGES / CT / UFES

Prof^a. D.Sc. Gisele Lorena Diniz Chaves
Coorientadora – PPGEN / CEUNES / UFES

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Examinador Interno – PPGES / CT / UFES

Prof. D.Sc. Diogo Appel Colvero
Examinador Externo – EMC / UFG

Em conformidade com as normas prescritas na Portaria Normativa Nº. 03/2020 – PRPPG/UFES, a assinatura do examinador externo (Prof. D.Sc. Diogo Appel Colvero) foi representada neste documento pela respectiva assinatura do presidente da sessão, Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman. Ato contínuo, o Sr. Presidente da banca examinadora atesta que, a defesa foi realizada por meio de videoconferência, ou outro suporte eletrônico a distância equivalente.

Prof. D.Sc. Renato Ribeiro Siman
Orientador – PPGES / CT / UFES



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por RENATO RIBEIRO SIMAN - SIAPE 1790301 Departamento de Engenharia Ambiental - DEA/CT Em 23/12/2020 às 08:36

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/116942?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por EDNILSON SILVA FELIPE - SIAPE 2524538
Departamento de Economia - DE/CCJE
Em 23/12/2020 às 08:43

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/116954?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder vida, saúde e sabedoria todos os dias. Por renovar minhas forças e me sustentar em momentos difíceis.

Aos meus pais e minha irmã, que são minha base, meu porto seguro, agradeço pelo encorajamento e confiança. Pela dedicação e esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada por sempre acreditarem no meu potencial. Nada seria possível sem o apoio de vocês.

À toda minha família, pelo carinho, motivação e por torcerem por mim. Obrigada por sempre me colocarem em suas orações.

Aos meus queridos amigos que acompanharam toda essa trajetória, pelo companheirismo e pelo apoio.

Ao meu orientador Renato Ribeiro Siman e minhas coorientadoras Gisele de Lorena Diniz Chaves e Luciana Harue Yamane, pela paciência, disponibilidade e dedicação. Agradeço pelas orientações na realização deste trabalho, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas do Lagesa e do PPGES, pelo companheirismo e experiências compartilhadas.

À minha dupla Layara, pela amizade construída nesses últimos anos, pelo companheirismo do início ao fim, pelos momentos e experiências compartilhadas na convivência diária, obrigada por tornar essa trajetória mais leve.

A todos que contribuíram de alguma forma para que fosse possível a realização desse trabalho.

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços
repetidos dia após dia.”*

(Robert Collier)

RESUMO

O gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) têm sido uma das questões mais difíceis para a administração pública municipal, principalmente em países em desenvolvimento, que encontram barreiras e desafios relacionados à questões financeiras e de planejamento. Os custos de gerenciamento de RSU são altos e comprometem parte das despesas das prefeituras, sendo mais significativos os custos de coleta. Os gestores públicos devem tomar decisões acertadas, de forma a atender às metas de desvio de recicláveis do aterro sanitário, mantendo a viabilidade financeira. Neste trabalho, um modelo de dinâmica de sistemas foi elaborado para avaliar o impacto das estratégias de coleta seletiva e de educação ambiental no custo total de gerenciamento para as prefeituras municipais. Como estudo de caso, foi simulado o contexto do município da Serra/ES. Foram propostos 26 cenários para avaliar o impacto de todas as estratégias mencionadas. O cenário que apresentou melhores resultados em termos sustentáveis, prevê um aumento da coleta seletiva de 0,71% para 30% em 20 anos, com uma redução dos rejeitos em 76% a partir da implementação de uma política de educação ambiental. As simulações mostraram que o custo total de gerenciamento pode ser reduzido a partir de escolhas das melhores estratégias de coleta seletiva, tanto em termos de produtividade quanto de custos por tonelada coletada.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos sólidos; Coleta seletiva; Educação ambiental; Custos; Dinâmica de sistemas.

ABSTRACT

The management of Urban Solid Waste (MSW) has been one of the most difficult issues for municipal public administration, especially in developing countries, which face barriers and challenges related to financial and planning issues. The costs of managing MSW are high and compromise part of the expenses of city halls, the collection costs being more significant. Public managers must make the right decisions in order to meet the targets for diversion of recyclables from the landfill, while maintaining financial viability. In this work, a system dynamics model was developed to assess the impact of selective collection and environmental education strategies on the total management cost for city halls. As a case study, the context of the municipality of Serra / ES was simulated. 26 scenarios were proposed to assess the impact of all the mentioned strategies. The scenario that presented the best results in sustainable terms, foresees an increase in selective collection from 0.71% to 30% in 20 years, with a reduction of waste in 76% after the implementation of an environmental education policy. The simulations showed that the total cost of management can be reduced by choosing the best selective collection strategies, both in terms of productivity and costs per ton collected.

Keywords: Solid waste management; Selective collect; Environmental education; Costs; Systems dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 – Composição gravimétrica da coleta seletiva no Brasil em 2018	30
Figura 3-2 - Exemplo de diagrama de causa e efeito	40
Figura 3-3 - Componentes do diagrama de estoque e fluxo.....	41
Figura 4-1 - Taxa geométrica de crescimento populacional do município da Serra para o período 2020-2039.	47
Figura 5-1 – Diagrama de causa e efeito.	57
Figura 5-2 – Diagrama de estoque e fluxo (Módulo quantidade de resíduos).	61
Figura 5-3 - Diagrama de estoque e fluxo (Módulo custos de gerenciamento).	67
Figura 5-4 – Resultado da análise de sensibilidade para os custos de cada modalidade de coleta seletiva.....	79
Figura 5-5 - Resultado da análise de sensibilidade para o custo total de coleta seletiva e custo total gerenciamento de RDO.	80
Figura 5-6 - Curva “S” da influência da política de educação ambiental no percentual de rejeito da coleta seletiva porta a porta (a), PEV (b) e mista (c).	88
Figura 5-7 - Custo total da coleta seletiva, coleta convencional e disposição final (a) e quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário e para reciclagem (b) para a prefeitura entre 2020 e 2039 no Cenário base.	91
Figura 5-8 - Impacto da ampliação da coleta seletiva de 0,71% para 15% (a) e 30% (b) nos custos de coleta convencional, coleta seletiva e disposição final para a prefeitura municipal ao longo dos 20 anos.	93
Figura 5-9 - Impacto da ampliação da coleta seletiva de 0,71% para 15% (a) e 30% (b) na quantidade de rejeitos enviados para aterro sanitário e resíduos recicláveis desviados para reciclagem ao longo dos 20 anos.....	94
Figura 5-10 – Quantidade de rejeitos de acordo com os percentuais das modalidades de coleta seletiva para cada cenário ao longo dos 20 anos.....	98
Figura 5-11 – Impacto dos diferentes agentes executores no custo total da coleta seletiva para cada cenário ao longo dos 20 anos.	100

Figura 5-12 – Impacto da política de educação ambiental no custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal ao longo dos 20 anos.	103
Figura 5-13 - Impacto da política de educação ambiental na quantidade de rejeitos ao longo dos 20 anos.	105
Figura 5-14 - Impacto da governança parcial (a) e total (b) no custo total de coleta convencional, custo total de coleta seletiva e custo total de disposição final ao longo dos 20 anos.....	108
Figura 5-15 - Impacto da governança parcial (a) e total (b) na quantidade de rejeitos enviados para aterro sanitário e resíduos recicláveis desviados para reciclagem ao longo dos 20 anos.	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1 - Média mundial de geração <i>per capita</i> de RSU com relação ao nível de renda do país baseado no Produto Interno Bruto (PIB).....	22
Quadro 3-2 – Despesa per capita com manejo de RSU em relação à população urbana dos municípios brasileiros.	23
Quadro 3-3 – Coberturas de coleta de RSU de acordo com o nível de renda do país baseado no Produto Interno Bruto (PIB).	25
Quadro 3-4 – Custos de coleta de RSU em função do nível de renda do países baseado no Produto Interno Bruto (PIB).	26
Quadro 3-5 – Comparação do custos dos serviços de coleta de RSU no Brasil por região.	27
Quadro 3-6 – Cobertura de coleta seletiva por população urbana atendida, segundo faixa populacional.....	28
Quadro 3-7 - Testes para verificação do modelo de simulação em dinâmica de sistemas.	43
Quadro 3-8 – Agrupamento dos testes de confiabilidade conforme as categorias de modelagem.....	46
Quadro 4-1 - Fluxo metodológico para o desenvolvimento da pesquisa proposta	49
Quadro 5-1 – Representação das variáveis dos cenários propostos	60
Quadro 5-2 – Parâmetros do modelo matemático e respectivas unidades e valores adotados.....	70
Quadro 5-3 – Comportamento das variáveis submetidas a valores extremos.	77
Quadro 5-4 – Resumo dos cenários para simulação do modelo de dinâmica de sistemas.	83
Quadro 5-5 – Metas de ampliação da cobertura da coleta seletiva (% da população atendida) propostas no horizonte de implementação do PERS-ES	86
Quadro 5-6 – Metas de ampliação da coleta seletiva (% da massa coletada) para o município da Serra – ES.....	86
Quadro A-1 – Equações matemáticas do modelo de dinâmica de sistemas.....	125

Quadro A-2 – Equações para variáveis dependendo do cenário de política de
ampliação da coleta seletiva.131

Quadro A-3 - Equações do percentual de rejeito para cada modalidade de coleta. 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 – Quantidade gerada de resíduos domiciliares e respectivos percentuais de coleta convencional e coleta seletiva no município da Serra/ES.....	48
Tabela 4-2 - Valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão das variáveis de custo (R\$/t) para análise de sensibilidade.	55
Tabela 5-1 - Custo unitário de coleta convencional realizada pela prefeitura.	71
Tabela 5-2 – Custo unitário da coleta seletiva porta a porta realizada pela prefeitura.	72
Tabela 5-3 - Custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por OCMRR.	73
Tabela 5-4 - Custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por empresas terceirizadas.	73
Tabela 5-5 - Custo unitário de coleta seletiva PEV realizada pela prefeitura.	74
Tabela 5-6 –Custo unitário de coleta seletiva PEV realizada terceirizadas.	74
Tabela 5-7 – Custo unitário de coleta seletiva mista realizada pela prefeitura.....	75
Tabela 5-8 –Custo unitário de coleta seletiva mista realizada por OCMRR	75
Tabela 5-9 –Custo unitário de coleta seletiva mista realizada por empresas terceirizadas.	76
Tabela 5-10 - Percentuais de massa de resíduo coletada para cada modalidade de coleta seletiva no município da Serra.....	81
Tabela 5-11 - Percentuais de rejeitos para cada modalidade de coleta seletiva em função da política de educação ambiental	88
Tabela B-1 - Resultados do custo total de gerenciamento de RDO para diferentes valores de time step utilizando o método de integração de Runge Kutta.	134

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GERAL	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	21
3.2. COLETA CONVENCIONAL DE RSU	25
3.3. COLETA SELETIVA DE RSU	28
3.4. DESTINAÇÃO DE RSU: RECICLAGEM E DISPOSIÇÃO FINAL DE REJEITOS EM ATERROS SANITÁRIOS	35
3.5. DINÂMICA DE SISTEMAS	38
3.5.1. Diagrama de causa e efeito	39
3.5.2. Diagrama de estoque e fluxo	41
3.5.3. Testes de verificação em Dinâmica de Sistemas	43
4. METODOLOGIA	47
4.1. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ÁREA DE ESTUDO	47
4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
4.2.1. Etapa I: Identificação das variáveis relativas às estratégias de coleta seletiva e educação ambiental que influenciam nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos e elaboração do diagrama de causa e efeito	50
4.2.3. Etapa II: Elaboração de diagrama de estoque e fluxo e formulação matemática	50
4.2.4. Etapa III: Verificação da confiabilidade do modelo proposto	51
4.2.5. Etapa IV: Simulação e análise de cenários que evidenciem o impacto das variáveis sobre o custo de gerenciamento de resíduos sólidos para a prefeitura municipal da Serra/ES	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

5.1. ETAPA I: DESCRIÇÃO DE CAUSALIDADE ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE COLETA SELETIVA E EDUCAÇÃO AMBIENTAL NOS CUSTOS DE GERENCIAMENTO DE RDO.....	57
5.2. ETAPA II: ELABORAÇÃO DE DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	59
5.2.1. Módulo quantidade de resíduos.....	60
5.2.2. Módulo custos de gerenciamento.....	66
5.2.3. Parâmetros para simulação do modelo.....	70
5.3. ETAPA III: VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO MODELO PROPOSTO	
76	
5.4. ETAPA IV: COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO SOBRE O CUSTO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DA SERRA.....	81
5.4.1. Descrição dos cenários simulados.....	81
5.4.2. Resultados da simulação e análise dos cenários.....	90
5.4.3. Discussão dos resultados.....	109
6. CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
APÊNDICE A – EQUAÇÕES E UNIDADES DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS.....	125
APÊNDICE B – RESULTADO DO TESTE DE INTEGRAÇÃO.....	134

1. INTRODUÇÃO

Os crescimentos populacional e econômico associados ao aumento dos padrões de consumo da sociedade são os principais impulsionadores da crescente geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (SUTHAR; RAYAL; AHADA, 2016; GIANNIS *et al.*, 2017). Em vista disso, as discussões sobre Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos (GIRSU) se intensificaram ao longo dos anos em todo o mundo, culminando em legislações nacionais referentes ao assunto. No Brasil, a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi considerada um marco legal regulatório para gestão e gerenciamento integrado dos resíduos (BRASIL, 2010).

Do ponto de vista do oferecimento de serviços e equipamentos pelas prefeituras municipais, o GIRSU pode ser dividido em três atividades principais: coleta e transporte; destinação final (tratamentos e reciclagem); e disposição final de rejeitos (DI MARIA; MICALE, 2014). Parte das receitas das prefeituras municipais é comprometida pelo Serviço de Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos (SLUMRS). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), as despesas com manejo de RSU representaram cerca de 4,1% da despesa corrente total das prefeituras municipais brasileiras no ano de 2017 (BRASIL, 2018).

Em grande parte dos municípios brasileiros, os sistemas de gerenciamento de RSU não são financeiramente sustentáveis, principalmente devido aos altos custos da coleta e o transporte de RSU (D'ONZA; GRECO; ALLEGRIANI, 2016; COLVERO *et al.*, 2020), que chegam a representar cerca de 60% a 70% de todo o custo do gerenciamento de RSU (DI MARIA; MICALE, 2014; COLVERO *et al.*, 2020). Ressalta-se que esses custos são altos devido à falta de otimização e porque as etapas da hierarquia da gestão de resíduos (minimização, reutilização e aproveitamento), em muitas localidades, não são satisfatoriamente implantadas, principalmente nos países em desenvolvimento (COLVERO *et al.*, 2020).

O custo da coleta seletiva se destaca por ser elevado. Ao comparar com a coleta convencional, os custos de coleta seletiva podem chegar a ser entre 4 a 12 vezes maior (CEMPRE, 2018; MAGALHÃES, 2020). De todas as formas, essa atividade pode ser implementada pelas modalidades porta-a-porta, Pontos de Entrega Voluntária (PEV) ou mista, podendo ser executada pela própria prefeitura, por empresas terceirizadas ou ainda por Organizações de Catadores de Materiais

Recicláveis e Reutilizáveis (OCMRR). Para cada modalidade e agente executor existem vantagens e desvantagens técnicas e financeiras que não só influenciam na eficiência da coleta seletiva, como também nos custos de suas ampliações para as prefeituras municipais (DE MATOS *et al.*, 2010; RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015; FERREIRA *et al.*, 2017; BESEN *et al.*, 2017).

A implementação bem sucedida do sistema de coleta seletiva também deve levar em consideração a adesão da população não só na correta segregação e acondicionamento dos resíduos na fonte geradora, como também na disponibilização do resíduo previamente segregado para adequada coleta, nos dias e horários descritos no plano de coleta seletiva local. Todas essas atividades são influenciadas pela implementação de políticas de educação ambiental conjuntamente com a implementação do plano de gerenciamento de resíduos, ao longo do tempo (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016; STRUK, 2017; SILVA, 2018; XUE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020). A correta segregação dos resíduos na fonte propicia a redução dos rejeitos e aumento da produtividade da coleta e triagem, reduzindo a disposição de resíduos em aterros sanitários (ROUSTA *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2019; XIAO *et al.*, 2020).

Apesar de a coleta seletiva ser mais dispendiosa, o aumento dessa atividade contribui para que os custos de coleta convencional e custos de disposição final sejam reduzidos (PINHA; SAWAGA, 2020). No entanto, no cenário atual, com os orçamentos públicos limitados, as administrações públicas, principalmente em países não desenvolvidos e em desenvolvimento, mantêm o foco das políticas em custos baixos, ainda que não sejam soluções ambientalmente sustentáveis (FUSS; BARROS; POGANIETZ, 2020). Como consequência, no Brasil, uma pequena parte dos resíduos sólidos secos recicláveis é coletada seletivamente, seguindo em sua maioria para aterros sanitários e áreas ambientalmente inadequadas de disposição final (COLVERO *et al.*, 2020; YOUSEFLOO; BABAZADEH, 2020).

Diante desse contexto, nota-se que é um desafio para as autoridades públicas encontrarem a melhor maneira de universalizarem o serviço de coleta seletiva favorecendo a reciclagem, ao mesmo tempo que mantêm a sustentabilidade financeira dos serviços e atendam a elementos compulsórios PNRS. Nesse sentido, identificar como se comportam ao longo do tempo as variáveis já expostas, que estão relacionadas ao custo total de GRSU, é importante para analisar as consequências

das decisões a serem tomadas pelos gestores. Para isso, o uso da dinâmica de sistemas surge como uma alternativa viável no tratamento dessa complexidade dinâmica inerente ao GIRSU.

A metodologia de dinâmica de sistemas é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que permite a verificação de sistemas complexos ao longo do tempo, considerando as interações entre as variáveis, a fim de avaliar e prognosticar seus impactos de maneira integrada e holística. Essa metodologia tem se mostrado eficaz no tratamento de questões específicas de gerenciamento de resíduos sólidos (KOLLIKATHARA; FENG; YU, 2010). Diversos estudos sobre dinâmica de sistemas aplicados à gestão de resíduos sólidos tratam da previsão de geração (DYSON; CHANG, 2005; SUFIAN; BALA, 2007; SIMONETTO; LOBLER, 2014); impacto da separação de resíduos na fonte geradora na eficácia da coleta e transporte (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016); e complexidade da geração e gerenciamento de resíduos (GIANNIS *et al.*, 2017; KOLLIKATHARA, FENG; YU, 2010).

Com base no exposto, ainda não se conhece o impacto no horizonte temporal da adoção das diferentes modalidades de coleta seletiva e também da implementação de políticas públicas para ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental sobre a eficiência do sistema e o dispêndio municipal. Desta maneira, o presente trabalho teve a intenção de analisar os impactos das estratégias de concessão e modalidade de execução da coleta seletiva, assim como de políticas públicas de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos das prefeituras municipais, utilizando a abordagem dinâmica de sistemas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o impacto das estratégias de coleta seletiva (modalidades porta a porta, PEV e mista), dos agentes executores (prefeitura, catadores e empresa terceirizada), bem como da política de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental no custo de gerenciamento de resíduos sólidos das prefeituras municipais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo principal, serão executados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as variáveis relativas às estratégias de coleta seletiva e educação ambiental que influenciam nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos e relacioná-las em um diagrama de causa e efeito;
- Relacionar as variáveis identificadas em um diagrama de estoque e fluxo, baseando-se na metodologia de dinâmica de sistemas e realizar a formulação matemática do modelo;
- Verificar a confiabilidade do modelo proposto;
- Definir e analisar cenários para averiguar o impacto das variáveis identificadas sobre os custos de gerenciamento de resíduos sólidos, usando como estudo de caso a prefeitura municipal da Serra/ES.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. GERENCIAMENTO INTEGRADO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A promulgação da Lei Federal 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), constituiu-se em um marco legal regulatório para a gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos no Brasil (BRASIL, 2010). A partir da aprovação desta lei, ficou mais clara a descrição de elementos de responsabilização dos geradores de resíduos sólidos pela gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos sob sua tutela visando, entre outros aspectos, a proteção da saúde pública, a qualidade ambiental, a destinação racional e a disposição final dos rejeitos (CAMPOS, 2014; GOMES *et al.*, 2014).

A PNRS define a gestão integrada de resíduos sólidos como o conjunto de ações que buscam soluções para os resíduos sólidos, considerando as dimensões políticas, econômicas, ambiental, cultura e social. O gerenciamento dos resíduos sólidos, por sua vez, envolve as atividades exercidas nas etapas de geração, coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em aterros sanitários (BRASIL, 2010).

A hierarquia de gestão dos resíduos, incluída na maioria das regulamentações ambientais mundiais estabelece que a opção que deve ser priorizada é a redução na fonte, seguida de reutilização, reciclagem e recuperação, enquanto a opção menos preferível é a disposição final em aterros sanitários (CALABRO; SATIRA, 2020). Entretanto, países desenvolvidos e em desenvolvimento apresentam diferenças na efetividade das ações de gerenciamento de RSU (KAYAKUTLU *et al.*, 2017). Nos países desenvolvidos, o planejamento está focado na hierarquia dos resíduos (CALABRO; SATIRA, 2020) enquanto que, nos países em desenvolvimento, o gerenciamento de RSU é, no geral, deficiente, com uma cobertura de coleta insuficiente, baixa separação de resíduos na fonte geradora e baixas taxas de recuperação (COLVERO *et al.*, 2020).

Da mesma forma, a quantidade de resíduos gerada varia de acordo com a região, país, cidade e até mesmo dentro das próprias cidades. Hoorneweg e Bhada-Tata (2012) relatam que as taxas de geração de RSU também são influenciadas pelo desenvolvimento econômico, grau de industrialização, hábitos, clima local e

urbanização. Além disso, a geração de RSU também varia em função do nível de renda do país, pois a medida que a renda disponível e os padrões de vida crescem, o consumo de bens e serviços aumenta proporcionalmente, assim como a quantidade de resíduos sólidos gerada (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012), conforme apresentado no Quadro 3-1.

Quadro 3-1 - Média mundial de geração *per capita* de RSU com relação ao nível de renda do país baseado no Produto Interno Bruto (PIB)

Nível de renda dos países	Taxa de geração <i>per capita</i> (t/hab/ano)
Países de renda alta	0,78
Países de renda média alta	0,42
Países de renda média baixa	0,29
Países de renda baixa	0,22

Fonte: Hoornweg e Bhada-Tata (2012). Países de renda alta: (PIB *per capita* = maior que US\$12.275); Países de renda média alta (PIB *per capita* = US\$3.976 – US\$12.275); Países de renda média baixa (PIB *per capita* = US\$1.006 - US\$3.975); e Países de baixa renda (PIB *per capita* = menor que US\$1.005).

O Quadro 3-1 mostra que, os países desenvolvidos apresentam maior geração de RSU. No entanto, esses países possuem capacidade para promover o seu gerenciamento adequado por possuírem recursos econômicos e tecnológicos disponíveis (COLVERO *et al*, 2020). Em contrapartida, países em desenvolvimento, como o Brasil, enfrentam diversos problemas relacionados à urbanização, desigualdades sociais, infraestrutura e políticas públicas, além de restrições financeiras que dificultam a implementação da gestão integrada de resíduos sólidos (MARSHALL; FARAHBAKHS, 2013; FUSS; BARROS; POGANIETZ, 2020; YOUSEFLOO; BABAZADEH, 2020).

No Brasil, segundo dados do Panorama de Resíduos Sólidos, a geração total de RSU aumentou 0,82% entre 2017 e 2018, chegando a geração de 216.629 toneladas diárias. Nesse período, a população também cresceu, logo a geração *per capita* de RSU teve um crescimento menor. Passando de uma geração *per capita* de 0,378 t/hab/ano em 2017 para uma geração *per capita* de 0,380 t/hab/ano em 2018, representando um aumento de 0,39% (ABRELPE, 2019).

É responsabilidade do poder público gerenciar adequadamente os resíduos sólidos urbanos gerados na localidade, devendo disciplinar o fluxo dos resíduos sólidos no município (JACOBI; BESEN, 2011), sendo essencial a disponibilidade de recursos financeiros para um gerenciamento de RSU de forma ampla e adequada. No entanto,

o autofinanciamento do gerenciamento de RSU é um fato raro na realidade dos municípios brasileiros (PEREIRA; FERNANDINO, 2019).

Pesquisas mostram que a receita arrecadada com os SLUMRS nos municípios brasileiros, salvo algumas exceções, é insuficiente para manter as atividades de gerenciamento de RSU (BRASIL, 2019). O Quadro 3-2 mostra os valores gastos com serviço de manejo de RSU em relação à população urbana no ano de 2018 nos municípios brasileiros, de acordo com as regiões geográfica.

Quadro 3-2 – Despesa per capita com manejo de RSU em relação à população urbana dos municípios brasileiros.

Regiões	Despesas per capita com manejo de RSU (R\$/hab/ano)
Norte	98,42
Nordeste	117,34
Centro-oeste	130,81
Sudeste	144,62
Sul	116,19

Fonte: BRASIL (2019)

Conforme observa-se no Quadro 3-2, a despesa com o manejo dos RSU nos municípios brasileiros no ano de 2018, variou de um valor mínimo de R\$ 98,42/habitante, apurada na região Norte, e atingindo o máximo de R\$ 144,62/habitante na região Sudeste. Em média, a despesa com manejo dos RSU no Brasil em relação à população urbana, foi de R\$ 130,47/habitante no ano de 2018. No Espírito Santo, esse valor foi de R\$ 149,50/habitante em 2018. Já no município da Serra/ES, foi verificado uma despesa de R\$ 216,87/habitante/ano, valor 45,06% superior à média estadual e 66,22% superior à média nacional.

Com relação às despesas das prefeituras com os SLUMRS, os municípios brasileiros no ano de 2018 tiveram um valor médio de R\$ 5.681.353,62/ano. Foi verificada uma incidência de 3,06% de despesas com RSU em relação às despesas correntes das prefeituras municipais para a manutenção de todos os serviços públicos prestados em todas as áreas. No Espírito Santo as despesas com os SLUMRS chegou a um valor médio de R\$ 7.354.800,09/ano, o que equivale a 3,69% das despesas correntes das prefeituras. Já no município da Serra/ES, a despesa com os SLUMRS foi de R\$ 109.325.947,27/ano, apresentando uma incidência de 9,98% nas despesas correntes da prefeitura municipal. Desse total, R\$ 22.094.400,08 foram gastos somente com a coleta de resíduos domiciliares e públicos, o equivalente a 20% da despesa total com os SLUMRS (BRASIL, 2019).

Nota-se que no município da Serra/ES o valor das despesas da prefeitura com os SLUMRS é superior tanto à média estadual, quanto à nacional. É importante ressaltar que nesse município a maior parte dos serviços são realizados unicamente por empresas privadas contratadas para realizar as atividades e esse pode ser o motivo pelo qual o município apresenta gastos maiores em relação à média estadual e nacional, onde existem municípios em que a própria prefeitura realiza as atividades exclusivamente ou em conjunto com empresas privadas e/ou OCMRR.

A etapa de coleta é essencial para que os resíduos entrem no sistema de gerenciamento e sejam tratados corretamente (CALABRO; SATIRA, 2020). A coleta pode ser realizada de maneira convencional, onde os RSU são coletados sem separação na fonte geradora e são encaminhados como rejeitos para a disposição final em aterros sanitários (CHIFARI *et al*, 2017), ou de maneira seletiva, quando os resíduos previamente segregados na fonte são coletados também separadamente e seguem para uma destinação final. A destinação final pode compreender a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes (BRASIL, 2010).

Independentemente de cada realidade local, a disponibilidade de recursos financeiros é essencial para a manutenção do SLUMRS, sempre preocupados com a universalização e integralidade dos serviços oferecidos, além de verificadas as viabilidades econômica e ambiental (ALZAMORA; BARROS, 2020). Entretanto, com orçamentos públicos limitados, gestores acabam sendo limitados a escolhas de baixos custos, mesmo que não sejam sustentáveis. Como consequência, apenas uma pequena parte dos RSU é coletada para a reciclagem (FUSS; BARROS; POGANIETZ, 2020).

Os aterros sanitários ainda são vistos como a forma mais comum de destinação final em muitas localidades no mundo. Isso ocorre devido a sua capacidade de receber com segurança os resíduos, independentemente de sua composição. Além disso, os custos para disposição final de RSU em aterros sanitários são baixos, quando comparado com outras destinações. (ZHANG; WANG, 2020). Entretanto, esse tipo de destinação é a que menos valoriza as possibilidades de reutilização e reciclagem, hierarquicamente mais nobres, inerentes aos resíduos sólidos (CALABRO; SATIRA, 2020). Neste sentido, dentre os desafios ambientais atuais estão uma coleta seletiva

que alie desempenho com uma maior capacidade de resíduos coletados, ampliação das condições de reciclagem, recuperação de materiais de qualidade, economia de recursos naturais e redução do uso de aterros sanitários (D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016; KNICKMEYER, 2020).

Nos tópicos subsequentes serão abordadas particularidades específicas das etapas de coleta convencional, coleta seletiva e de destinação final dos RSU, que envolve a reciclagem e a disposição final de rejeitos em aterros sanitários.

3.2. COLETA CONVENCIONAL DE RSU

Os municípios brasileiros utilizam um sistema convencional ou regular de coleta dos RSU. Nesse sistema, os resíduos são coletados sem segregação nas fontes geradoras e são transportados para disposição final (CONKE; DO NASCIMENTO, 2018). Esse serviço pode ser realizado pelos serviços de limpeza pública municipal, por empresas privadas, por catadores ou por outras entidades (VARELLA, 2011).

Segundo dados apresentados no Diagnóstico de Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos, realizado em 3.468 municípios brasileiros, com base nos dados do SNIS, a cobertura do serviço de coleta convencional dos Resíduos Sólidos Domiciliares (RDO), no ano de 2018, atingiu um percentual de 98,8% da população urbana e 92,1% da população total brasileira (BRASIL, 2019). Hoornweg e Bhada-Tata (2012) abordam que as taxas de cobertura de coleta de RDO podem variar, de acordo com os diferentes níveis de renda dos países, conforme pode ser percebido no Quadro 3-3.

Quadro 3-3 – Coberturas de coleta de RSU de acordo com o nível de renda do país baseado no Produto Interno Bruto (PIB).

Nível de renda dos países	Cobertura de coleta de RSU
Países de renda alta	98%
Países de renda média alta	85%
Países de renda média baixa	68%
Países de baixa renda	43%

Fonte: Hoornweg e Bhada-Tata (2012). Países de renda alta: (PIB *per capita* = maior que US\$12.275); Países de renda média alta (PIB *per capita* = US\$3.976 – US\$12.275); Países de renda média baixa (PIB *per capita* = US\$1.006 - US\$3.975); e Países de baixa renda (PIB *per capita* = menor que US\$1.005).

Em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, é verificada uma baixa cobertura de coleta baixa (Quadro 3-3), devido à fraquezas institucionais e de

governança, recursos financeiros limitados, infraestrutura de coleta e processamento insuficiente, processo de urbanização acelerado e mudanças dos padrões de vida da população (MMEREKI; BALDWIN; LI, 2016; MUNGUÍA-LÓPEZ et al., 2020; ZHANG; WANG, 2020). Por outro lado, em países desenvolvidos, há uma gestão mais adequada, uma maior conscientização ambiental e uma maior disponibilidade de recursos e tecnologias de gerenciamento de RSU (MMEREKI; BALDWIN; LI, 2016; COLVERO *et al.*, 2020).

No geral, a coleta e o transporte de RSU representam a maior parte do custo total do sistema de gerenciamento de RSU, sendo responsáveis por cerca de 60% a 70% dos custos totais de gerenciamento em países em desenvolvimento (DI MARIA; MICALE, 2014; D'ONZA; GRECO; ALLEGRI, 2016; COLVERO *et al.*, 2020). Esse percentual varia de acordo com o nível de renda dos países, segundo Hoornweg e Bhada-tata (2012) e conforme mostra o Quadro 3-4.

Quadro 3-4 – Custos de coleta de RSU em função do nível de renda do países baseado no Produto Interno Bruto (PIB).

Nível de renda do país	Custos da coleta (R\$/t) ¹	Representatividade dos custos da coleta no orçamento municipal
Países de renda alta	481–1415	menos de 10%
Países de renda média alta	226–509	50% a 80%
Países de renda média baixa	170–425	50% a 80%
Países de baixa renda	113–283	90%

Fonte: Adaptado de Memon (2010); Aremu (2013); Srivastava et al. (2015) Hoornweg e Bhada-tata (2012). Países de renda alta: (PIB *per capita* = maior que US\$12.275); Países de renda média alta (PIB *per capita* = US\$3.976 – U\$12.275); Países de renda média baixa (PIB *per capita* = US\$1.006 - US\$3.975); e Países de baixa renda (PIB *per capita* = menor que US\$1.005).

O Quadro 3-4 evidencia a menor eficiência de coleta nos países de baixa renda, conforme esperado, enquanto que em países de alta renda, os menores custos de coleta estão associados aos métodos de coleta que tendem a ser mecanizados, eficientes e frequentes, permitindo que mais recursos sejam destinados para instalações de tratamento de resíduos, por exemplo (MEMON, 2010; AREMU, 2013; SRIVASTAVA *et al.*, 2015).

No Brasil, segundo dados da ABRELPE (2019), os recursos aplicados em 2018 com coleta de RSU eram de R\$ 137,89/t. Dados apresentados no Diagnóstico de Manejo dos Resíduos Sólidos do SNIS (BRASIL, 2018) mostram que no ano de 2017, o custo

¹ US\$1 = R\$5,66 (02/10/2020)

médio de coleta de RSU, que compreendem os resíduos domiciliares e públicos, no Brasil estava em torno de R\$ 162,93/t. Ambas pesquisas constataram ainda, que esses custos também variaram de acordo com as regiões brasileiras, conforme consta no Quadro 3-5.

Quadro 3-5 – Comparação do custos dos serviços de coleta de RSU no Brasil por região.

Regiões	Custos da coleta de RSU (R\$/t) - (ABRELPE, 2019)	Custos da coleta de RSU (R\$/t) - (BRASIL, 2018)
Norte	148,21	109,38
Nordeste	133,91	130,76
Centro-oeste	110,75	101,98
Sudeste	136,06	195,85
Sul	167,48	201,49

Fonte: Construído a partir de ABRELPE (2019) e BRASIL (2018).

No Quadro 3-5 é possível observar que os custos da coleta convencional de RSU no Brasil, de acordo com as duas fontes consultadas, pode variar até R\$ 100/t como é o caso das regiões Centro-oeste e Sul. As pesquisas mostraram ainda que, as regiões Sul e Sudeste apresentaram os maiores custos de coleta. Isso pode ser explicado devido à maior cobertura de coleta nessas regiões.

No município da Serra - ES, segundo dados do SNIS (BRASIL, 2019), no ano de 2018, o custo unitário de coleta de RSU era de R\$ 163,32/t. Em 2019, de acordo com dados do Geobras (2019) esse custo era de R\$ 171,36/t, valor superior ao da média nacional. As diferenças dos custos podem ser explicadas em função da influência de diversos fatores, tais como: características do município, área onde a atividade está sendo realizada, quantidade e qualidade dos resíduos sólidos coletados, densidade demográfica, tipo de serviço prestado, entre outros (ROGRIGUES; MAGALHÃES FILHO; PEREIRA, 2016; BERTANZA; ZILIANI; MENONI, 2018).

Quando o município possui sistemas de coleta seletiva, os custos tendem a ser ainda maiores. Isso ocorre porque os custos de transporte de coleta sofrem influência da densidade dos resíduos, da utilização da capacidade de carga dos veículos e do potencial de compactação dos materiais, sendo que quanto maior a densidade, menor o custo por tonelada e vice versa (DI MARIA; MICALE, 2013). Dessa forma, o transporte dos materiais advindos da coleta convencional, por serem mais densos, são menos dispendiosos do que o da coleta seletiva (VARELLA, 2011).

Ainda assim, a coleta seletiva é vista como ponto de partida necessário para possibilitar o gerenciamento de RSU envolvendo estratégias de recuperação de

materiais e/ou energia, de acordo com os princípios da economia circular, desde que hajam destinações deste tipo economicamente disponíveis (CALABRO; SATIRA, 2020). Outrossim, a coleta seletiva e a reciclagem de resíduos sólidos possibilitam criação de empregos, contribuindo para a sustentabilidade social e ambiental. A partir da coleta seletiva e da reciclagem percebe-se a redução do consumo de recursos naturais, trazendo benefícios para a saúde e segurança pública, ao limitar o uso de métodos de destinação não sustentáveis, tais como os aterros sanitários (D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016; ZHANG et al., 2019).

3.3. COLETA SELETIVA DE RSU

O sistema de coleta seletiva municipal no Brasil é de responsabilidade da administração local e deveria priorizar a participação de OCMRR como forma de inclusão social de pessoas de baixa renda (BESEN *et al.*, 2017). Dados do CEMPRE (2019) apontam que em 2018, 1.227 municípios brasileiros possuíam algum programa de coleta seletiva em operação, correspondendo a 22% dos municípios. A pesquisa estimou ainda que, em 2018 apenas 17% da população era atendida por programas de coleta seletiva (CEMPRE, 2019).

Por outro lado, segundo dados do SNIS (BRASIL, 2019), a partir de uma pesquisa com 3.468 municípios brasileiros, em 2018, cerca de 1.322 municípios possuíam coleta seletiva, correspondendo a 38,1% dos municípios da amostra. A pesquisa estimou ainda que a média geral de população urbana atendida com coleta seletiva porta a porta no Brasil chegou a 37,8% no ano de 2018 (BRASIL, 2019), podendo variar em função da faixa populacional, conforme mostrado no Quadro 3-6.

Quadro 3-6 – Cobertura de coleta seletiva por população urbana atendida, segundo faixa populacional

Faixa populacional	Intervalo da faixa (hab.)	População urbana atendida com coleta seletiva porta a porta (2018)
1	População total ≤ 30 mil	25,1%
2	30 mil < População total ≤ 100 mil	34,4%
3	100 mil < População total ≤ 250 mil	37,6%
4	250 mil < População total ≤ 1 milhão	34,8%
5	1 milhão < População total ≤ 4 milhões	33,3%
6	População total > 4 milhões	67,4%

Fonte: BRASIL (2019)

Conforme observa-se no Quadro 3-6, o percentual de população atendida com coleta seletiva porta a porta no ano de 2018, não sofre muita variação entre as faixas

populacionais 2 e 5, permanecendo entre a mínima de 33,3% até a máxima de 37,6%, das faixas 5 e 3, respectivamente. Esse comportamento poderia demonstrar que quanto maior o município, é mais difícil ter uma abrangência integral da população urbana, não fosse os números da faixa 6, onde o percentual de população atendida com coleta seletiva porta a porta chega a 67,4%. Nessa faixa populacional os dois maiores municípios brasileiros, São Paulo/SP e Rio de Janeiro/RJ e, por esse motivo, há uma elevação no percentual, quebrando a estabilidade observada nas faixas 2 a 5 e contribuindo para elevação da média nacional (BRASIL, 2019).

Diante disso, fica evidente a necessidade de se aumentar a cobertura da coleta seletiva com a finalidade de aumentar o desvio dos resíduos sólidos recicláveis dos aterros sanitários para a reciclagem. Dutra, Yamane e Siman (2020) constataram que, ao aumentar a cobertura de coleta seletiva de 15% para 50%, haveria um crescimento de 233% na quantidade de resíduos sólidos recicláveis que seriam encaminhados para a triagem, corroborando com Simonetto *et al.* (2014) que também previram crescimento de 153% nos recicláveis com o aumento da coleta seletiva.

Com relação aos agentes executores da coleta seletiva municipal, no Brasil tem sido constatado aumento da participação das organizações de catadores de materiais recicláveis nesse serviço nos últimos anos, bem como redução na operacionalização pela própria prefeitura e por empresas particulares. Percebe-se então que a coleta seletiva pode ser executada pela prefeitura municipal ou por terceiros, por meio da contratação de empresas privadas ou a partir de parcerias com as OCMRR (BESEN *et al.*, 2017, SIMAN *et al.*, 2020).

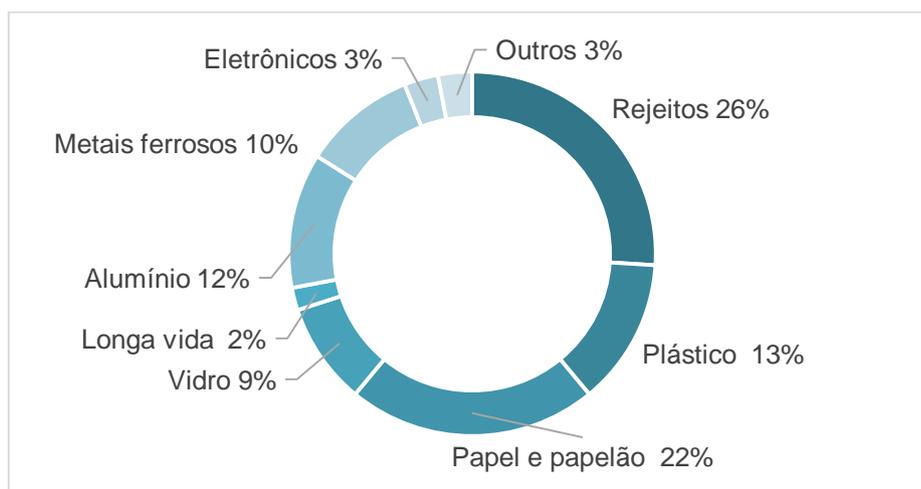
Em 2018, apenas 39% dos serviços de coleta seletiva nos municípios brasileiros foram realizados pelas próprias prefeituras, 36% por empresas particulares, enquanto que 50% foram realizados por OCMRR, ou contando com elas (CEMPRE, 2019). Ressalta-se que esses representam apenas a coleta seletiva formal. Com relação ao setor informal, no qual estão inclusos os catadores isolados, não há dados disponíveis, visto que não são contabilizados. Dessa forma, não é possível quantificar o quanto eles representam na coleta seletiva.

Por outro lado, quando se fala em massa coletada, dados do SNIS para 2018 descreveu que as empresas contratadas foram responsáveis por cerca de 47,7% do total coletado pela coleta seletiva no Brasil, seguido pelo serviço executado pelos catadores com 30,7% e prefeituras com 21,0%. No entanto, é importante ressaltar que

eventualmente pode ocorrer uma “subnotificação” das quantidades coletadas pelas OCMRR, devido às dificuldades operacionais que elas enfrentam, tais como pesagem dos materiais, ausência de controle e registros, entre outras (BRASIL, 2019).

Com relação à composição gravimétrica média dos programas de coleta seletiva do Brasil, a Figura 3-1 apresenta os resultados encontrados por Cempre (2019).

Figura 3-1 – Composição gravimétrica da coleta seletiva no Brasil em 2018



Fonte: Adaptado de CEMPRE (2019)

Conforme observa-se na Figura 3-1, os rejeitos representaram 26% do total dos resíduos coletados por meio de programas de coleta seletiva, considerando além dos resíduos não recicláveis, aqueles materiais que não possuem técnicas viáveis economicamente para serem reciclados. No Espírito Santo, de acordo com estudo realizado em 16 municípios, o índice de rejeito é em média 20,17% (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018).

Em geral, a presença de rejeitos no material entregue a coleta seletiva se dá em função da ineficiente e/ou ausência de separação dos resíduos na fonte geradora (ROUSTA *et al.*, 2015). Quando há pouca adesão da população, ocorre um elevado índice de rejeito no processo, afetando a eficiência dos sistemas de triagem e de recuperação dos materiais recicláveis. Os custos também passam a ser mais elevados para as prefeituras devido à necessidade de coleta, transporte e disposição final dos rejeitos em aterros sanitários (VARELLA, 2011; FERREIRA *et al.*, 2017).

A segregação dos resíduos na fonte, por sua vez, está diretamente ligada à educação ambiental, portanto, quando há uma maior conscientização dos indivíduos, conseqüentemente, há uma maior taxa de separação de resíduos na fonte e o índice

de rejeitos diminui (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016; STRUK, 2017). Nesse sentido, uma Política de Educação Ambiental (PEA) orientada para conscientização sobre a separação dos resíduos sólidos na fonte geradora, é apontada como influenciadora e contribui diretamente para participação da população e, conseqüentemente, para o aumento da quantidade e qualidade dos resíduos secos recicláveis desviados para reciclagem (LAKHAN, 2014; ROUSTA *et al.*, 2015; ARBUÉS; VILLANÚA, 2016; MANNARINO; FERREIRA; GANDOLLA, 2016; BERNARDO; DA SILVA LIMA, 2017; XUE *et al.*, 2019).

A implementação de campanhas de educação ambiental relacionadas à segregação na fonte de coleta seletiva em cidades na Polônia, aumentaram em 1 ano a cobertura de coleta seletiva de 5% para 17% da população (GRODZIŃSKA-JURCZAK *et al.*, 2006). Da mesma forma, uma intervenção nas residências expondo os impactos ambientais da não reciclagem em Xangai, acarretou em um aumento de 12,5% na taxa de reciclagem (DAI *et al.*, 2015). No Brasil, no município de Curitiba, um investimento adicional em uma política pública de educação ambiental aumentou a taxa de reciclagem em 12% do total de resíduos coletados (SILVA, 2018).

No entanto, muitos autores observaram que existe uma lacuna entre a intenção e o comportamento real de separação de resíduos na fonte geradora (ZHANG *et al.*, 2019; CHEN, LEE, 2020; WANG *et al.*, 2020), o que pode acarretar em resistência e dificuldades para a real participação da população. Wang *et al.* (2019) verificaram que apesar da implementação de campanhas educativas apresentar um efeito direto e positivo na intenção de separação de resíduos, esse efeito é relativamente pequeno, em razão da fraca divulgação das informações ou da falta de conteúdo claro e instrutivo. Cudjoe, Yuan e Han (2020) reforçam que quando os residentes percebem que as políticas de coleta seletiva são eficazes, a influência positiva da consciência dos benefícios na intenção de coleta seletiva se torna mais forte e a influência negativa das dificuldades percebidas na intenção de coleta seletiva se torna mais fraca.

Como consequência do aumento da participação da população e do aumento da coleta seletiva, diversos benefícios são identificados, tais como o aumento do desvio de resíduos dos aterros sanitários para reciclagem (SIMAN *et al.*, 2020). Ademais, também pode ser verificado um melhor desenvolvimento local ao estruturar a cadeia de valor para benefício socioeconômico, por meio da geração de trabalho e renda,

além de ganhos ambientais, por meio da redução da extração de novas matérias primas (SILVA, 2018).

A falta de instalações e equipamentos adequados também se mostra como uma barreira para separação dos resíduos sólidos (BABAZADEH *et al.*, 2018). Estudos relatam que a disponibilidade de infraestrutura adequada, facilidade no acesso ao serviço de coleta seletiva (BABAEI *et al.*, 2015; XU *et al.*, 2017) são fatores promissores para programas de coleta seletiva eficazes e contribuem para uma maior adesão da população. O mesmo ocorre com a promoção de incentivos financeiros ou cobranças de multas (BOONROD *et al.*, 2015; XU; LING; WU, 2018).

Cada município pode escolher a estratégia de coleta seletiva a ser implementada, que envolve a escolha da modalidade e do agente executor responsável pela coleta. Dentre as diversas modalidades existentes, destaca-se a coleta porta a porta e a coleta ponto a ponto que compreendem os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) ou Locais de Entrega Voluntária (LEVs). Além disso, uma combinação das modalidades de coleta seletiva pode ser realizada em um mesmo município, por exemplo, na modalidade de coleta mista, os materiais são coletados porta-a-porta e concentrados em um ponto estratégico, onde é realizado a coleta ponto a ponto (VARELLA, 2011; DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018).

Nas modalidades de coleta seletiva ponto a ponto, em PEVs ou LEVs, os próprios geradores deslocam-se até um ponto e/ou local estratégico de entrega e depositam o material reciclável em contêineres instalados em diversos pontos das cidades (PANIS *et al.*, 2012). Essa modalidade minimiza o custo logístico e facilita o carregamento dos veículos, pois os materiais ficam concentrados em pontos estratégicos (BESEN *et al.*, 2017). Contudo, podem aumentar as emissões ambientais, se considerarmos as emissões daqueles que enviam seus resíduos aos PEVs.

Outras vantagens da coleta seletiva em PEVs envolvem a redução do trajeto e acúmulo de carga, além de demandar uma equipe menor, uma vez que a população realiza parte do serviço levando os resíduos recicláveis até os PEVs. Além do fator custo, a coleta seletiva na modalidade PEV pode despertar no cidadão aspectos de cidadania, pois exige a participação ativa da população. Em contrapartida, depende da mobilização da população e demanda rigor no transbordo dos PEVs para evitar que os contêineres extravasem (BESEN *et al.*, 2017).

Na modalidade de coleta seletiva porta-a-porta, por sua vez, veículos apropriados recolhem os resíduos recicláveis nos logradouros públicos ou ainda na fonte geradora. Esse sistema traz maior comodidade à população e garante maior cobertura da coleta. Entretanto, possui um custo logístico elevado em função da necessidade do aumento da frota de caminhões e maior consumo de combustíveis e materiais (DI MARIA, MICALE, 2013; DI MARIA, MICALE, 2014; FREITAS; FONSECA, 2012; BESEN *et al.*, 2017).

Com relação a qualidade do material coletado, em um estudo realizado em cidades da Itália, Bertanza, Ziliani e Menoni (2018) descreveram que enquanto a coleta porta-a-porta gera 36,0% de rejeitos, aquela feita exclusivamente por PEV esse valor pode alcançar 62,1% de rejeitos. Em cidades onde a coleta utiliza a combinação das duas modalidades os rejeitos são reduzidos para 41,7% do total coletado. No entanto, com a implantação de programa de educação ambiental e maior acessibilidade do PEV, Rousta *et al.* (2015) perceberam na cidade de Borås/Suécia uma diminuição de rejeitos de 55% para 39% em apenas dois anos.

Com relação ao custo médio da coleta seletiva no Brasil, no ano de 2018 percebeu-se aplicação valores da ordem de R\$ 442,24/t, cerca de 4,6 maior do que o de coleta convencional que, na mesma época foi de apenas R\$ 95,00/t (CEMPRE, 2018). Entretanto, Magalhães (2020) ao realizar uma análise por faixa de população, constatou que a proporção entre o custo do serviço de coleta seletiva e o custo do serviço de coleta convencional pode chegar a ser até 12 vezes maior para municípios com até 30.000 habitantes. Zon *et al.* (2020) verificaram no Espírito Santo/ES custos da coleta seletiva da ordem de 200% maior em relação aos da coleta convencional, com valores do segundo da ordem de R\$ 500/t.

O fato do custo da coleta seletiva ser mais alto pode ser explicado por diversos aspectos, tais como aumento no número de rotas de coleta, aumento do número de veículos apropriados, contêineres, mão de obra, combustível, taxa de compactação dos veículos de coleta, densidade dos resíduos e utilização da capacidade de carga do veículo (DI MARIA; MICALE, 2013; TEIXEIRA *et al.*, 2014).

A existência do setor privado na operação dos serviços de gerenciamento dos resíduos sólidos tende a trazer uma redução nos custos totais de cerca de 11%, conforme relatado por Chifari *et al.* (2017). No entanto, as empresas privadas são,

geralmente, remuneradas de acordo com o peso e volume dos resíduos coletados, independentemente da quantidade ou qualidade (RUTKWOSKI; RUTKWOSKI, 2015). Dessa forma, sob a ótica das empresas privadas, esse tipo de contratação passa a ser percebido como incentivo contrário à redução de resíduos na fonte. Logo, embora seja considerado um mecanismo mais simples para o poder público, a contratação de empresas privadas pode dificultar a implementação de programas de coleta seletiva (SILVA, 2017).

A contratação de OCMRR se mostra menos dispendiosa do que quando é realizada pelas próprias administrações públicas municipais e pelas empresas terceirizadas (VARELLA, 2011), além de apresentarem os menores índices de rejeito (DE MATOS *et al.*, 2010). Ao incluir as OCMRR na coleta seletiva, Rutkowski e Rutkowski (2015) verificaram, na cidade de Londrina – PR, um aumento no total de toneladas de recicláveis a um custo de R\$ 198,24/t² de recicláveis coletados no ano de 2012, enquanto que no mesmo ano em Belo Horizonte – MG, foi coletada uma quantidade menor de recicláveis por uma empresa terceirizada a um custo de R\$ 1.104,46/t¹.

Ferronato *et al.* (2020), por sua vez, constataram que além de reduzir os gastos em cerca de 10%, a inclusão de catadores propiciou o aumento no índice de reciclagem em cerca de 3,5%. Da mesma forma, com a inclusão de OCMRR na coleta seletiva juntamente com apoio financeiro e técnico oferecido pela prefeitura, na cidade de Canoas – RS, verificou-se um crescimento da coleta seletiva de 6 para 13 toneladas diárias, que equivale a um crescimento de 2,3% para 4,8% sobre o total de RSU coletados no município (GODECKE *et al.*, 2012).

Diante desse contexto, verifica-se que em detrimento do aumento dos resíduos recicláveis desviados do aterro sanitário e conseqüente diminuição dos custos com disposição final (ZHANG *et al.*, 2019; ZON *et al.*, 2020), os custos de coleta seletiva são aumentados. Um aumento na intensidade da coleta seletiva com segregação na fonte geradora de 13% para 68%, aumentariam os custos de coleta seletiva em 44% (MAALOUF; DI MARIA; EL-FADEL, 2020). Da mesma forma, um aumento na intensidade de segregação de 25% para 48% em uma cidade italiana caracterizada por alta densidade populacional, aumentaram os custos gerais de coleta seletiva em 75% (DI MARIA; MICALE, 2013).

² US\$1 = R\$5,66 (02/10/2020)

Devido a questão dos altos custos de coleta seletiva (D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016), ainda existe uma resistência à sua implementação. Tal constatação revela que os gestores municipais priorizam o motivo contábil à curto prazo na tomada de decisões acerca do tema, principalmente nos países em desenvolvimento. Essa prática acaba por dificultar a implementação de um sistema de gerenciamento de resíduos potencialmente benéfico para toda cadeia produtiva, que começa na coleta seletiva e se confirma na reciclagem (RIBEIRO *et al.*, 2014).

O tópico a seguir abordará as principais destinações final dos RSU, após serem coletados por meio da coleta convencional ou coleta seletiva, seguindo para a reciclagem ou disposição final dos rejeitos em aterros sanitários

3.4. DESTINAÇÃO DE RSU: RECICLAGEM E DISPOSIÇÃO FINAL DE REJEITOS EM ATERROS SANITÁRIOS

A reciclagem dos resíduos sólidos urbanos tem efeitos positivos na sustentabilidade social e ambiental, visto que possibilita a redução do consumo de recursos naturais, além de limitar o uso de métodos de destinação menos sustentáveis, como os aterros sanitários (D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016; KO *et al.*, 2020). Em conjunto com a redução da geração dos resíduos, o aumento dos resíduos reciclados é uma etapa importante em direção à economia circular (SOUKIAZIS; PROENÇA, 2020) e requer a participação ativa da população na etapa de separação dos resíduos na fonte geradora (IBRAHIM, 2020; KNICKMEYER, 2020).

No geral, as estratégias de gestão de resíduos são orientadas para desviar os resíduos dos aterros sanitários para reciclagem, em consequência dos objetivos ambiciosos das legislações vigentes (DRI *et al.*, 2018). A Diretiva Europeia 2018/851 relativa ao gerenciamento de resíduos sólidos naquela região estabeleceu como meta de reutilização e reciclagem de RSU de, no mínimo, 55% do total de resíduos gerados até o ano de 2025, aumentando para 60% até 2030 e 65% até 2035 (UE, 2018).

Em consequência, Portugal descreveu em seu Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Municipais, PERSU 2020+, não só as metas da Diretiva 2018/851, como também estabeleceu que até 2035, somente poderão ser depositados em aterros sanitários até 10% dos RSU que não puderam ser valorizados (APA; 2019). No Brasil, para o Estado do Espírito Santo, o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES) também estabeleceu diretrizes e metas para um horizonte de

implementação de 20 anos a partir de 2020, compatíveis com a realidade do Estado. Uma das metas é a redução de resíduos recicláveis secos dispostos em aterros em 50% entre 16 e 20 anos (ESPÍRITO SANTO, 2019).

Nesse sentido, percebe-se com as políticas nacionais brasileiras e europeias intenções na redução da disposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários (DRI *et al.*, 2018). Em 2012, nos 28 Estados-Membros da UE, apenas cerca de 34% de todos os resíduos foram enviados para aterros sanitários (BRENNAN *et al.*, 2016). Em 2014, esse percentual reduziu para 28% dos resíduos (POMBERGER; SARC; LORBER, 2017). Já no ano de 2017, na Europa, cerca de 23% do total de RSU foi depositado em aterro sanitário (SAUVE; ACKER, 2020). Em contrapartida, países como Romênia, Grécia, Malta, Eslováquia e Croácia, apresentaram em 2014 taxas de aterramento superiores a 60% (POMBERGER; SARC; LORBER, 2017). No Brasil, em 2018, cerca de 59,2% do total de toneladas de resíduos gerados foram dispostos em aterros sanitários (ABRELPE, 2019).

Os números apresentados para a Comunidade Europeia foram alcançados em função de que, países desenvolvidos implementam sistemas eficazes de gestão de resíduos, a partir da forte capacidade institucional, participação dos indivíduos na separação de resíduos na fonte geradora e investimento governamental em tecnologias inovadoras de processamento e tratamento (CHEN; LEE, 2020). Ao contrário de países em desenvolvimento e menos desenvolvidos, que além das diferenças socioeconômicas, enfrentam dificuldades financeiras, falta de tecnologias de gerenciamento, capacidade inadequada das estruturas institucionais, barreiras para separação de resíduos na fonte gerada, entre outros (MMEREKI; BALDWIN; LI, 2016; SAUVE; ACKER, 2020)

A literatura relata que a separação dos resíduos na fonte geradora é vista como uma solução para o aumento de resíduos recicláveis e para a diminuição da quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016; ZHANG; WANG, 2020). Sukholthaman e Sharp (2016) constataram que, em um cenário onde a participação populacional aumentaria para 40% e para 80%, haveria uma diminuição na disposição de resíduos em aterros sanitários em 2% e 3%, respectivamente.

Um aumento do percentual de coleta seletiva para 15%, com investimentos em educação ambiental, reduziram a quantidade de resíduos enviados para aterro sanitários em 2,26% (PINHA; SAWAGA, 2020). No entanto, embora o aumento da coleta seletiva diminua a demanda total de aterros sanitários, a demanda por

instalações de tratamento de resíduos úmidos, tais como alimentares, aumentariam (XIAO *et al.*, 2020).

Além da participação da população, as atividades de reciclagem são impulsionadas por diversos outros fatores, tais como programas eficientes de coleta seletiva, infraestrutura, economia de mercado, eficiência das OCMRR para triarem os materiais recicláveis, existência de mercados consumidores locais, demanda por matérias-primas secundárias, ou seja, materiais recicláveis e valor das matérias-primas primárias (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018), uma vez que os mercados locais de reciclagem são afetados pelos preços de mercado local e global das matérias-primas (ZAMAN, 2016).

Estudos mostram que, do total de toneladas de RSU geradas, cerca de 30% a 40% são relativos a resíduos recicláveis (SILVA, 2017; DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; ZHANG *et al.*, 2019). Entretanto, globalmente apenas cerca de 15% dos resíduos são reciclados, sendo a maior parte depositada em aterros sanitários, especialmente em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento, conforme já exposto (ZAMAN, 2016).

Da Silva *et al.* (2017), ao analisarem a reciclagem no Brasil antes e após a promulgação da PNRS, verificaram que a taxa de reciclagem média entre as capitais brasileiras aumentou de 2008 a 2014 de 0,7% a 1,6% do resíduo coletado, mas esse percentual ainda é muito baixo do esperado. No Espírito Santo, em estudo realizado em 24 municípios, o indicador de taxa de reciclagem apresentou resultados “muito desfavoráveis” para 67% dos municípios estudados, comprovando que a grande quantidade de resíduos recicláveis ainda são aterrados (ZON *et al.*, 2020).

Apesar dos esforços direcionados à reciclagem, em muitos locais, a opção de disposição final nos aterros sanitários ainda é muito utilizada, principalmente devido ao seu custo reduzido (PAES *et al.*, 2020; YOUSEFLOO; BABAZADEH, 2020). Na Bolívia, o custo de disposição final para o aterro sanitário no ano de 2018 era de cerca de R\$ 82,04/t³. No Brasil, esse custo no ano de 2019 era de R\$ 72,65/t no município de Vitória/ES e de R\$ 67,99/t no município da Serra/ES (GEOBRAS, 2019).

³ US\$1 = R\$5,66 (02/10/2020)

Quando se maximiza o percentual de resíduos secos e recicláveis coletados, há um aumento nos custos de gerenciamento de RSU, mas é verificada uma redução na quantidade descartada em aterros sanitários, reduzindo os custos dessa atividade (SILVA, 2018; PINHA; SAWAGA, 2020). Um aumento da coleta seletiva de 3,4% para 70% em detrimento da disposição final em aterros sanitários, aumentariam os custos operacionais em 70%. Entretanto, custos de externalidades (uso de recursos naturais e poluição) reduziram em aproximadamente 52% (PAES *et al.*, 2020).

Uma vez discutidos os aspectos relacionados aos elos de gerenciamento de RSU, evidenciando suas formas de execução, influência da educação ambiental, suas produtividades e custos, o próximo tópico apresentará a dinâmica de sistemas, que consiste em uma metodologia para analisar sistemas complexos, tais como o de gerenciamento de RSU, ao longo do tempo.

3.5. DINÂMICA DE SISTEMAS

A dinâmica de sistema é uma metodologia eficaz para analisar sistemas complexos e dinâmicos ao permitir a integração dos subsistemas e as partes em um todo, permitindo uma melhor compreensão da estrutura e dos principais determinantes do comportamento do sistema e apresentando o seu comportamento dinâmico a partir da simulação (SUKHOLTHAMAN, SHARP, 2016). Dessa forma, essa metodologia é adequada para simular o sistema de gerenciamento de RSU e avaliar os impactos das diferentes políticas (DI NOLA; ESCAPA; ANSAH, 2018; XIAO *et al.*, 2020).

Em dinâmica de sistemas é possível representar um sistema por meio de duas formas de modelagem: a *soft* (ou qualitativa) e a *hard* (ou quantitativa) (KUNC, 2017). A abordagem *soft* permite a visualização do sistema por meio de suas características estruturais, das relações causa e efeito e estruturas de *feedback* presentes no modelo, enquanto a abordagem *hard* consiste em simulações a partir dos diagramas de estoque e fluxo. As duas abordagens são realizadas em conjunto para a representação de um modelo que seja próximo à realidade da dinâmica do sistema (DE SOUZA, 2012).

O processo de modelagem compreende diversas etapas por meio das quais constrói-se o modelo dinâmico que representa o problema real. Espinoza *et al.* (2017) abordam as seguintes etapas do processo de modelagem: Articulação do problema e conceituação; Formulação da hipótese dinâmica; Testes e análises.

O problema deve ser claramente definido a partir de dados e informações. Para estruturar o sistema dinâmico, o problema deve ser definido em um horizonte de tempo apropriado e devem ser definidas as variáveis e conceitos importantes para que o modelo se comporte o mais próximo de um modelo real, com uma delimitação do sistema, conforme seu objetivo. Em seguida, é necessário realizar a conceituação do sistema, que tem o objetivo principal de formular uma hipótese dinâmica (STERMAN, 2000).

Sterman (2000) define a hipótese dinâmica como uma teoria de como o problema surgiu e à medida com que se aprende com o processo de modelagem, a hipótese pode ser revisada. A partir da hipótese dinâmica, utilizam-se ferramentas para representar e mapear a estrutura causal do sistema. Para isso, deverão ser desenvolvidos os diagramas de causa e efeito e os diagramas de estoque e fluxo, os quais são abordados nos tópicos subsequentes.

3.5.1. Diagrama de causa e efeito

O Diagrama de Causa e Efeito (DCE) ou diagrama causal é uma ferramenta da dinâmica de sistemas utilizada para descrever uma situação-problema evidenciando de forma qualitativa as relações de causa e efeito entre as variáveis, ou seja, representam a estrutura de *feedback* dos sistemas (STERMAN, 2000). Essa ferramenta permite que os modeladores generalizem os dados relacionados ao fenômeno sob investigação (FAN *et al.*, 2018).

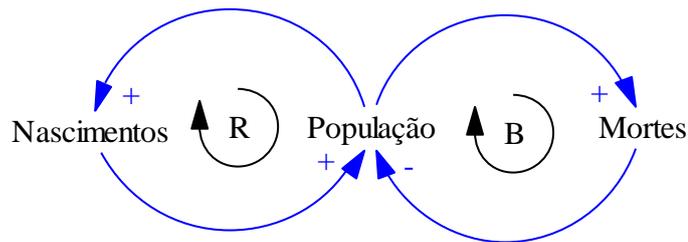
As relações causais entre as variáveis no DCE são representadas por setas e cada ligação causal recebe uma polaridade, negativa (-) ou positiva (+), que indica como a variável dependente muda com a alteração da variável independente. Uma ligação positiva significa que, se a causa aumenta o efeito também aumenta, e se a causa diminui o efeito também diminui, ou seja, possui relação diretamente proporcional. Por outro lado, uma ligação negativa possui um efeito inversamente proporcional, logo se a causa aumenta, o efeito diminui e se a causa diminui, o efeito aumenta (STERMAN, 2000; FORRESTER, 1968).

A partir dos diagramas de causa e efeito são gerados os ciclos de *feedback* ou ciclos de realimentação, os quais podem assumir condição de balanço (B) ou de reforço (R). Quando o ciclo é de balanço, o seu efeito é neutralizar o sistema, ou seja, há tendência de estabilidade/equilíbrio. Em contrapartida, ciclos de reforço tendem ao crescimento

ou decrescimento, ou seja, ocorre uma amplificação ou reforço da condição inicial (MORECROFT, 2015).

A Figura 3-2 mostra um exemplo de um diagrama de causa e efeito e suas notações onde foram representados um ciclo de realimentação positivo (reforço) e um negativo (balanço).

Figura 3-2 - Exemplo de diagrama de causa e efeito



Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

Observa-se na Figura 3-2 que, no ciclo positivo, as variáveis população e nascimentos são submetidas à amplificação da sua condição inicial, ou seja, quanto maior a população maior o número de nascimentos ou quanto menor a população menor o número de nascimentos. No entanto, no ciclo negativo as variáveis população e mortes tendem ao equilíbrio do sistema. Dessa forma, um aumento da população implica em aumento das mortes que, por sua vez, reduz a população.

Algumas relações nos sistemas possuem *delay* ou atrasos e esses também podem ser exibidos graficamente. O “*delay*” é representado por dois traços e mostra que existe uma defasagem entre a causa e o efeito (MORECROFT, 2015). Segundo Sterman (2000), os atrasos podem ser físicos de materiais, nos casos em que ocorre a partir de um processo de transformação ou podem ser atrasos de informação, nos casos em que se baseia em crenças e percepções sobre determinada mudança e representam a chegada de uma nova informação.

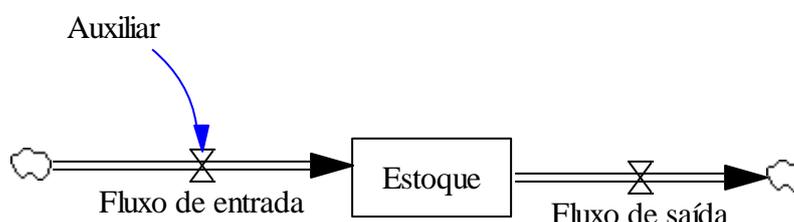
O DCE é uma ferramenta eficaz para identificar os *feedbacks*, contudo, não são capazes de capturar a estrutura de estoque e fluxo dos sistemas e não são suficientes como base para um modelo de simulação. Portanto, é necessário converter esses ciclos de realimentação em um modelo dinâmico de simulação, os diagramas de estoque e fluxo (MORECROFT, 2015).

3.5.2. Diagrama de estoque e fluxo

Os diagramas de estoque e fluxo (DEF) são representações quantitativas das relações de causa e efeito da situação problema, por meio de equações matemáticas. Os DEF são elementos-chave de um modelo dinâmico, visto que eles representam a estrutura física do sistema e rastreiam as acumulações que se movem através dele (DI NOLA; ESCAPA; ANSAH, 2018).

A estrutura geral dos DEF é composta basicamente por estoques, fluxos, auxiliares e conectores (MORECROFT, 2015). A Figura 3-3 representa os componentes do DEF. Os estoques são representados por retângulos e os fluxos de entrada e saída são representados por setas que adicionam ou subtraem do estoque. As válvulas sob as setas controlam os fluxos e as nuvens representam as fontes nas quais os fluxos são originados fora do limite do modelo e para as quais os fluxos saem do dreno do limite do modelo (STERMAN, 2000).

Figura 3-3 - Componentes do diagrama de estoque e fluxo



Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

Os estoques caracterizam o estado do sistema, gerando informações nas quais se baseiam as decisões (STERMAN, 2000). Neles ocorre uma acumulação decorrente da diferença entre os fluxos de entrada e os fluxos de saída, conforme mostrado na Figura 3-3. Os fluxos representam o transporte dos recursos dentro do sistema e são controladas por equações (FIGUEIREDO, 2009).

Em termos matemáticos, o estoque pode ser representado por meio de uma equação integral (DI NOLA; ESCAPA; ANSAH, 2018). Sterman (2000) descreve matematicamente a fórmula geral de estoque e fluxo, onde a quantidade de estoque calculada a partir de uma equação integral da diferença entre o fluxo de entrada e o

fluxo de saída em um determinado tempo t , somado ao estoque inicial, conforme representado na Equação 1.

$$\text{Estoque}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Fluxo de entrada}(s) - \text{Fluxo de saída}(s)] ds + \text{Estoque}(t_0) \quad (\text{Eq. 1})$$

As variáveis auxiliares representam os parâmetros usados no sistema e definem as equações de fluxo combinando, por meio de equações algébricas, os fluxos, estoque e outros auxiliares, podendo em alguns casos assumir valores constantes, que são parâmetros externos de entrada no modelo. Por fim, os conectores ou setas ligam os elementos do sistema e representam as inter-relações entre eles.

A solução da fase quantitativa do modelo de dinâmicas de sistemas é realizada por meio de integração numérica, visto que são formados por sistemas de equações diferenciais ordinárias não lineares. Conforme descrito anteriormente, os estoques acumulam (integram) suas entradas menos suas saídas. A condição inicial do estoque fornece a quantidade em estoque no período de tempo inicial da simulação. A quantidade em estoque no período seguinte será a quantidade em estoque atual mais a quantidade que flui, ou seja, o que entra menos o que sai durante o intervalo de tempo, conforme Equação 2 (STERMAN, 2000).

$$S_{t+dt} = S_t + (E_t - S_t) \times dt \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde, para um instante de tempo t , S_t representa o estoque, E_t representa o fluxo de entrada e S_t o fluxo de saída. Essa é a técnica mais básica, conhecida como integração de Euler (STERMAN, 2000). A suposição de que as taxas permanecem constantes durante o intervalo de tempo dt é razoável se a dinâmica do sistema for suficientemente lenta e o dt for pequeno o suficiente. É importante ressaltar que as definições de “razoável” e “suficientemente pequeno” dependem da precisão desejada, a qual depende a finalidade do modelo. A medida que o tempo (*time step* ou dt) diminui, a precisão da aproximação de Euler aumenta. No limite, quando dt se torna um momento infinitesimal de tempo, a Equação 2 se reduz à equação diferencial exata de tempo contínuo, conforme mostra a Equação 3 (STERMAN, 2000):

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{S_{t+dt} - S_t}{dt} = \frac{dS}{dt} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os pacotes de *software* para a dinâmica de sistemas, como Dynamo, iThink, Powersim e Vensim, usam a integração de Euler como seu método de simulação padrão. No entanto, existem alguns sistemas e alguns propósitos de modelo onde a

integração de Euler não é adequada, porque os erros são muito grandes, ou seja, a diferença nos resultados das simulações são significativas e, para isso existem outras técnicas de integração numérica, como o método Runge-Kutta (STERMAN, 2000). Enquanto o método de Euler assume que as taxas no tempo t permanecem constantes durante todo o intervalo $t + dt$, o método de Runge-kutta encontra uma melhor aproximação da taxa medica entre t e $t + dt$ (STERMAN, 2000).

Para a simulação dos modelos de dinâmica de sistemas existem diversos *softwares*. Em geral, a maioria das simulações de modelos de dinâmica de sistemas se baseiam no uso dos *softwares* Vensim e Stella®, ambos permitindo o manuseio dos mecanismos de dinâmica do sistema com pequenas complicações (DYSON; CHANG, 2005). São reportados estudos que desenvolveram modelos de dinâmica de sistemas para tratar do gerenciamento dos resíduos sólidos utilizando o *software* Vensim (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016; GIANNIS *et al.*, 2017; DI NOLA; ESCAPA; ANSAH, 2018). Também foram verificados estudos que utilizaram o *software* Stella (KOLLIKATHARA; FENG; YU, 2010; TAM; LI; CAI, 2014) e em menor escala, estudos que utilizaram outros sistemas de modelagem, como o PowerSim (GEORGIADIS, 2013) e o *iThink* (YUN *et al.*, 2012).

3.5.3. Testes de verificação em Dinâmica de Sistemas

Como abordado, o modelo de simulação em dinâmica de sistemas é uma representação abstrata do sistema real. Dessa forma, é necessária a realização de testes para verificar se há correspondência entre o sistema real e o modelo proposto, afim de minimizar erros. O Quadro 3-7 descreve os doze testes propostos por Sterman (2000). O propósito dos testes e as principais ferramentas e procedimentos utilizados em cada um deles também são apresentados.

Quadro 3-7 - Testes para verificação do modelo de simulação em dinâmica de sistemas.

Teste	Propósito do teste
1. Adequação do limite	Avaliar a adequação do limite do modelo e identificar os conceitos corretos para o problema em questão.
2. Avaliação da estrutura	Verificar se a estrutura do modelo é consistente com o conhecimento descritivo do sistema, se o nível de agregação é adequado e se o modelo está em conformidade com as leis físicas básicas.
3. Consistência dimensional	Verificar se as equações possuem consistência dimensional e se possuem significado real.
4. Avaliação de parâmetros	Verificar a consistência dos valores dos parâmetros com o conhecimento descritivo e numérico do sistema. Verificar se todos os parâmetros possuem significado real.
5. Condições extremas	Verificar se as equações fazem sentido mesmo quando suas entradas assumem valores extremos

Quadro 3-7 - Testes para verificação do modelo de simulação em dinâmica de sistemas.

Teste	Propósito do teste
6. Erro de integração	Verificar se os resultados do modelo são sensíveis às variações do tempo ou do método de integração numérica.
7. Reprodução de comportamento	Verificar se o modelo reproduz o comportamento de interesse no sistema (qualitativa e quantitativamente).
8. Anomalia comportamental	Verificar se as suposições do modelo alteradas ou excluídas resultam em comportamentos anômalos.
9. Membro da família	Verificar se o comportamento pode gerar o comportamento esperado em outras instâncias do mesmo sistema.
10. Comportamento surpresa	Verificar se o modelo gera algum comportamento não observado ou não conhecido previamente.
11. Análise de sensibilidade	Verificar se os parâmetros possuem mudanças significativas para sensibilidade numérica, comportamental e de políticas.
12. Melhoria do sistema	Verificar se o processo de modelagem ajuda a melhorar o sistema.

Fonte: Construído a partir de Sterman (2000)

No entanto, nem todos os testes apresentados no Quadro 3-7 são aplicáveis. Nesse sentido, Zagonel e Corbet (2006) realizaram uma revisão da literatura referente à base científica e à amplitude da prática de modelagem em dinâmica de sistemas a fim de categorizar os testes e facilitar a identificação do melhor subconjunto de testes mais apropriado para cada modelo. O resultado foi um reagrupamento dos testes em cinco categorias: (1) mapeamento do sistema; (2) modelagem quantitativa; (3) teste de hipóteses; (4) análise de incertezas; e (5) previsão/otimização.

O mapeamento do sistema é definido como qualitativo e indutivo, e envolve o desenho de diagramas de causa e efeito, diagramas de estoque e fluxo ou qualquer forma de mapeamento dos elementos que formam um sistema, tendo como finalidade identificar as principais interações causais (ZAGONEL; CORBET, 2006). Esse mapeamento serve como um resumo visual de uma discussão verbal ou escrita mais longa. Ao ser construído coletivamente, reflete uma soma compartilhada de perspectivas sobre o assunto em questões, gerando informações dinâmicas preliminares que facilitam o esclarecimento de suposições e, portanto, podem ajudar na comunicação (ZAGONEL; CORBET, 2006).

A modelagem quantitativa é caracterizada como quantitativa e descritiva, compreende formulação e simulação. É focada no entendimento das estruturas de estoque e fluxo e nos efeitos dos atrasos. Aplica-se muito bem na representação de sistemas quantificáveis (físicos, financeiros ou outros). A modelagem de testes de hipóteses, ao contrário dos testes focados no sistema, é focada no problema e requer uma hipótese declarada que explique o comportamento dinâmico da estrutura causal do

sistema (ZAGONEL; CORBET, 2006). A modelagem quantitativa somente começa quando a hipótese é declarada e as simulações são realizadas quando as expectativas comportamentais são explicitadas, servindo como teste para essas hipóteses (STERMAN, 2000)

A análise de incertezas é caracterizada como quantitativa e exploratória. Em dinâmica de sistemas é muitas vezes denominada análise de sensibilidade, pois requer examinar a sensibilidade comportamental e quantitativa do modelo, demonstrando que os comportamentos das variáveis de interesse não mudam significativamente se os parâmetros são variados dentro de intervalos razoáveis ou ainda se mudanças justificáveis nos limites do modelo são realizadas (ZAGONEL; CORBET, 2006).

Por fim, a previsão e otimização se refere à previsão de padrões futuros de comportamento, mudanças nesses padrões e previsão de eventos. Entretanto, isso não se enquadra como foco principal da dinâmica de sistemas em aprender, entender e explicar os comportamentos dos sistemas. Assim, a previsão quantitativa é raramente um objetivo na prática de dinâmica de sistemas, sendo vista como uma extensão em que os parâmetros são alterados em intervalos razoáveis, para examinar os resultados possíveis de uma variável em um determinado momento (ZAGONEL; CORBET, 2006). Diante disso, constata-se que para cada categoria de modelagem, existe um conjunto de testes mais apropriados a serem realizados para a confiabilidade do modelo. O Quadro 3-8 resume os 24 testes propostos por Forrester e Senge (1980) e Sterman (2000) agrupados nas 5 categorias sugeridas por Zagonel e Corbet (2006).

Quadro 3-8 – Agrupamento dos testes de confiabilidade conforme as categorias de modelagem.

MAPEAMENTO DO SISTEMA	Validação visual (avaliação estrutural por dedução); Validação das regras de decisão (foco estrutural).
MODELAGEM QUANTITATIVA	Conservação física; Consistência dimensional; Erro de integração; Teste de condições extremas; Avaliação de parâmetros; Reprodução de comportamentos básicos; Teste endógeno de reprodução comportamental; Teste de adequação de limites (modos de comportamento).
TESTE DE HIPÓTESES	Teste qualitativo de comportamento-problema; Adequação de limites (problema de endogeneidade); Validade das regras de decisão (foco da política); Avaliação de comportamentos inesperados; Análise de sensibilidade do comportamento; Teste de condições extremas (foco no comportamento do modelo); Testes de anomalia de comportamento (testes de suposições alteradas); Membro da família (generalização).
ANÁLISE DE INCERTEZAS	Análise de sensibilidade quantitativa; Análise de sensibilidade das políticas; Adequação de limites (implicações políticas).
PREVISÃO E OTIMIZAÇÃO	Correspondência de comportamento; Previsão de comportamento; Previsão de comportamento alterado.

Fonte: Adaptado de Zagonel e Corbet (2006)

4. METODOLOGIA

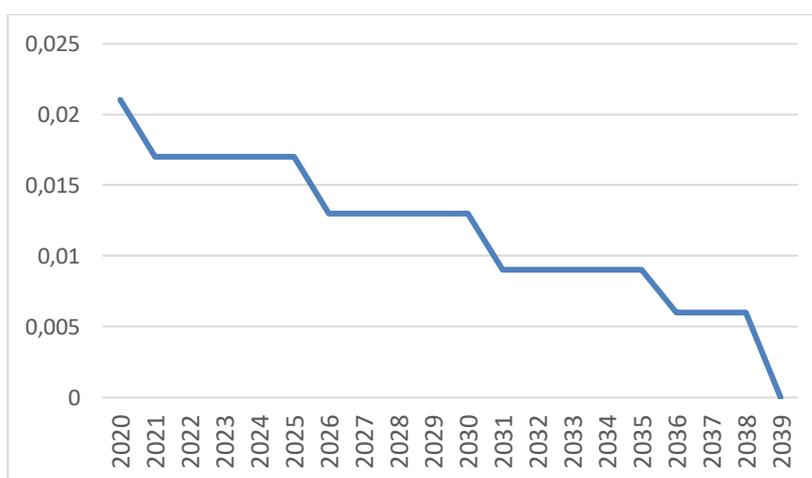
Nesta seção será apresentada a área de estudo dessa pesquisa, assim como o procedimento experimental utilizado para realizá-la.

4.1. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ÁREA DE ESTUDO

Essa pesquisa está inserida na linha de pesquisa em Gerenciamento de Resíduos Sólidos do Mestrado Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES/UFES) que é desenvolvida pelo Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (Lagesa), o qual possui parcerias e projetos de extensão com entes públicos e privados, possibilitando o desenvolvimento de diversas pesquisas e proporcionando uma estrutura de dados e referências ao longo dos anos.

Para definição e análise de cenários do modelo de dinâmica de sistemas proposto nesta pesquisa, foi escolhido como objeto de estudo de caso o município da Serra. O município está localizado no Estado do Espírito Santo, na região Sudeste do Brasil e possuía uma população estimada de 517.510 habitantes distribuídos em uma área de 547,631 km² em 2019 (IBGE, 2019). Esse município faz parte da região metropolitana e é o município mais populoso do Estado. A taxa geométrica de crescimento populacional para o município da Serra/ES entre os anos de 2020 e 2039 pode ser verificada na Figura 4-1.

Figura 4-1 - Taxa geométrica de crescimento populacional do município da Serra para o período 2020-2039.



Fonte: Elaborado a partir de Brasil; Castiglioni e Felipe (2018).

É possível notar que, ao longo dos 20 anos, a taxa geométrica de crescimento populacional do município da Serra – ES assume valores decrescentes (Figura 4-1), ou seja, a população passa a crescer em um ritmo mais lento ao longo dos anos, saindo de uma taxa de 0,021 em 2020 para uma taxa de 0,006 em 2039.

A escolha desse município se deu devido à facilidade de obtenção de dados necessários para simulação dos cenários propostos em estudos realizados no Espírito Santo e que abrangem o município da Serra, tais como o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2019) e o projeto “Fortalecimento dos Catadores de Materiais Recicláveis do Estado do Espírito Santo” realizado pelo Instituto Sindimicro-ES em parceria com o Lagesa (ADERES, 2017).

Com relação à geração de resíduos sólidos, a taxa de geração de resíduos domiciliares *per capita* dos municípios do ES com população entre 250.001 a 1.000.000 de habitantes, de acordo com dados do PERS-ES, é igual a 0,33 t/hab/ano. Desta forma, estima-se que a geração total de RDO no município da Serra/ES foi de 170.778 toneladas de resíduos no mesmo ano.

No ano de 2017, a quantidade de resíduos coletada pela coleta seletiva no município foi de 1.209,56 toneladas, sendo 906,70 toneladas advindos da coleta seletiva mista, 168,42 toneladas de PEVs e 134,44 toneladas da porta a porta (ADERES, 2017). Considerando que todo resíduo gerado no município foi coletado, foi possível identificar os percentuais de cada tipo de coleta, conforme apresentado na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Quantidade gerada de resíduos domiciliares e respectivos percentuais de coleta convencional e coleta seletiva no município da Serra/ES.

Modalidade de coleta	Quantidade gerada de resíduos domiciliares (t)	Percentuais
Coleta convencional	169.568,43	99,29%
Coleta seletiva	1.209,56	0,71%

Fonte: Aderes (2017).

Nota-se na Tabela 4-1 que a quantidade de resíduos secos e potencialmente recicláveis coletados atualmente é pequena (0,71%) quando comparada aos RDO coletados no município da Serra - ES e encaminhados para disposição final em aterro sanitário. É importante ressaltar que, a prefeitura da Serra/ES realiza apenas a coleta seletiva na modalidade PEV (BRASIL, 2018). No entanto, segundo dados da Aderes (2017) as OCMRR do município declararam que em 2017 recebiam resíduos secos e

recicláveis também das outras duas modalidades (porta a porta e mista). Dessa forma, entende-se que as próprias OCMRR realizam essas atividades de forma autônoma, ou seja, sem contrato com a prefeitura.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O Quadro 4-1 evidencia o fluxo proposto para o desenvolvimento desta pesquisa e são apresentados os métodos adotados para atingir os objetivos específicos, os quais são executados a fim de atingir o objetivo geral.

Quadro 4-1 - Fluxo metodológico para o desenvolvimento da pesquisa proposta

Objetivo geral		
Avaliar o impacto das estratégias de coleta seletiva (modalidades porta a porta, PEV e mista), dos agentes executores (prefeitura, catadores e empresa terceirizada), bem como da política de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental no custo de gerenciamento de resíduos sólidos das prefeituras municipais.		
Objetivos específicos	Etapas	Método
Identificar as variáveis relativas às estratégias de coleta seletiva e educação ambiental que influenciam nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos e relacioná-las em um diagrama de causa e efeito	I	Pesquisa documental Pesquisa bibliográfica
Relacionar as variáveis identificadas em um diagrama de estoque e fluxo, baseando-se na metodologia de dinâmica de sistemas e realizar a formulação matemática do modelo	II	Dinâmica de Sistemas
Verificar a confiabilidade do modelo proposto	III	Teste de conservação física Teste de consistência dimensional Teste de erro de integração Teste de condições extremas Teste de adequação de limites Análise de sensibilidade
Definir e analisar cenários para análise do impacto da variáveis mencionadas sobre os custos de gerenciamento de resíduos sólidos, usando como estudo de caso a prefeitura municipal da Serra/ES	IV	Simulação do modelo

Fonte: Autoria própria

O modelo proposto e sua simulação foram realizados no software gratuito Vensim PLE®, pois é uma versão gratuita da empresa Ventana Systems e é destinado para uso educacional. Nos tópicos a seguir será descrita a metodologia para cada uma das etapas apresentadas no Quadro 4-1.

4.2.1. Etapa I: Identificação das variáveis relativas às estratégias de coleta seletiva e educação ambiental que influenciam nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos e elaboração do diagrama de causa e efeito

Na Etapa I foi realizada pesquisa documental e bibliográfica em artigos científicos e documentos técnicos acerca do tema em questão, a fim de identificar as variáveis relacionadas às estratégias de coleta seletiva e de educação ambiental que influenciam os custos de gerenciamento de resíduos sólidos para as prefeituras municipais. É importante ressaltar que os serviços que foram considerados para compor o chamado custo total de gerenciamento de RDO foram coleta, transporte e disposição final de rejeitos em aterro sanitário.

Com relação às estratégias de coleta seletiva buscou-se identificar como a cobertura de coleta seletiva, as metas de ampliação propostas por políticas públicas, as modalidades disponíveis (porta a porta, PEV e mista) e os agentes executores da atividade (prefeitura, catadores e empresa terceirizada) podem influenciar nos custos de gerenciamento de resíduos sólidos para as prefeituras municipais. No que tange as estratégias de educação ambiental, buscou-se verificar como a política pública de educação ambiental, que visa a separação dos resíduos sólidos na fonte geradora e a consequente redução dos rejeitos no processo de coleta seletiva, também podem influenciar nos custos de gerenciamento de RDO para as prefeituras municipais.

A partir da identificação das variáveis, foi caracterizada a inter-relação entre elas por meio de pesquisa bibliográfica, principalmente de artigos científicos que reportaram modelos de dinâmica de sistema para tratar a questão do gerenciamento de RSU. A identificação da relação entre as variáveis possibilitou a construção do diagrama de causa e efeito que permite verificar o comportamento das variáveis de maneira qualitativa, identificando os ciclos positivos e negativos. A relação de causa e efeito foi representada em um DCE utilizando o *software* Vensim PLE®.

4.2.3. Etapa II: Elaboração de diagrama de estoque e fluxo e formulação matemática

Tendo elaborado o diagrama de causa e efeito, na etapa II foi estruturado o diagrama de estoque e fluxo utilizando o *software* de modelagem Vensim PLE®. O objetivo do DEF é verificar quantitativamente o comportamento das variáveis ao longo do tempo.

Para isso, foram determinados os estoques, os fluxos, as variáveis auxiliares e as constantes para compor o DEF de acordo com o objetivo proposto. Também foram definidas as equações matemáticas do modelo com suas respectivas unidades, conforme apresentado no Apêndice A.

Para obtenção dos parâmetros do modelo foram consultados documentos e estudos realizados no Espírito Santo, tais como o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo e o projeto “Fortalecimento dos Catadores de Materiais Recicláveis do Estado do Espírito Santo” realizado pelo Instituto Sindimicro-ES em parceria com o Lagesa (ADERES, 2017), os quais abrangem o município da Serra/ES. Além disso, dados foram obtidos no Geobras, no SNIS e a na Prefeitura Municipal da Serra - ES.

4.2.4. Etapa III: Verificação da confiabilidade do modelo proposto

Na Etapa III foram realizados testes de verificação com vistas a demonstrar a confiabilidade do modelo matemático proposto. O modelo proposto se enquadra na categoria de modelagem quantitativa, uma vez que envolve a formulação indutiva e a simulação do modelo focadas na compreensão das estruturas de estoque e fluxo e aplicada na representação de sistemas quantificáveis (Zagonel e Corbet, 2006).

Conforme apresentado na Seção 3.5.3, os testes mais apropriados para a categoria de modelagem quantitativa e que são adequados para o modelo de dinâmica proposto são: conservação física ou avaliação de estrutura, consistência dimensional, erro de integração, teste de condições extremas, avaliação de parâmetros, reprodução de comportamentos, teste endógeno de reprodução de comportamentos e teste de adequação de limites.

No entanto, para o modelo matemático proposto não serão realizados os testes de reprodução de comportamentos, avaliação de parâmetros e teste endógeno de reprodução de comportamentos, visto que para realizá-los é necessário uma série histórica de dados, o que não está disponível atualmente. Em adição, também será realizado o teste de análise de sensibilidade. A literatura evidencia que esses são os testes mais utilizados, sendo aceitos para confirmar a confiabilidade de um modelo de dinâmica de sistemas (DI NOLA; ESCAPA; ANSAH, 2018; GHISOLFI *et al.*, 2017; SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016).

4.2.4.1 Conservação física (avaliação da estrutura)

O teste de conservação física ou de avaliação da estrutura verifica se o modelo é consistente com as realidades físicas básicas. Violações das leis físicas em que estoques se tornam negativos devem ser evitados. Para realização dos testes de conservação física (avaliação da estrutura) são usados diagramas de subsistemas e mapas de estoque e fluxo, os quais ajudam a revelar o nível de agregação. Além disso, a inspeção direta das equações também pode ser feita (STERMAN, 2000).

Para verificar a conservação física do modelo matemático proposto, foram realizadas simulações a fim de verificar a conformidade do modelo matemático com relação às realidades físicas básicas, ou seja, se todos os materiais que entram no sistema são destinados adequadamente, conservando as quantidades. Para isso, foi realizada a inspeção direta das equações e foram verificados todos os valores dos estoques do modelo, a fim de assegurar que nenhum estoque assumisse valores negativos, por exemplo.

4.2.4.2 Consistência dimensional

O teste de consistência dimensional é considerado um dos testes mais básicos e envolve a especificação das unidades de medida para cada variável do modelo e a verificação do significado físico dessas unidades por meio das equações matemáticas. A inconsistência dimensional pode revelar falhas importantes no entendimento da estrutura. Alguns *softwares* de simulação em dinâmica de sistemas incluem a análise dimensional automaticamente. Todavia, ainda que o modelo não gere mensagens de erro ao executar a verificação da consistência dimensional, todas as equações devem ser dimensionalmente consistentes sem a inclusão de fatores arbitrários que não possuem significado real (STERMAN, 2000).

Neste estudo, o teste de consistência dimensional foi realizado utilizando o comando “*Check Units*” do *software* Vensim, o qual realiza a análise dimensional de forma automatizada, gerando uma mensagem de erro ou de adequação dimensional. Nesse teste, as unidades matemáticas usadas nas equações do modelo foram revisadas, a fim de verificar se a dimensão no lado esquerdo estava equivalente à dimensão no lado direito das equações, até que todas as variáveis envolvidas no modelo de dinâmica de sistemas possuíssem adequação dimensional. Seguindo a orientação de

Sterman (2000), também foi realizada uma análise das equações para avaliar seu significado em relação à realidade.

4.2.4.3 Erro de integração

Os modelos de dinâmica de sistema são resolvidos por integração numérica. Assim, para simulação deve-se selecionar um método de integração numérica e um intervalo de tempo que produzam uma aproximação da dinâmica contínua subjacente, com precisão suficiente para a finalidade em questão. No teste de erro de integração executa-se o modelo com uma estimativa inicial dt e depois se reduz o valor de dt ao meio, executando o modelo novamente. Caso não ocorram mudanças significativas no comportamento do modelo, então a estimativa inicial pode ser considerada razoável. Se houver mudanças consideráveis, o teste deve ser repetido, reduzindo o dt novamente ao meio, até que os resultados não sofram alterações significativas (STERMAN, 2000).

Para o modelo matemático proposto, foi realizado o teste de erro de integração utilizando o método de integração de Euler e o método de Runge Kutta, com objetivo de verificar qual dos métodos possuía uma maior estabilidade numérica, ou seja, menores erros. Para isso, o modelo matemático proposto foi executado no *software* Vensim com um valor inicial de *time step* igual a 1. Em seguida, o valor do *time step* foi reduzido ao meio (*time step* = 0,5) e o modelo executado novamente, verificando se houveram mudanças expressivas no comportamento do modelo matemático. Esse procedimento foi repetido com *time step* = 0,25 e *time step* = 0,125 para os dois métodos de integração.

4.2.4.4 Condições extremas

Os modelos de dinâmica de sistemas devem ser robustos em condições extremas, ou seja, devem se comportar de maneira realista, mesmo que sejam impostas situações extremas a eles. Nesse sentido, o teste de condições extremas verificam se o modelo se comporta adequadamente quando as entradas assumem valores extremos, como zero ou infinito. Esse teste pode ser realizado de duas maneiras principais: por inspeção direta das equações do modelo e por simulação (STERMAN, 2000).

No teste de condições extremas, variáveis foram submetidas a valores extremos, como zero ou infinito, a fim de verificar o comportamento do modelo de dinâmica de sistemas nessas situações.

4.2.4.5 Adequação de limites

O teste de adequação de limites avalia se os limites definidos para o modelo estão adequados para o objetivo em questão. Essa verificação pode ser feita inspecionando diretamente as equações do modelo. Além disso, deve-se avaliar os diagramas de causa e efeito e de estoque e fluxo para verificar se as variáveis exógenas estão todas incluídas. Todas as constantes são exógenas, mas podem de fato ser variáveis ao longo do horizonte temporal (STERMAN, 2000).

No teste de adequação de limites foram verificadas os limites das fronteiras do modelo de dinâmica de sistemas para o objetivo proposto. Para isso, verificou-se no diagrama de causa e efeito e no diagrama de estoque e fluxo, assim como nas equações do modelo matemático, se haviam constantes exógenas que deveriam ser consideradas como variáveis. Este teste foi realizado em reuniões com os orientadores para discussão e definição dos limites.

4.2.4.6 Análise de sensibilidade

O teste de análise de sensibilidade tem como objetivo verificar como o modelo de simulação responde às mudanças nos parâmetros utilizados. Esse teste foi realizado no software Vensim de forma automática, por meio da simulação de Monte Carlo. Nesse procedimento, os parâmetros do modelo são alterados para cada simulação que avalia a probabilidade de ocorrência de cada valor considerando a distribuição de probabilidade dos parâmetros. Como resultado, é obtida a incerteza nas variáveis de saída selecionadas. A partir disso, é possível entender os limites de confiança do modelo (VENTANA SYSTEMS, 2020).

Para fazer a análise de sensibilidade, utilizou-se o comando *Sensitivity Simulation Setup* no software Vensim, onde foram inseridos os valores máximo, mínimo, média e desvio padrão para distribuição normal, obtidos a partir da variação nos custos unitários médios de coleta seletiva das modalidades. A distribuição utilizada foi a aleatória normal, uma vez que atribuiu-se que valores próximos à média possuem maior probabilidade de ocorrer do que aqueles distantes da média. A variação desses

parâmetros ocorre de acordo com o município verificado, conforme apresentado na Subseção 5.2.3.

A Tabela 4-2 apresenta os valores máximo, mínimo, média e desvio padrão para distribuição normal que foram utilizados para análise de sensibilidade. Esses valores foram calculados com base nos custos médios de municípios do Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, estados que compõem a região Sudeste, onde o município da Serra/ES está inserido.

Tabela 4-2 - Valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão das variáveis de custo (R\$/t) para análise de sensibilidade.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	DP
Custo CS porta a porta prefeitura	1.226,80	282,64	779,64	474,05
Custo CS porta a porta catador	1.000,00	100,00	433,01	245,36
Custo CS porta a porta empresa terceirizada	1.000,00	283,00	574,89	241,31
Custo CS PEV prefeitura	1.526,92	165,80	546,01	473,83
Custo CS PEV empresa terceirizada	880,00	100,00	373,54	307,73
Custo CS mista prefeitura	731,44	83,88	326,83	289,28
Custo CS mista catador	1.000,00	100,00	398,21	328,60
Custo CS mista empresa terceirizada	1.000,00	101,00	602,65	335,72

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (2018). CS: Coleta seletiva; DP: Desvio Padrão.

O método utilizado foi o *Latin Hypercube*, um mecanismo que garante que toda a gama de cada parâmetro variado seja explorada no número de simulações especificado. O número de simulações foi mantido em 200, valor padrão do *software*, bem como o número de ruído inicial de 1234.

4.2.5. Etapa IV: Simulação e análise de cenários que evidenciem o impacto das variáveis sobre o custo de gerenciamento de resíduos sólidos para a prefeitura municipal da Serra/ES

Na última etapa foram definidos diferentes cenários para simulação e análise do modelo de dinâmica de sistemas proposto. Todos os cenários foram simulados no *software* de simulação Vensim PLE® em uma escala de tempo anual, com um horizonte de tempo de 20 anos (2020-2039).

A concepção dos diferentes cenários considerou a variação dos percentuais de coleta seletiva nas modalidades porta a porta, PEV e mista, a variação de cada agente executor, prefeitura, catadores e empresa terceirizada, para cada uma das

modalidades, além da variação da implementação das políticas de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental. O objetivo é verificar o impacto dessas estratégias no custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal da Serra/ES, objeto de estudo nesta pesquisa.

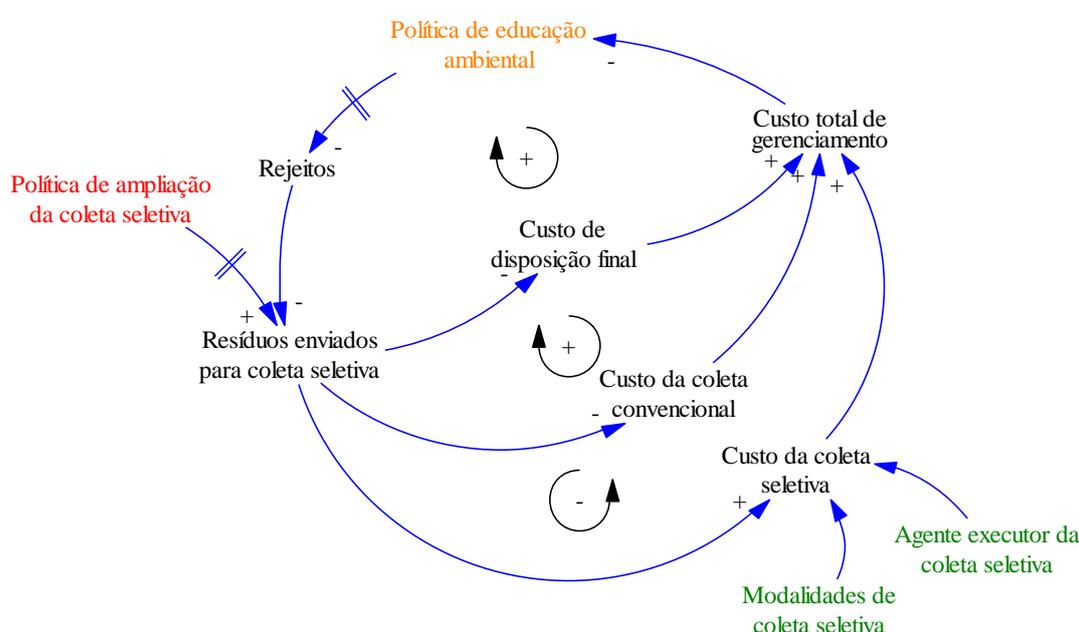
Para facilitar o entendimento, a descrição dos cenários simulados foi apresentada na seção de resultados (Subseção 5.4.1), uma vez que é necessário conhecer o diagrama de estoque e fluxo, assim como as variáveis a serem simuladas, para melhor compreensão dos cenários.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ETAPA I: DESCRIÇÃO DE CAUSALIDADE ENTRE AS ESTRATÉGIAS DE COLETA SELETIVA E EDUCAÇÃO AMBIENTAL NOS CUSTOS DE GERENCIAMENTO DE RDO

A partir da pesquisa bibliográfica e documental, foi possível identificar as variáveis, bem como descrever suas relações de causa/efeito nos custos de gerenciamento dos resíduos domiciliares (RDO). A Figura 5-1 mostra o diagrama de causa e efeito, o qual foi formulado a partir das variáveis identificadas.

Figura 5-1 – Diagrama de causa e efeito.



Fonte: Autoria própria

Conforme observa-se na Figura 5-1, o diagrama é composto por três ciclos, sendo dois ciclos positivos (reforço) e um ciclo negativo (balanço). O ciclo de balanceamento é representado pela relação entre as variáveis: quantidade de resíduos enviados para coleta seletiva, custo da coleta seletiva, custo total de gerenciamento, política de educação ambiental e rejeitos.

O custo total de gerenciamento de RDO é influenciado diretamente por três variáveis: custo de disposição final, custo de coleta convencional e custo de coleta seletiva. O custo de coleta de RDO representa a maior parte do custo total de gerenciamento, podendo representar cerca de 50% a 80% do orçamento municipal para gestão dos

resíduos sólidos em países de renda média alta (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012). A coleta seletiva possui o maior custo, sendo influenciada pela modalidade adotada e pelo agente executor da atividade, custando cerca de 4,6 vezes a mais do que a coleta convencional (CEMPRE, 2018), podendo chegar a ser 12 vezes maior (MAGALHÃES, 2020).

A Figura 5-1 mostra que a quantidade de resíduos enviados para a coleta seletiva possui relação diretamente proporcional ao custo de coleta seletiva e relação inversamente proporcional aos custos de coleta convencional e custos de disposição final. Todos esses custos possuem relação diretamente proporcional ao custo total de gerenciamento, logo os ciclos de reforço são representados pela relação entre as variáveis resíduos enviados para coleta seletiva, custo de coleta convencional ou custo de disposição final, custo total de gerenciamento, políticas de educação ambiental e rejeitos. Por outro lado, quando se trata do custo da coleta seletiva, é verificado um ciclo de balanço.

O custo da coleta seletiva possui relação com a modalidade utilizada na localidade e com o agente executor da atividade. Com relação às modalidades de coleta seletiva, geralmente a coleta seletiva porta-a-porta apresenta um custo maior, em função do custo logístico, da necessidade de caminhões e consumo de combustível e mão-de-obra (DI MARIA; MICALE, 2013; FREITAS; FONSECA, 2012; BESEN *et al.*, 2017). De forma contrária, a coleta seletiva PEV, apresenta um custo menor, visto que essa modalidade reduz os custos logísticos devido à diminuição de trajeto e acúmulo de carga (BESEN *et al.*, 2017).

No que diz respeito aos agentes executores, devido aos custos com pessoal, quando a coleta seletiva é realizada por empresas terceirizadas, seu custo pode ser menor quando comparado com aquele realizado pela própria prefeitura (CHIFARI *et al.*, 2017). Esse custo tende a ser ainda menor quando os catadores estão à frente do serviço (VARELLA, 2011; GODECKE *et al.*, 2012; RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015).

O custo total de gerenciamento dos resíduos, por sua vez, possui uma relação inversamente proporcional ao investimento em políticas de educação ambiental, visto que os gastos municipais estão concentrados nos serviços de coleta e destinação final (SILVA, 2018). O investimento em políticas de educação ambiental possui relação

diretamente proporcional com a quantidade de resíduos recicláveis enviados para coleta seletiva. Se os investimentos em educação ambiental forem aumentados, haverá um aumento na reciclagem (SILVA, 2018), visto que a partir de ações de educação ambiental, a participação da população nos programas de coleta seletiva aumenta (LAKHAN, 2014; ANDERSSON; STAGE, 2018) e os rejeitos diminuem, pois a população passa a separar os resíduos na fonte geradora (GRODZIŃSKA-JURCZAK *et al.*, 2006; PARREIRA, 2010; SILVA, 2018).

Contudo, é importante ressaltar que a relação entre o investimento em políticas de educação ambiental e a redução física dos rejeitos presentes nos resíduos coletados não ocorre de forma instantânea. Esses processos trazem consigo atrasos consideráveis para que os efeitos das políticas de educação ambiental sejam verificados em resultados de gestão (XU; LING; WU, 2018), representando um *delay* no DCE.

O aumento dos resíduos enviados para coleta seletiva implica em maiores volumes reciclados e menores volumes de resíduos enviados para aterros sanitários, o que reduz também os custos de coleta convencional e de disposição final, resguardadas as distintas modalidades de contratação ou execução e medição dos serviços (ZHANG *et al.*, 2019; ZON *et al.*, 2020). Por outro lado, a quantidade de resíduos enviadas para coleta seletiva é influenciada principalmente por políticas de universalização da coleta seletiva local. Verificam-se que quanto maior for a cobertura da coleta seletiva, mais eficaz pode se tornar a atividade de reciclagem (D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016).

Embora elucidador, por mais que o DCE possibilite a identificação da relação entre as variáveis do modelo, não são suficientes para serem usadas como base para um modelo de simulação, sendo necessário que seja construído um diagrama de estoque e fluxo, conforme apresentado na seção a seguir.

5.2. ETAPA II: ELABORAÇÃO DE DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O diagrama de estoque e fluxo proposto tem o objetivo de verificar o impacto das modalidades e dos agentes executores da coleta seletiva, da política de ampliação da coleta seletiva e da política de educação ambiental no custo total de gerenciamento

de resíduos para as prefeituras municipais. Para facilitar o entendimento, o diagrama de estoque e fluxo foi dividido em duas partes denominadas “Módulo quantidade de resíduos” e “Módulo custos de gerenciamento”.

5.2.1. Módulo quantidade de resíduos

O módulo quantidade de resíduos, apresentado na Figura 5-2, mostra a quantidade de Resíduos Domiciliares (RDO) gerada e coletada por cada modalidade e agente executor das atividades de coleta, a saber: Coleta Convencional (CC), Coleta Seletiva (CS), Coleta Seletiva Porta a Porta (CS PP), Coleta Seletiva por PEV (CS PEV) e Coleta Seletiva Mista (CS mista). Nos municípios brasileiros, essas atividades podem ser realizadas pela própria prefeitura, por organizações de catadores de materiais recicláveis ou por empresas terceirizadas, contratadas para realizar o serviço. A administração pública de cada localidade define o tipo de modalidade e agente executor para realizar as atividades baseando-se, geralmente, nos custos das atividades (RUTKWOSKI; RUTKWOSKI, 2015; SILVA, 2017; FERRONATO *et al.*, 2020).

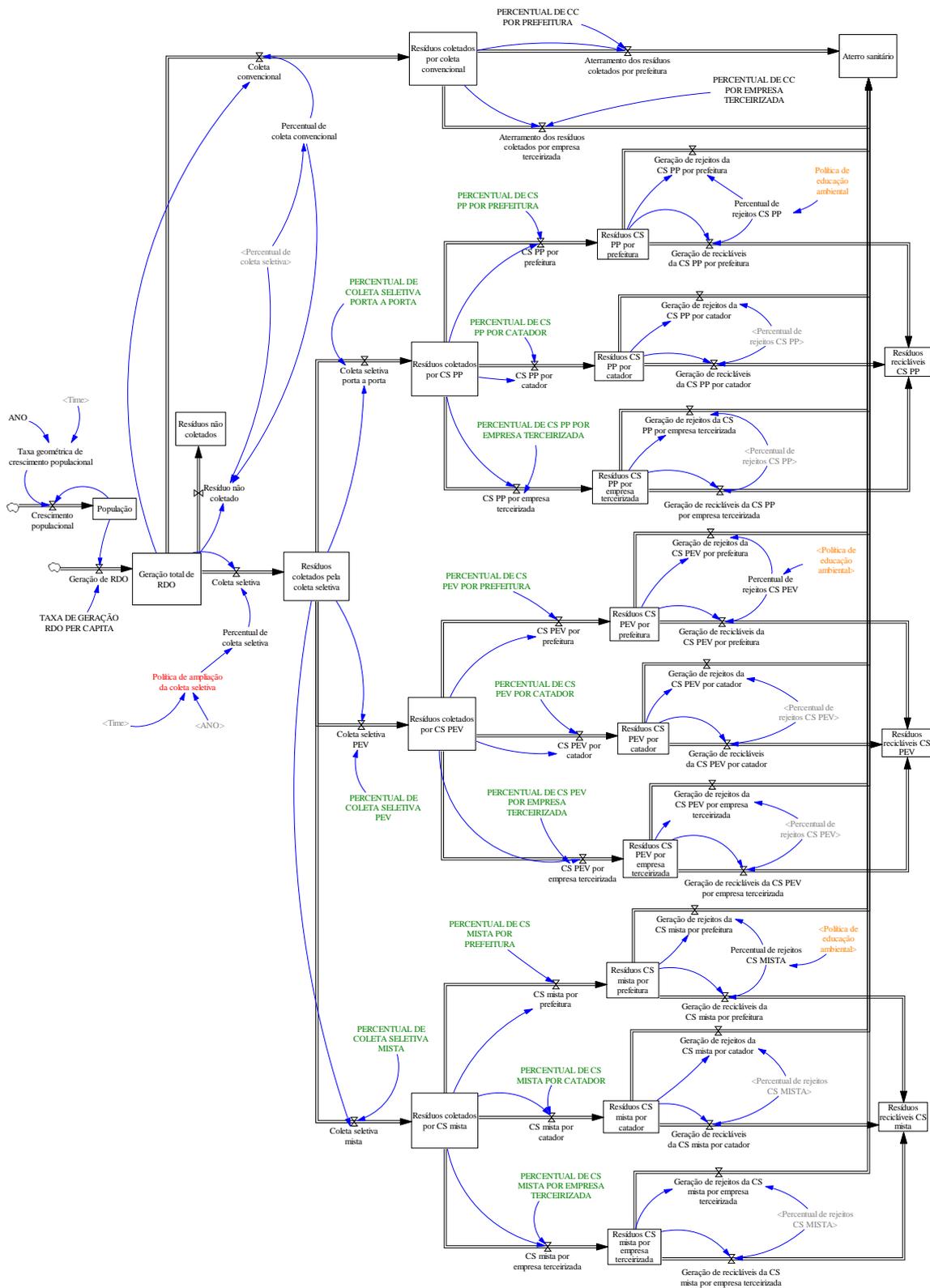
Na Figura 5-2, as variáveis que representam os cenários propostos estão destacadas de cores diferentes, conforme descrito no Quadro 5-1.

Quadro 5-1 – Representação das variáveis dos cenários propostos

Variáveis	Representação (cor)
Política de ampliação da coleta seletiva	Vermelha
Percentual de coleta seletiva porta a porta, PEV e mista (prefeitura, catador e empresa terceirizada)	Verde
Política de educação ambiental	Laranja

Fonte: Autoria própria.

Figura 5-2 – Diagrama de estoque e fluxo (Módulo quantidade de resíduos).



Fonte: Autoria própria

No modelo proposto, os resíduos domiciliares são gerados pela população que, por sua vez, cresce a uma taxa geométrica de crescimento populacional, conforme descrito na Equação 59, apresentada no Quadro A-1 do Apêndice A.

O estoque da população é cumulativo, pois não possui fluxo de saída, ou seja, acumula o valor da população ao longo do tempo, somada ao valor do estoque inicial $E(t_0)$, conforme Equação 4.

$$\text{População} = \int_{t_0}^t (\text{crescimento populacional}) dt + E(t_0) \quad (\text{Eq. 4})$$

A geração de RDO ao longo do tempo, depende das taxas de geração de RDO *per capita* e do crescimento da população. Assim, multiplicando essas duas variáveis, obtêm-se a geração total de RDO ao longo dos anos. O estoque “Geração total de RDO”, por sua vez, não é cumulativo e possui três fluxos de saída, referentes aos tipos de coleta a qual os resíduos gerados são submetidos, conforme Equação 5.

$$\begin{aligned} \text{Geração total de RDO} = \int_{t_0}^t (\text{Geração de RDO} - \text{Coleta convencional} - \text{Coleta seletiva} - \\ \text{Resíduo não coletado}) dt + E(t_0) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 5})$$

As variáveis “Coleta convencional” e “Coleta seletiva” são variáveis de fluxo e representam a quantidade de resíduos que é coletada por cada uma dessas modalidades ao longo do tempo. Essa quantidade é influenciada pelas variáveis auxiliares “Percentual de coleta convencional” e “Percentual de coleta seletiva”, as quais representam a quantidade de resíduos coletada por cada modalidade, conforme mostram as Equações 6 e 7.

$$\text{Coleta convencional} = \text{Geração total de RDO} * \text{Percentual de coleta convencional} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\text{Coleta seletiva porta a porta} = \text{Geração total de RDO} * \text{Percentual de coleta seletiva} \quad (\text{Eq. 7})$$

O percentual de coleta seletiva é influenciado por uma política de ampliação de coleta seletiva, onde são definidas metas para ampliar essa atividade. A Equação 62 apresentada no Quadro A-1 do Apêndice A mostra a situação atual, onde não teria ampliação. No Quadro A-2 são apresentadas as equações para os cenários de ampliação estabelecidos.

Existe ainda, dentre a quantidade total de resíduos gerados, aqueles que não são coletados. A Equação 8 apresenta o cálculo da variável do tipo fluxo “Resíduo não coletado”.

$$\text{Resíduo não coletado} = \text{Geração total de RDO} * (1 - (\text{Percentual de coleta convencional} + \text{Percentual de coleta seletiva})) \quad (\text{Eq. 8})$$

As variáveis “Coleta convencional” e “Coleta seletiva” também são fluxos de entrada dos estoques “Resíduos coletados por coleta convencional” e “Resíduos coletados pela coleta seletiva”, respectivamente.

O estoque “Resíduos coletados por coleta convencional” representa a quantidade total de resíduos coletados pela coleta convencional. Essa coleta pode ser realizada pela própria prefeitura ou por empresas terceirizadas contratadas para realizar o serviço. Após coletar convencionalmente os resíduos, eles são encaminhados para disposição final em aterros sanitários. A Equação 9 apresenta o cálculo do estoque “Resíduos coletados por CC”.

$$\begin{aligned} \text{Resíduos coletados por CC} = \int_{t_0}^t (\text{Coleta convencional} - \\ \text{Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada} - \\ \text{Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura}) dt + E(t_0) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 9})$$

Os fluxos de saída desse estoque são as variáveis “Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura” e “Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada” e são calculados a partir da percentual da quantidade de resíduos coletada na coleta convencional, pela prefeitura e por empresa terceirizada contratada para realizar o serviço, conforme pode ser observado nas Equações 10 e 11.

$$\begin{aligned} \text{Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura} = \\ \text{PERCENTUAL DE CC POR PREFEITURA} * \text{Resíduos coletados por CC} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\begin{aligned} \text{Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada} = \\ \text{PERCENTUAL DE CC POR EMPRESA TERCEIRIZADA} * \text{Resíduos coletados por CC} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

Todos os resíduos coletados por meio da coleta convencional são considerados rejeitos e, por isso, são encaminhados diretamente para disposição final ambientalmente adequada em aterros sanitários. O estoque “Aterro sanitário” representa a quantidade de resíduos advindos da coleta convencional somada a quantidade de rejeitos provenientes das atividades de coleta seletiva. Esse estoque

não possui fluxo de saída, ou seja, acumula o valor dos resíduos que chegam ao aterro sanitário ao longo do tempo, somado ao valor do estoque inicial $E(t_0)$, conforme Equação 12.

$$\begin{aligned} \text{Aterro sanitário} = & \int_{t_0}^t (\text{Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada} + \\ & \text{Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura} + \\ & \text{Geração de rejeitos da CS nas formas (mista por catador} + \\ & \text{mista por empresa terceirizada} + \text{mista por prefeitura} + \text{PEV por catador} + \\ & \text{PEV por empresa terceirizada} + \text{PEV por prefeitura} + \text{PP por catador} + \\ & \text{PP por empresa terceirizada} + \text{PP por prefeitura}) dt + E(t_0) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 12})$$

Além da coleta convencional, existe a coleta seletiva, em que os resíduos secos e recicláveis são segregados na fonte geradora, coletados e encaminhados para associações de catadores para seguirem o processo de reciclagem. O estoque “Resíduos coletados pela coleta seletiva” representa a quantidade total de resíduos coletados por essa atividade, que pode ser realizada pela modalidade porta a porta, PEV ou mista. As Equações 13, 14 e 15 apresentam o cálculo dos fluxos de cada modalidade.

$$\begin{aligned} \text{Coleta seletiva porta a porta} = & \text{Resíduos coletados pela coleta seletiva} * \\ & \text{PERCENTUAL DE COLETA SELETIVA PORTA A PORTA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\begin{aligned} \text{Coleta seletiva PEV} = & \text{Resíduos coletados pela coleta seletiva} * \\ & \text{PERCENTUAL DE COLETA SELETIVA PEV} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\begin{aligned} \text{Coleta seletiva mista} = & \text{Resíduos coletados pela coleta seletiva} * \\ & \text{PERCENTUAL DE COLETA SELETIVA MISTA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 15})$$

O estoque “Resíduos coletados por CS PP” representa a quantidade total de resíduos coletados pela coleta seletiva porta a porta, o qual é dado a partir do fluxo de entrada “Coleta seletiva porta a porta”. Esse estoque possui como fluxos de saídas os três tipos de agentes executores da atividade, a qual pode ser realizada pela própria prefeitura, por OCMRR ou por empresas terceirizadas. A Equação 16 apresenta o cálculo do estoque “Resíduos coletados por CS PP”.

$$\begin{aligned} \text{Resíduos coletados por CS PP} = & \int_{t_0}^t (\text{Coleta seletiva porta a porta} - \text{CS PP por catador} - \\ & \text{CS PP por empresa terceirizada} - \text{CS PP por prefeitura}) dt + E(t_0) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 16})$$

As variáveis de fluxo “CS PP por catador”, “CS PP por empresa terceirizada” e “CS PP por prefeitura” representam a quantidade de resíduos coletada por cada um desses agentes executores, conforme mostra as Equação 17, 18 e 19.

$$\text{CS PP por catador} = \text{PERCENTUAL DE CS PP POR CATADOR} * \text{Resíduos coletados por CS PP} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$\text{CS PP por empresa terceirizada} = \text{PERCENTUAL DE CS PP POR EMPRESA TERCEIRIZADA} * \text{Resíduos coletados por CS PP} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\text{CS PP por prefeitura} = \text{PERCENTUAL DE CS PP POR PREFEITURA} * \text{Resíduos coletados por CS PP} \quad (\text{Eq. 19})$$

Essas variáveis também são variáveis de entrada dos estoques “Resíduos CS PP por prefeitura”, “Resíduos CS PP por catador” e “Resíduos CS PP por empresa terceirizada”, os quais representam a quantidade total de resíduos coletados por cada um desses agentes executores. Esses resíduos chegam às OCMRR para triagem, onde são separados os resíduos recicláveis dos rejeitos. A Equação 20 apresenta o cálculo do estoque “Resíduos CS PP por prefeitura”.

$$\text{Resíduos CS PP por prefeitura} = \int_{t_0}^t (\text{CS PP por prefeitura} - \text{Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura} - \text{Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura}) dt + E(t_0) \quad (\text{Eq. 20})$$

A geração de recicláveis e de rejeitos é dada a partir de um percentual de rejeitos da coleta seletiva porta a porta, conforme mostram as Equações 21 e 22.

$$\text{Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura} = \text{Resíduos CS PP por prefeitura} * (1 - \text{PERCENTUAL DE REJEITOS DA CS PP}) \quad \dots\dots(\text{Eq. 21})$$

$$\text{Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura} = \text{PERCENTUAL DE REJEITOS DA CS PP} * \text{Resíduos CS PP por prefeitura} \quad \dots\dots(\text{Eq. 22})$$

A mesma lógica acontece para o cálculo dos estoques “Resíduos CS PP por catador” e “Resíduos CS PP por empresa terceirizada”.

Os percentuais de rejeitos são influenciados por uma política de educação ambiental, a qual contribui para aumento da participação e conscientização da população e, conseqüentemente, para diminuição dos rejeitos. O cálculo dos percentuais de rejeito,

bem como a explicação das equações encontram-se no Apêndice A, pois essas variáveis dependem dos cenários estabelecidos.

Os rejeitos gerados seguem para disposição final, ou seja, são variáveis de fluxo de entrada para o estoque “Aterro sanitário”. Já os recicláveis são encaminhados para reciclagem, mas não é foco desse trabalho. Portanto, essas variáveis são fluxos de entrada para o estoque “Resíduos recicláveis CS PP” que é cumulativo e apresenta a quantidade total dos resíduos recicláveis provenientes da coleta seletiva porta a porta, conforme mostra Equação 23.

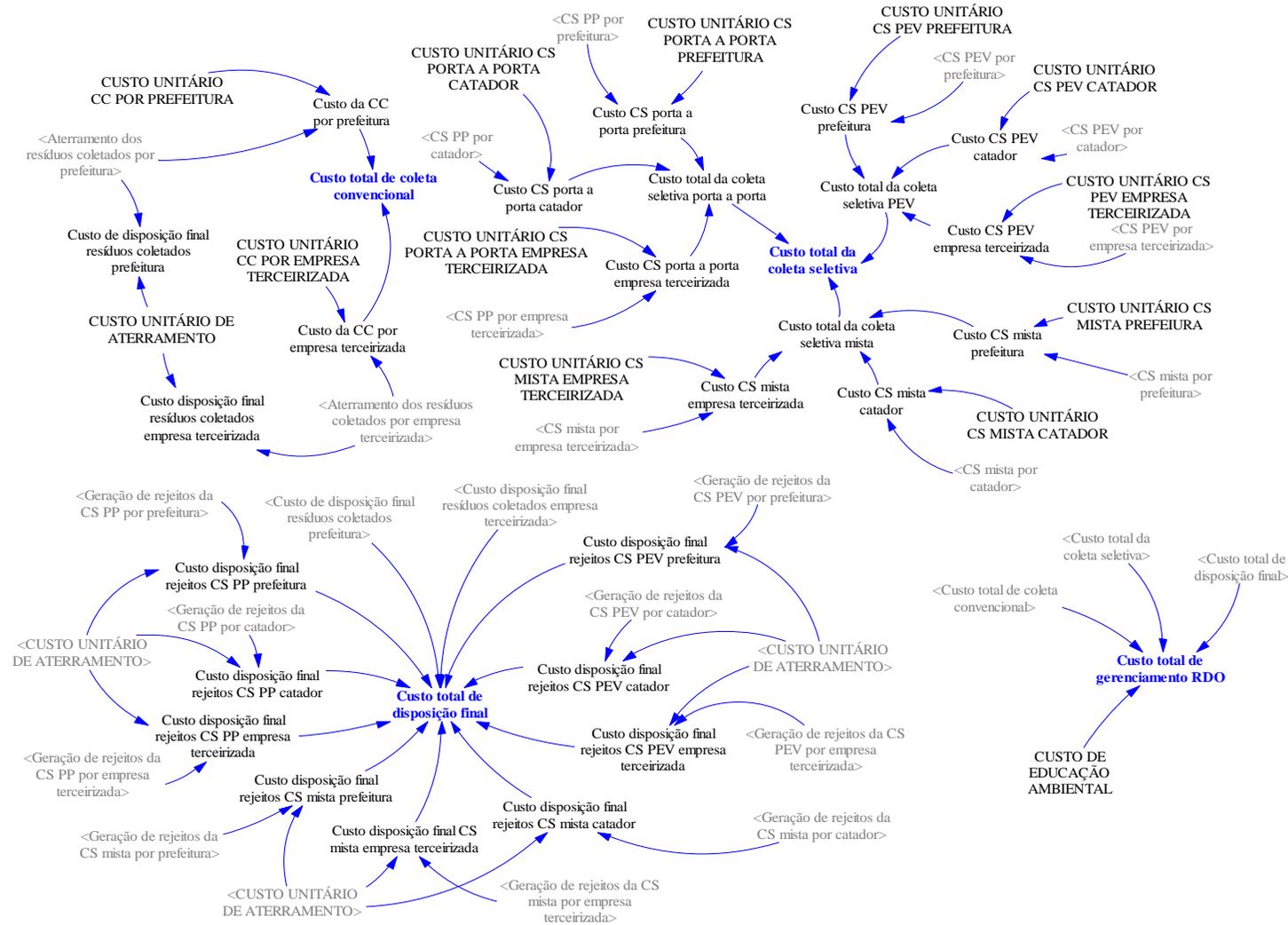
$$\begin{aligned} \text{Resíduos recicláveis CS PP} = \int_{t_0}^t & (\text{Geração de recicláveis da CS PP por catador} + \\ & \text{Geração de recicláveis da CS PP por empresa terceirizada} + \\ & \text{Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura})dt + E(t_0) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 23})$$

Assim como foi descrito anteriormente para a estratégia de coleta seletiva porta a porta, o modelo apresenta a mesma lógica para a coleta seletiva PEV e mista, a partir dos estoques “Resíduos coletados por CS PEV” e “Resíduos coletados por CS mista”.

5.2.2. Módulo custos de gerenciamento

No módulo custos de gerenciamento (Figura 5-3) são apresentados os custos das atividades de coleta, tanto convencional quanto seletiva, os quais influenciam no custo total de gerenciamento de RDO para as prefeituras municipais. As principais saídas estão destacadas na cor azul e referem-se ao custo total de coleta convencional, custo total de coleta seletiva, custo total de disposição final e custo total de gerenciamento de RDO.

Figura 5-3 - Diagrama de estoque e fluxo (Módulo custos de gerenciamento).



Fonte: Autoria própria

Conforme observa-se na Figura 5-3, o valor da variável “Custo total de coleta convencional” é dado pela somatória das variáveis “Custo da CC por prefeitura” e “Custo da CC por empresa terceirizada” (Equação 24), que são calculados a partir da multiplicação da quantidade coletada e enviada para o aterro sanitário e do custo unitário do serviço (Equação 25 e 26).

$$\begin{aligned} \text{Custo total de coleta convencional} &= \text{Custo da CC por empresa terceirizada} + \\ &\text{Custo da CC por prefeitura} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo da CC por empresa terceirizada} &= \\ &\text{Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada} * \\ &\text{CUSTO UNITÁRIO CC POR EMPRESA TERCEIRIZADA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo da CC por prefeitura} &= \text{Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura} * \\ &\text{CUSTO UNITÁRIO CC POR PREFEITURA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 26})$$

O cálculo da variável “Custo total da coleta seletiva porta a porta” (Equação 27) é realizado a partir da soma das variáveis “Custo CS porta a porta prefeitura”, “Custo CS porta a porta catador”, “Custo CS porta a porta empresa terceirizada”, as quais são calculadas multiplicando a quantidade de resíduos coletada pela atividade pelo custo unitário do serviço, de acordo com cada agente executor, conforme Equações 28, 29 e 30.

$$\begin{aligned} \text{Custo total da coleta seletiva porta a porta} &= \text{Custo CS porta a porta catador} + \\ &\text{Custo CS porta a porta empresa terceirizada} + \text{Custo CS porta a porta prefeitura} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo CS porta a porta prefeitura} &= \text{CS PP por prefeitura} * \\ &\text{CUSTO UNITÁRIO CS PORTA A PORTA PREFEITURA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 28})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo CS porta a porta catador} &= \text{CS PP por catador} * \\ &\text{CUSTO UNITÁRIO CS PORTA A PORTA CATADOR} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 29})$$

$$\begin{aligned} \text{Custo CS porta a porta empresa terceirizada} &= \text{CS PP por empresa terceirizada} * \\ &\text{CUSTO UNITÁRIO CS PORTA A PORTA EMPRESA TERCEIRIZADA} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 30})$$

Da mesma forma, o cálculo das variáveis “Custo total da coleta seletiva PEV” e “Custo total da coleta seletiva mista” são realizados pelo somatório das variáveis de custo da atividade de coleta por estratégia e cada agente executor.

O “Custo total da coleta seletiva”, como mostra a Equação 31, é dado pela soma das variáveis de custo total da coleta seletiva realizada por cada modalidade (porta a porta, PEV e mista).

$$\begin{aligned} \text{Custo total da coleta seletiva} = & \text{Custo total da coleta seletiva PEV} + \\ & \text{Custo total da coleta seletiva porta a porta} + \text{Custo total da coleta seletiva mista} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 31})$$

Seguindo a mesma lógica, o “Custo total de disposição final” é dado pela somatória dos custos de disposição final de todos os resíduos coletados pela coleta convencional e dos rejeitos provenientes da coleta seletiva realizada por todas as diferentes estratégias e agentes executores, conforme Equação 32.

$$\begin{aligned} \text{Custo total de disposição final} = & \\ & \text{Custo de disposição final resíduos coletados prefeitura} + \\ & \text{Custo disposição final resíduos coletados empresa terceirizada} + \\ & \text{Custo disposição final rejeitos CS nas formas (PEV catador} + \text{PEV empresa terceirizada} + \\ & \text{PEV prefeitura} + \text{PP catador} + \text{PP empresa terceirizada} + \text{PP prefeitura} + \\ & \text{mista empresa terceirizada} + \text{mista catador} + \text{mista prefeitura} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 32})$$

O custo de educação ambiental, por sua vez, é calculado em função da implementação da política de educação ambiental. Conforme mostra a Equação 33, quando a política de educação ambiental fosse parcialmente efetiva, o custo de educação ambiental seria de R\$67.500,00/ano e fosse totalmente efetiva, o custo de educação ambiental para a prefeitura seria de R\$135.000,00/ano. É importante ressaltar que esses valores são específicos para o caso da Serra/ES e podem ser alterados para outras localidades de estudo.

$$\begin{aligned} \text{Custo de educação ambiental} = & \text{IF THEN ELSE}(\text{Política de educação ambiental} = \\ & 0, 0, \text{IF THEN ELSE}(\text{Política de educação ambiental} = \\ & \text{RAMP}(0.0263158, 2020, 2039), 67500, 135000)) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 33})$$

Por fim, a Equação 34 apresenta o “Custo total de gerenciamento de RDO”, o qual é calculado a partir da soma das variáveis “Custo total de coleta convencional”, “Custo total de coleta seletiva”, “Custo total de disposição final”, e “Custo de educação ambiental”.

$$\begin{aligned} \text{Custo total de gerenciamento de RDO} &= \text{Custo de educação ambiental} + \\ &+ \text{Custo total da coleta seletiva} + \text{Custo total de coleta convencional} + \\ &+ \text{Custo total de disposição final} \end{aligned} \quad \text{.....(Eq. 34)}$$

Após equacionar matematicamente as variáveis do tipo estoque, fluxo e auxiliares do modelo de dinâmica de sistemas propostos, na seção a seguir serão apresentados os valores dos parâmetros de entrada.

5.2.3. Parâmetros para simulação do modelo

Os valores dos parâmetros do modelo matemático, estimados e corrigidos para 2020 pelo IPCA, apresentados no Quadro 5-2 são específicos para o estudo de caso no município da Serra/ES. Conforme já apresentado na Seção 4.1, o município da Serra/ES em 2019 possuía uma população de 517.510 hab e, neste mesmo ano, foram gerados 170.778t de resíduos domiciliares. Esses valores foram utilizados como valor inicial dos estoques “População” e “Geração total de RDO”.

Quadro 5-2 – Parâmetros do modelo matemático e respectivas unidades e valores adotados

Parâmetro	Unidade	Valor	Fonte	Valores atualizados (IPCA, 2020)
Taxa de geração RDO <i>per capita</i>	t/hab/ano	0,33	ESPIRITO SANTO (2019)	-
Percentual de coleta convencional	% anual	99,29	Aderes (2017)	-
Percentual de coleta seletiva	% anual	0,71	Aderes (2017)	-
Custo unitário CC prefeitura	R\$/t	130,08	SNIS (2018)	142,02
Custo unitário CC por empresas terceirizadas	R\$/t	171,36	Geobras (2019)	187,09
Custo unitário de aterramento	R\$/t	67,99	Geobras (2019)	74,23
Custo unitário CS porta a porta prefeitura	R\$/t	779,64	SNIS (2018)	851,22
Custo unitário CS porta a porta catador	R\$/t	433,00	SNIS (2018)	472,76
Custo unitário CS porta a porta empresa terceirizada	R\$/t	574,90	SNIS (2018)	627,68
Custo unitário CS PEV prefeitura	R\$/t	546,00	SNIS (2018)	596,13
Custo unitário CS PEV catador	R\$/t	350,00	SNIS (2018)	382,14
Custo unitário CS PEV empresa terceirizada	R\$/t	373,54	SNIS (2018)	407,84
Custo unitário CS mista prefeitura	R\$/t	326,84	SNIS (2018)	356,85
Custo unitário CS mista catador	R\$/t	398,21	SNIS (2018)	434,77
Custo unitário CS mista empresa terceirizada	R\$/t	602,65	SNIS (2018)	657,98
Custo de educação ambiental	R\$/t	135.000	PMS (2019)	142.721,04

Fonte: Autoria própria. RDO: Resíduos domiciliares; CC: Coleta convencional; CS: Coleta seletiva.

Para obter os valores dos custos unitários dos serviços de coleta de acordo com a modalidade e agente executor foram consultadas duas fontes: o Geobras (GEOBRAS, 2019) e o SNIS (BRASIL, 2018). Não foram encontrados todos os custos para o município da Serra, visto que no município a coleta convencional é realizada apenas por empresa terceirizada e a coleta seletiva pela prefeitura na modalidade PEV e por catadores, mas sem contrato com a prefeitura (BRASIL, 2018).

Sendo assim, para obtenção de alguns parâmetros foram calculadas, a partir dos dados do SNIS (BRASIL, 2018), médias de todos os municípios do ES que realizavam o tipo do serviço em que se deseja obter o custo. Nos casos em que não foram encontrados municípios do ES para obter os valores, foram verificados todos os municípios de outros estados do Sudeste: Rio de Janeiro - RJ, São Paulo - SP e Minas Gerais – MG, descritos em SNIS (BRASIL, 2018). Esse procedimento teve que ser realizado pois os dados do SNIS são limitados, visto que nem todos os municípios participam da pesquisa.

No município da Serra/ES, a coleta convencional é realizada por empresa terceirizada. Logo, no SNIS não possui o custo dessa atividade quando é realizada pela prefeitura. Para obter o custo unitário de coleta convencional realizada pela prefeitura foram selecionados no SNIS todos os municípios do Espírito Santo que que não terceirizavam o serviço de coleta convencional, ou seja, onde a própria prefeitura realizava o serviço, conforme mostrado na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Custo unitário de coleta convencional realizada pela prefeitura.

Municípios (ES)	Custo unitário de coleta convencional (R\$/t)
Apiacá	222,23
Boa Esperança	83,33
Conceição da Barra	108,36
Domingos Martins	207,37
Governador Lindenberg	182,86
Marilândia	39,67
Montanha	20,97
Pancas	140,55
Pedro Canário	55,17
Ponto Belo	70,66
São Roque do Canaã	306,70
Venda Nova do Imigrante	123,11
MÉDIA	130,08

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

O custo unitário de coleta convencional realizada pela prefeitura dos municípios identificados no ES, conforme observado na Tabela 5-1, varia de R\$ 21,00 a R\$

307,00 por tonelada coletada. A média dos valores resultou em um custo de coleta convencional médio de R\$ 130,08/t, valor que será utilizado como parâmetro de entrada do modelo matemático proposto. Entretanto, percebe-se que este valor representa uma grande variação e a incerteza relacionada será avaliada pela análise de sensibilidade.

O custo unitário de coleta convencional realizado por empresas terceirizadas para o município da Serra de R\$ 171,36/t, foi obtido no Geobras (2019), visto que no município essa coleta é feita integralmente por uma empresa contratada. Da mesma forma, obteve-se o custo de disposição final de resíduos sólidos domiciliares em aterro sanitário (custo unitário de aterramento) de R\$ 67,99/t.

Com relação a coleta seletiva, foi verificado que no SNIS não é apresentado o custo unitário da coleta seletiva quando o mesmo é realizado pela própria prefeitura. Para calcular esse custo, buscou-se identificar os municípios do ES em que a coleta seletiva é realizada somente pela prefeitura, sem existência de contratos com empresas contratadas ou OCMRR. A partir disso, calculou-se a média desses custos e, como o custo da coleta seletiva é, em geral, 4 vezes maior do que o custo da coleta seletiva (CEMPRE, 2018; DE MATOS *et al.*, 2010; PARREIRA, 2010), multiplicou-se por 4 o valor da média encontrada da coleta convencional para os municípios identificados, estimando o custo unitário da coleta seletiva para cada modalidade realizada pela prefeitura. Na Tabela 5-2 são apresentados os custos unitários de coleta seletiva porta a porta em municípios em que ela é realizada pela própria prefeitura, cuja média atinge R\$ 779,64/t.

Tabela 5-2 – Custo unitário da coleta seletiva porta a porta realizada pela prefeitura.

Municípios (ES)	Custo unitário da CS porta a porta realizada pela prefeitura (R\$/t)
Domingos Martins	829,48
Ponto Belo	282,64
São Roque do Canaã	1.226,80
MÉDIA	779,64

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

O custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por OCMRR foi obtido a partir do cálculo da média dos municípios do Estado de SP onde, de acordo com o SNIS (BRASIL, 2018), as OCMRRs possuem contrato com a prefeitura para realizar a coleta seletiva na modalidade porta a porta, conforme mostrado na Tabela 5-3. Os custos de coleta seletiva porta a porta realizada por OCMRR entre os municípios

identificados, podem variar de R\$ 100,00 a R\$1.000,00 por tonelada coletada e cuja média representa R\$ 433,00/t.

Tabela 5-3 - Custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por OCMRR.

Municípios (SP)	Custo unitário de CS porta a porta realizada por OCMRR (R\$/t)
Álvares Machado	577,00
Araçoiaba da Serra	479,30
Assis	500,00
Cajati	173,80
Dracena	523,30
Óleo	631,50
Orlândia	193,30
Piedade	550,00
Platina	100,00
Presidente Epitácio	491,70
Presidente Prudente	619,20
Regente Feijó	100,00
Santana de Parnaíba	286,00
Tupi Paulista	270,00
Várzea Paulista	1.000,00
MÉDIA	433,00

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

Da mesma forma, para obtenção do custo unitário de coleta seletiva realizada por empresa terceirizada foram identificados os municípios de São Paulo, em que o serviço da coleta seletiva é realizado na modalidade porta a porta por empresas contratadas. A Tabela 5-4 apresenta os municípios e o valor de contratual do serviço. O custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por empresas terceirizada nos municípios identificados está entre R\$ 283,00 a R\$1.000,00 por tonelada coletada, o que representa R\$ 574,90/t em média.

Tabela 5-4 - Custo unitário de coleta seletiva porta a porta realizada por empresas terceirizadas.

Municípios (SP)	Custo unitário de CS porta a porta realizada por terceirizadas (R\$/t)
Atibaia	283,00
Charqueada	331,30
Franca	594,00
Jaboticabal	833,20
Pindamonhangaba	456,30
Santa Cruz do Rio Pardo	554,80
São Caetano do Sul	1.000,00
São José dos Campos	546,50
MÉDIA	574,90

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

O cálculo do custo unitário da coleta seletiva em PEV's realizada pela prefeitura foi realizado da mesma forma do cálculo do custo de coleta seletiva porta a porta realizada pela prefeitura. Para isso, buscou-se os municípios do ES em que a coleta

seletiva é realizada na modalidade PEV e executada pela prefeitura sem existência de contratos com empresas contratadas ou OCMRR. O único município identificado foi o de São Mateus – ES, mas não foi identificado no SNIS (2018) o custo de coleta convencional para esse município. Assim, fez-se a mesma busca para os demais municípios da região Sudeste. A Tabela 5-5 apresenta os custos dos municípios dos estados de Minas Gerais e São Paulo com essa configuração. O custo unitário da coleta seletiva na modalidade PEV quando realizada pelas próprias prefeituras nos municípios identificados, varia entre R\$ 165,80/t a R\$ 1.526,92/t, resultando em um custo médio igual a R\$ 546,01/t.

Tabela 5-5 - Custo unitário de coleta seletiva PEV realizada pela prefeitura.

Municípios (MG e SP)	Custo unitário de CS PEV realizada pela prefeitura (R\$/t)
Belo Vale	267,36
Cesário Lange	747,92
Gabriel Monteiro	307,36
Ilha Comprida	1.526,92
Onda Verde	293,16
Parquera-Açu	513,52
Santa Maria da Serra	165,80
MÉDIA	546,01

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

Com relação ao custo unitário da coleta seletiva em PEV's realizada pelas OCMRR, foi identificado que o município de Irupi – ES realiza apenas essa modalidade de coleta seletiva e existe contrato apenas com as OCMRR para executá-la. Sendo assim, foi possível obter o custo unitário do serviço de R\$ 350,00/t.

O custo unitário de coleta seletiva em PEV's realizada por empresas terceirizadas foi obtido a partir do cálculo da média dos municípios Igarapé – MG, São João Evangelista – MG, Monte Mor - SP, Parapuã - SP e Poá - SP, onde a coleta seletiva é realizada apenas na modalidade PEV e por empresa contratada. A Tabela 5-6 apresenta os valores contratuais do serviço para cada município identificado e a média do custo. O custo de coleta seletiva PEV realizado por empresas terceirizadas pode variar de R\$ 100,00 a R\$ 880,00/t, sendo o custo médio igual a R\$ 373,54/t.

Tabela 5-6 –Custo unitário de coleta seletiva PEV realizada terceirizadas.

Municípios (MG e SP)	Custo unitário de CS PEV realizada terceirizadas (R\$/t)
Igarapé	100,00
Monte Mor	172,70
Parapuã	880,00
Poá	415,00
São João Evangelista	300,00
MÉDIA	373,54

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

Para o cálculo do custo unitário coleta seletiva na modalidade mista executada pela própria prefeitura, foram identificados no ES os municípios que a coleta seletiva é realizada de forma mista, ou seja, tanto pela modalidade porta a porta, quanto pela modalidade PEV e que é executada pela prefeitura, sem existência de contratos com empresas contratadas ou OCMRR. A partir disso, o cálculo do custo da coleta seletiva na modalidade mista realizada pela própria prefeitura foi realizado de forma análogo ao das modalidades porta a porta e PEV, ou seja, multiplicando o valor do custo médio da coleta convencional por 4. A Tabela 5-7 mostra os valores do custo unitário de coleta seletiva mista para os municípios identificados. O custo unitário da coleta seletiva na modalidade mista nos municípios identificados varia de R\$ 83,88 a R\$ 731,44/t, sendo o custo médio de R\$ 326,84/t.

Tabela 5-7 – Custo unitário de coleta seletiva mista realizada pela prefeitura.

Municípios (ES)	Custo unitário de CS mista realizada pela prefeitura (R\$/t)
Boa Esperança	333,32
Governador Lindenberg	731,44
Marilândia	158,68
Montanha	83,88
MÉDIA	326,83

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

O custo unitário de coleta seletiva na modalidade mista realizada por OCMRR foi obtido a partir do cálculo da média dos valores de municípios do ES e RJ em que as OCMRR possuem contrato com a prefeitura e realizam a coleta seletiva tanto pela modalidade PEV quanto porta a porta. Os valores dos contratos e a média do custo unitário são apresentados na Tabela 5-8. O custo unitário da coleta seletiva mista realizada por OCMRR nos municípios identificados, variam de R\$ 100,00 a R\$1.000,00 por tonelada coletada, mas a média é R\$398,21/t.

Tabela 5-8 –Custo unitário de coleta seletiva mista realizada por OCMRR

Municípios (ES e RJ)	Custo unitário de CS mista realizada por OCMRR (R\$/t)
Aracruz	449,50
Areal	749,50
Brejetuba	100,00
Iconha	209,90
Itaguaçu	250,00
Paty do Alferes	1.000,00
Pinheiros	100,00
Viana	100,00
Volta Redonda	625,00
MÉDIA	398,21

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (BRASIL, 2018).

Para obtenção do custo unitário de coleta seletiva realizada de forma mista por empresa terceirizada foi calculada a média dos valores contratuais unitários de municípios do ES, RJ e MG. A Tabela 5-9 mostra o custo unitário do serviço para cada município e a média obtida. O custo médio da coleta seletiva mista realizada por empresas terceirizadas é igual a R\$ 602,65/t. Esse custo foi obtido a partir do cálculo da média dos custos unitários de coleta seletiva mista dos municípios identificados, os quais podem variar de R\$101,00 a R\$ 1.000,00/t.

Tabela 5-9 –Custo unitário de coleta seletiva mista realizada por empresas terceirizadas.

Municípios (ES, RJ e MG)	Custo unitário de CS mista realizada por terceirizadas (R\$/t)
Betim	301,80
Campos dos Goytacazes	101,00
Cantagalo	273,60
Cariacica	924,80
Colatina	946,90
Congonhas	700,00
Contagem	1.000,00
Guarani	820,80
Juatuba	859,80
Poços de Caldas	116,00
Vila Velha	437,00
Vitória	750,10
MÉDIA	602,65

Fonte: Elaborado a partir de SNIS (2018)

Por fim, no que diz respeito ao custo de educação ambiental, de acordo com dados da Prefeitura Municipal da Serra (2019), parte dos projetos de educação ambiental executados pela Secretaria de Meio Ambiente da Serra contam com investimento do Fundo Municipal de Meio Ambiente, na média de R\$ 135.000,00/ano. As demais ações e projetos educativos contam com o apoio das empresas licenciadas em cumprimento a condicionante de educação ambiental.

5.3. ETAPA III: VERIFICAÇÃO DA CONFIABILIDADE DO MODELO PROPOSTO

Para verificar a confiabilidade do modelo matemático proposto foram realizados testes utilizando-se o cenário base. Nesta seção serão descritos os resultados obtidos a partir da realização de cada um dos testes estabelecidos.

No teste de conservação física (avaliação da estrutura), verificou-se todas equações do modelo matemático e todos os estoques, a fim de assegurar sua conformidade. Após a verificação foi constatado que todas as equações e todos os estoques estavam

adequados, com relação às realidades físicas básicas. Como exemplo, nenhum estoque estava com valores negativos, satisfazendo o comportamento esperado.

Ao realizar o teste de consistência dimensional, inicialmente foram identificadas diversas inconsistências, as quais foram corrigidas durante a formulação do modelo matemático. Quando todas as inconsistências foram corrigidas, a mensagem de conformidade foi mostrada na tela.

O teste de erro de integração, por sua vez, foi realizado utilizando-se primeiramente o método de integração de Euler e em seguida o de Runge Kutta. A partir disso, foi verificado que o método de Runge Kutta apresentou maior estabilidade numérica, conforme mostrado na Tabela B-1, apresentada no Apêndice B. Diante disso, para execução do modelo matemático proposto neste trabalho, foi selecionado o *time step* de 0,25 (1/4 de ano), conforme sugerido pela literatura (STERMAN, 2000).

No teste de condições extremas, foi verificado o comportamento do modelo matemático quando as variáveis “Taxa de geração RDO *per capita*”, “Geração total de RDO”, “Percentual de coleta seletiva porta a porta”, “Percentual de coleta seletiva PEV”, “Percentual de coleta seletiva mista” e “Custo de aterramento” foram submetidas a condições extremas, conforme mostrado no Quadro 5-3, o qual também apresenta o comportamento esperado para análise e a resposta obtida.

Quadro 5-3 – Comportamento das variáveis submetidas a valores extremos.

Variável	Valor	Comportamento esperado	Resposta
Taxa de geração RDO per capita	0	Inexistência de resíduos coletados e seus efeitos sobre os custos	De acordo
Estoque inicial da Geração total de RDO	0		De acordo
Percentual de coleta seletiva porta a porta	0	Inexistência de resíduos coletados pelas modalidades de coleta seletiva, inexistência de resíduos recicláveis e custo total da coleta seletiva nulo	De acordo
Percentual de coleta seletiva PEV	0		De acordo
Percentual de coleta seletiva mista	0		De acordo
Custo de aterramento	679,90	Aumento do custo total de disposição final e do custo total de gerenciamento de RDO	De acordo

Fonte: Autoria própria

Conforme observado no Quadro 5-3, ao realizar as simulações considerando as variáveis “Taxa de geração RDO *per capita*” e “Geração total de RDO” iguais a zero, a quantidade de resíduos coletados pela coleta convencional e pela coleta seletiva também foi nula, não havendo resíduos domiciliares para serem coletados. Da mesma forma, sob essa condição, os custos associados à coleta convencional, coleta seletiva

e disposição final em aterros sanitários também foram nulos, o que satisfaz o comportamento esperado.

Analogamente, nas simulações em que as variáveis “Percentual de coleta seletiva porta a porta”, “Percentual de coleta seletiva PEV” e “Percentual de coleta seletiva mista” foram submetidas à zero, os estoques de resíduos coletados por cada uma das modalidades de coleta seletiva também foram iguais a zero e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos recicláveis também foi nula, assim como o custo total da coleta seletiva. Esse comportamento também satisfaz o esperado.

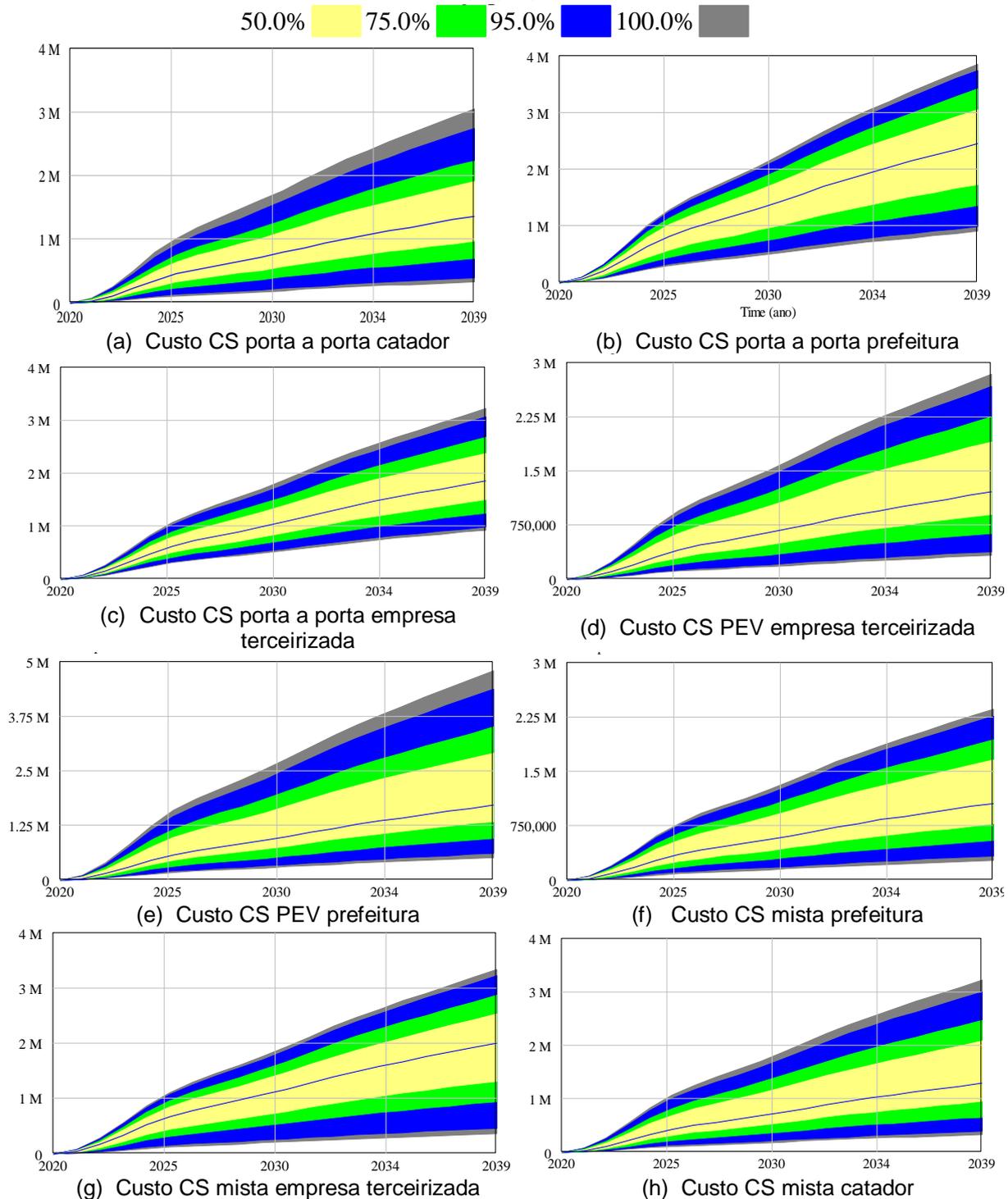
A variável “Custo de aterramento”, por sua vez, foi submetida a um valor de R\$ 679,90, o equivalente a 10 vezes do seu valor inicial. Sob essa condição, o custo total de disposição final e o custo total de gerenciamento de RDO também aumentaram quando comparado com seu valor inicial, conforme esperado. Sendo assim, pode-se afirmar que todas as variáveis que foram submetidas a condições extremas, apresentaram comportamentos conforme o esperado, o que corrobora para a confiabilidade da estrutura do modelo de dinâmica de sistemas proposto.

Ao realizar o teste de adequação de limites, não foi identificado nenhum parâmetro de entrada externo ao modelo que deveria ser convertido como variável interna do modelo, assumindo assim que os limites das fronteiras do modelo de dinâmica de sistemas estão adequados ao objetivo.

Os testes descritos anteriormente foram realizados utilizando-se o cenário base, enquanto o teste de análise de sensibilidade foi realizado utilizando-se o cenário 25, pois ele engloba todas as modalidades e agentes executoras de coleta seletiva, o que garantirá a verificação da sensibilidade de todos os custos que apresentaram valores variáveis.

Como resultado da análise de sensibilidade, que realiza várias simulações automaticamente para verificar quão sensíveis são os resultados do modelo às mudanças nos parâmetros que são variáveis, foram gerados gráficos que mostram os limites de confiança - 50%, 75%, 95% e 100% - para todos os valores de saída, que foram gerados quando os parâmetros de entrada foram variados aleatoriamente sobre suas distribuições. A Figura 5-4 apresenta os gráficos resultantes da análise de sensibilidade para os custos de cada modalidade de coleta seletiva.

Figura 5-4 – Resultado da análise de sensibilidade para os custos de cada modalidade de coleta seletiva.



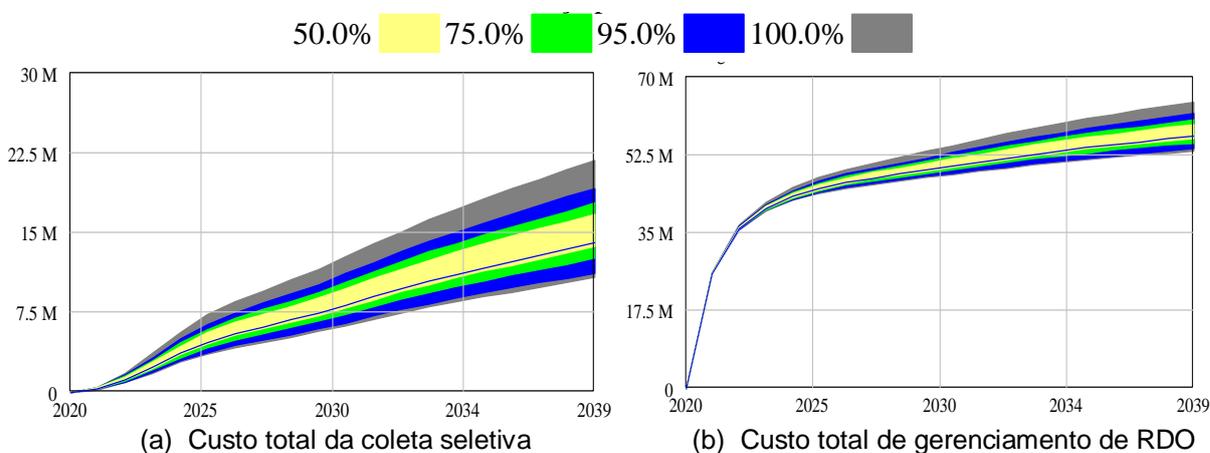
Fonte: Autoria própria

Conforme pode ser observado na Figura 5-4, a linha azul dos gráficos mostra o resultado dos custos simulados no cenário base, ou seja, com os valores das constantes inseridas no modelo matemático. Observa-se que em todos os casos a

linha está localizada na faixa de 50% de ocorrência, indicando que os valores adotados estão entre os 50% que ocorrem com mais frequência.

Em torno dessa linha, as áreas coloridas mostram a distribuição de probabilidade dos custos. Nota-se que os limites extremos de probabilidade de ocorrência dos custos implicam em uma faixa de variação de cerca de R\$ 2 milhões a R\$ 3 milhões por ano, o que implica nos resultados das variáveis “Custo total da coleta seletiva” e “Custo total de gerenciamento de RDO”. A Figura 5-5 mostra o resultado da análise de sensibilidade para essas variáveis.

Figura 5-5 - Resultado da análise de sensibilidade para o custo total de coleta seletiva e custo total gerenciamento de RDO.



Fonte: Autoria própria

Apesar de toda variação causada pela incerteza nos dados de entrada, a Figura 5-6, mostra que a possível variação no custo total de gerenciamento de RDO é menor do que o custo total de coleta seletiva. Com relação aos limites externos de incerteza (100%) a Figura 5-5a mostra valores máximos do custo total de coleta seletiva de aproximadamente R\$ 22 milhões por ano e valores mínimos de aproximadamente R\$ 10 milhões por ano, ao final da simulação. Na Figura 5-5b, por sua vez, os limites externos de incerteza mostram valores máximos do custo total de gerenciamento de RDO em torno de R\$ 60 milhões/ano (R\$ 94,50/hab/ano) e valores mínimos próximos a R\$ 52 milhões/ano (R\$ 81,90/hab/ano). Isso reflete que, devido a variação dos custos unitários de coleta seletiva das diferentes modalidades e agentes executores, o custo total de gerenciamento de RDO poderia ser alterado para valores superiores ou inferiores.

Portanto, a análise de sensibilidade verificou e mensurou o impacto da incerteza de cada variável de custo. O controle e acompanhamento destes custos se faz importante visto seu significativo impacto ao longo dos anos nos resultados dos custos totais da coleta seletiva.

5.4. ETAPA IV: COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS DE ESTUDO SOBRE O CUSTO DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO MUNICÍPIO DA SERRA

5.4.1. Descrição dos cenários simulados

Foram definidos 26 cenários a partir do cenário 1, estabelecido como “cenário base”. Nos demais cenários foram modificadas apenas as variáveis para análise de acordo com o objetivo estabelecido. No cenário base, os parâmetros das variáveis de entrada, foram estabelecidos de acordo com dados que refletem a situação atual do município da Serra – ES. Sendo assim, considerou-se que a cobertura da coleta seletiva permaneceria constante (0,71% dos resíduos coletados) ao longo dos 20 anos, ou seja, não haveria implementação de uma política de ampliação da coleta seletiva. Da mesma forma, foi considerado que não haveria implementação de uma política de educação ambiental visando a redução de rejeitos por meio da segregação na fonte geradora e disponibilização dos resíduos recicláveis conforme o planejamento da coleta municipal. Conseqüentemente, o percentual de rejeitos não seria reduzido.

Com relação às modalidades de coleta seletiva, a Tabela 5-10 mostra os percentuais de coleta seletiva para cada modalidade no cenário base, os quais foram obtidos a partir da interpretação de Aderes (2017), específicos para o município da Serra/ES.

Tabela 5-10 - Percentuais de massa de resíduo coletada para cada modalidade de coleta seletiva no município da Serra.

Modalidades	Percentual coletado
Coleta seletiva porta a porta	11,10%
Coleta seletiva PEV	13,90%
Coleta seletiva mista	75,00%

Fonte: Elaborado a partir de Aderes (2017)

No que diz respeito aos agentes executores da atividade de coleta seletiva, foi estabelecido como premissa neste trabalho que na modalidade de coleta porta a porta é realizada 100% por catadores formalizados ou não em OCMRR. A prefeitura

municipal realiza 100% a coleta da modalidade PEV e, por fim, a modalidade mista é realizada 80% pela prefeitura e 20% pelos catadores, conforme percebido em entrevistas às OCMRR existentes no município. Com base nas considerações apresentadas, percebe-se no Quadro 5-4 um resumo dos 26 cenários propostos, onde os parâmetros modificados em cada cenário estão destacados na cor cinza.

Quadro 5-4 – Resumo dos cenários para simulação do modelo de dinâmica de sistemas.

Objetivo	Cenário	Políticas públicas			Modalidades coleta seletiva			Agente executor das modalidades de coleta seletiva								
		Política de ampliação coleta seletiva	Política de educação ambiental	Rejeitos	% CS PP	% CS PEV	% CS MI	% CS PP - P	% CS PP - C	% CS PP - ET	% CS PEV - P	% CS PEV - C	% CS PEV - ET	% CS MI - P	% CS MI - C	% CS MI - ET
Estabelecer cenário base	1	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
Verificar impacto da política de ampliação da coleta seletiva	2	Parcialmente efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	3	Totalmente efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
Verificar impacto da política de educação ambiental	4	Não efetiva	Parcialmente efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	5	Não efetiva	Parcialmente efetiva	Intermediário	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	6	Não efetiva	Parcialmente efetiva	Rápido	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	7	Não efetiva	Totalmente efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	8	Não efetiva	Totalmente efetiva	Intermediário	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	9	Não efetiva	Totalmente efetiva	Rápido	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
Verificar impacto das	10	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,33	0,33	0,34	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0

Quadro 5-4 – Resumo dos cenários para simulação do modelo de dinâmica de sistemas.

Objetivo	Cenário	Políticas públicas			Modalidades coleta seletiva			Agente executor das modalidades de coleta seletiva								
		Política de ampliação coleta seletiva	Política de educação ambiental	Rejeitos	% CS PP	% CS PEV	% CS MI	% CS PP - P	% CS PP - C	% CS PP - ET	% CS PEV - P	% CS PEV - C	% CS PEV - ET	% CS MI - P	% CS MI - C	% CS MI - ET
modalidades de coleta seletiva	11	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,75	0,139	0,111	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	12	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,75	0,139	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	13	Não efetiva	Não efetiva	Lento	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	14	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	15	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0,8	0,2	0
Verificar o impacto dos diferentes agentes executores da coleta seletiva porta a porta	16	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	1	0	0	1	0	0	0,8	0,2	0
	17	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	0	1	1	0	0	0,8	0,2	0
	18	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0,33	0,33	0,34	1	0	0	0,8	0,2	0
Verificar o impacto dos diferentes agentes executores da	19	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	0	1	0	0,8	0,2	0
	20	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	0	0	1	0,8	0,2	0

Quadro 5-4 – Resumo dos cenários para simulação do modelo de dinâmica de sistemas.

Objetivo	Cenário	Políticas públicas			Modalidades coleta seletiva			Agente executor das modalidades de coleta seletiva								
		Política de ampliação coleta seletiva	Política de educação ambiental	Rejeitos	% CS PP	% CS PEV	% CS MI	% CS PP - P	% CS PP - C	% CS PP - ET	% CS PEV - P	% CS PEV - C	% CS PEV - ET	% CS MI - P	% CS MI - C	% CS MI - ET
coleta seletiva PEV	21	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	0,33	0,33	0,34	0,8	0,2	0
Verificar o impacto dos diferentes agentes executores da coleta seletiva mista	22	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0	0,8	0,2
	23	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,2	0	0,8
	24	Não efetiva	Não efetiva	Lento	0,111	0,139	0,75	0	1	0	1	0	0	0,33	0,33	0,34
Verificar o impacto da implementação de todas as políticas	25	Parcialmente efetiva	Parcialmente efetiva	Intermediário	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	0,34	0,33	0,33	0,34
	26	Totalmente efetiva	Totalmente efetiva	Rápido	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0,8	0,2	0

Fonte: Autoria própria. PP: Porta a porta; PEV: Ponto de Entrega Voluntária; MI: Mista; P: Prefeitura; C: Catador; ET: Empresa terceirizada.

Para verificar o impacto da política de ampliação da coleta seletiva, foram definidos dois cenários (Cenários 2 e 3), conforme apresentado no Quadro 5-4. A definição da ampliação da cobertura de coleta seletiva se deu a partir das metas de ampliação da cobertura de coleta seletiva estabelecidas no Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES), conforme mostrado no Quadro 5-5.

Quadro 5-5 – Metas de ampliação da cobertura da coleta seletiva (% da população atendida) propostas no horizonte de implementação do PERS-ES

Meta	Atual	2023	2027	2031	2035	2039
Ampliação da cobertura da coleta seletiva (% da população)	28,15%	40%	55%	70%	85%	100%

Fonte: Espírito Santo (2019)

De acordo com as metas estabelecidas no PERS-ES, espera-se que, em 20 anos, 100% da população seja atendida pela coleta seletiva no Espírito Santo (Quadro 5-5). Para o modelo matemático proposto foi utilizada a cobertura da coleta seletiva com relação à massa de resíduos coletada. Nesse sentido, estudos indicam que cerca de 30% dos resíduos gerados são secos e recicláveis, considerados passíveis de reaproveitamento e reciclagem (SILVA, 2017; DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018; ZHANG *et al.*, 2019). Dessa forma, o Quadro 5-6 apresenta a sugestão utilizada neste trabalho para as metas de ampliação da cobertura da coleta seletiva para o município da Serra – ES, nos casos em que a política seja totalmente implementada, parcialmente implementada e quando não é implementada.

Quadro 5-6 – Metas de ampliação da coleta seletiva (% da massa coletada) para o município da Serra – ES.

Meta	Atual	2023	2027	2031	2035	2039
Política de ampliação da coleta seletiva totalmente implementada (% da massa coletada)	0,71%	12%	17%	21%	26%	30%
Política de ampliação da coleta seletiva parcialmente implementada (% da massa coletada)	0,71%	6%	8%	11%	13%	15%
Política de ampliação da coleta seletiva não implementada (% da massa coletada)	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%	0,71%

Fonte: Autoria própria

Conforme observa-se no Quadro 5-6, para a hipótese de implementação totalmente efetiva de uma política de ampliação da coleta seletiva (Cenário 2), espera-se que o município da Serra – ES consiga atingir em 20 anos uma cobertura de coleta seletiva de 30% em massa do resíduo total gerado no município, sendo equivalente a cobertura da coleta seletiva de 100% da população. Para a hipótese da política implementada seja parcialmente efetiva (Cenário 3), espera-se que em 20 anos a

cobertura de coleta seletiva chegue a 15% do total de resíduo gerado. As equações para cada um desses cenários podem ser verificadas no Quadro A-2 apresentado no Apêndice A.

Da mesma forma, para verificar o impacto da implementação da política de educação ambiental, foram verificados três casos: quando a implementação da política é totalmente efetiva, parcialmente efetiva e não efetiva. Para isso, assumiu-se que quando a política de educação ambiental é parcialmente efetiva, a influência no percentual rejeitos seria de 50%. Quando considerou-se que a política de educação ambiental é totalmente efetiva, a influencia no percentual de rejeitos seria de 100% do estabelecido. Estas considerações foram incorporadas pela função “Ramp”, cuja finalidade é alterar o valor de uma variável, de forma abrupta ou suavemente ao longo do tempo de simulação, dada uma inclinação definida entre intervalos de tempo. As equações para cada um desses cenários estão descritas no Quadro A-2 apresentado no Apêndice A.

A influência da política de educação ambiental na redução dos percentuais de rejeito das modalidades de coleta seletiva, por não ser uma variável quantitativa, foi representada por curvas de aprendizagem S, que representam esse comportamento, conforme metodologia utilizada por Ghisolfi *et al.* (2017) e Fontoura; Chaves; Ribeiro (2019). As curvas S variam dependendo da implantação temporal da variável chave, ou seja, a educação ambiental, por meio da função Ramp, conforme descrito anteriormente.

Cada modalidade de coleta seletiva possui um percentual de rejeitos diferente, sendo assim foram elaboradas três curvas. Considerou-se que os valores atuais de rejeitos da área de estudo, foram obtidos quando não havia política de educação ambiental implementada. No que diz respeito à relação do percentual de rejeito com implementação total de uma política pública de educação ambiental, foi utilizado como base o estudo realizado por Parreira (2010). O autor verificou que com a implementação de uma política de educação ambiental, o percentual de rejeitos reduziu em 76%. Sendo assim, foi considerado que com 100% de implementação da política de educação ambiental, o percentual inicial de rejeito reduziria em 76%. Por outro lado, quando 50% da política de educação fosse implementada, considerou-se que o percentual inicial de rejeitos iria reduzir também em 50% do inicial. A Tabela

5-11 mostra os valores dos percentuais de rejeito em função da implementação da política de educação ambiental, variando de 0 a 1.

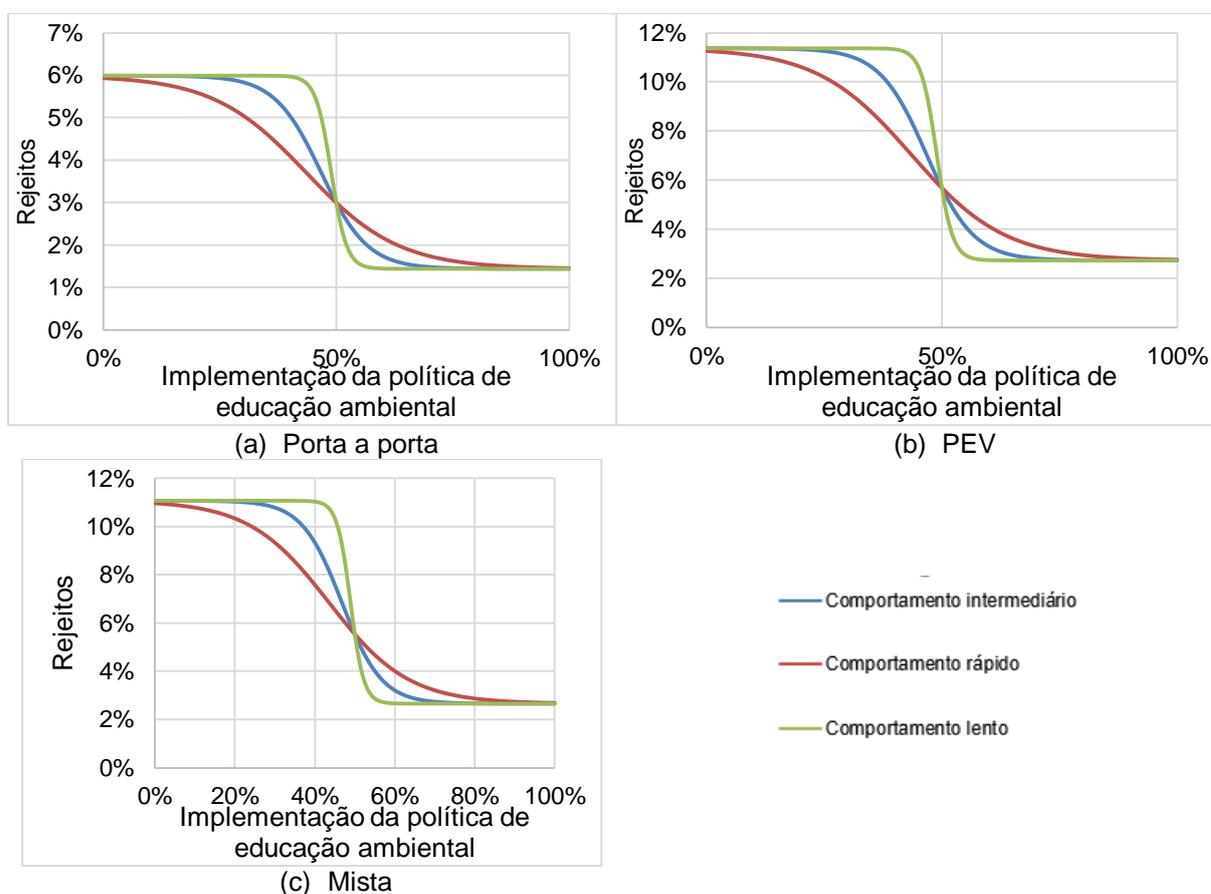
Tabela 5-11 - Percentuais de rejeitos para cada modalidade de coleta seletiva em função da política de educação ambiental

Modalidade de coleta seletiva	Cenário base	PEA parcialmente efetiva	PEA totalmente efetiva
Porta a porta	0,0599	0,0300	0,0144
PEV	0,1137	0,0569	0,0273
Mista	0,1107	0,0554	0,0266

Fonte: Autoria própria. PEA: Política de Educação Ambiental

A partir das informações apresentadas na Tabela 5-11, foram calculadas as equações dos percentuais de rejeito, que podem ser verificadas no Quadro A-3 do Apêndice A. A partir das equações apresentadas no Quadro A-3 foi possível obter as curvas S de aprendizagem que mostram o impacto da política de educação ambiental no percentual de rejeitos para as modalidades de coleta seletiva porta a porta, PEV e mista, conforme observa-se na Figura 5-6.

Figura 5-6 - Curva "S" da influência da política de educação ambiental no percentual de rejeito da coleta seletiva porta a porta (a), PEV (b) e mista (c).



Fonte: Autoria própria

A partir da implementação da política de educação ambiental, a redução dos rejeitos poderá ocorrer de forma lenta, intermediário ou rápida, conforme observado na Figura 5-6. Como já descrito anteriormente, no cenário base, considerou-se que a implementação da política de educação ambiental não foi efetiva. Nos cenários 4, 5 e 6 foi considerada uma política de educação ambiental parcialmente efetiva (atingindo 50%) com comportamento lento, intermediário e rápido, respectivamente. Nos cenários 7, 8 e 9 considerou-se uma implementação da política de educação ambiental totalmente efetiva (atingindo 100%) com comportamento lento, intermediário e rápido, respectivamente.

No que diz respeito ao impacto das modalidades de coleta seletiva, foram definidos os cenários de 10, 11, 12, 13, 14 e 15. Para cada cenário foi variado o percentual de coleta seletiva nas modalidades porta a porta, PEV e mista, conforme mostrado no Quadro 5-4. No cenário base, a modalidade mista é priorizada. Dessa forma, os percentuais das modalidades foram variados de forma que nos outros cenários fosse priorizada a modalidade porta a porta, priorizada a modalidade PEV, considerando que as três modalidades fossem realizadas na mesma proporção e, por fim, considerando que cada uma das modalidades fosse realizada de forma exclusiva.

Para cada uma das modalidades de coleta seletiva, foi verificado ainda o impacto do percentual de coleta seletiva realizado pelos agentes executores da atividade: prefeitura, catadores e empresas terceirizadas. Nos cenários 16, 17 e 18 variou-se os percentuais para cada agente executor, avaliando quando a coleta seletiva porta a porta é realizada exclusivamente pela prefeitura, exclusivamente por empresa terceirizada ou realizada pelos três agentes executores de forma igual, conforme apresentado no Quadro 5-4. De forma análoga, nos cenários 19 a 24, foram variados os percentuais para cada agente executor das modalidades de coleta seletiva PEV e mista.

No Cenário 25 foi verificado o impacto de uma governança parcial, ou seja, onde o município realizaria o planejamento, acompanhamento e implementação das políticas públicas e demais estratégias de forma parcial, sem alcançar as metas estabelecidas e sem considerar todas as possibilidades de melhoria e otimização para a localidade. Nesse caso, a implementação das políticas de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental ocorreriam de forma parcialmente efetiva, ou seja, atingindo 50%

do estabelecido. As modalidades de coleta seletiva, assim como o percentual realizado por cada agente executor seriam realizados de forma proporcional, refletindo em falta de otimização para se utilizar as opções mais adequadas a localidade.

Por fim, no Cenário 26 foi verificado o impacto de uma governança total. Nesse caso, os gestores municipais realizariam o planejamento e implementação das políticas públicas atendendo às metas estabelecidas. Além disso, seriam feitas escolhas de estratégias que se adequassem melhor à localidade, de forma a otimizar os serviços. Dessa forma, nesse cenário considerou-se que a implementação das políticas de ampliação da coleta seletiva e de educação ambiental seriam totalmente efetivas, atingindo seu máximo conjuntamente. A coleta seletiva chegaria a 30% em massa de resíduos coletados e a educação ambiental reduziria os rejeitos em 76%. Na governança total, as modalidades de coleta seletiva são definidas a partir de um planejamento, onde foram priorizadas as modalidades e agentes executores de menor custo para a prefeitura.

No tópico a seguir serão apresentados os resultados e análise das simulações de todos os cenários propostos.

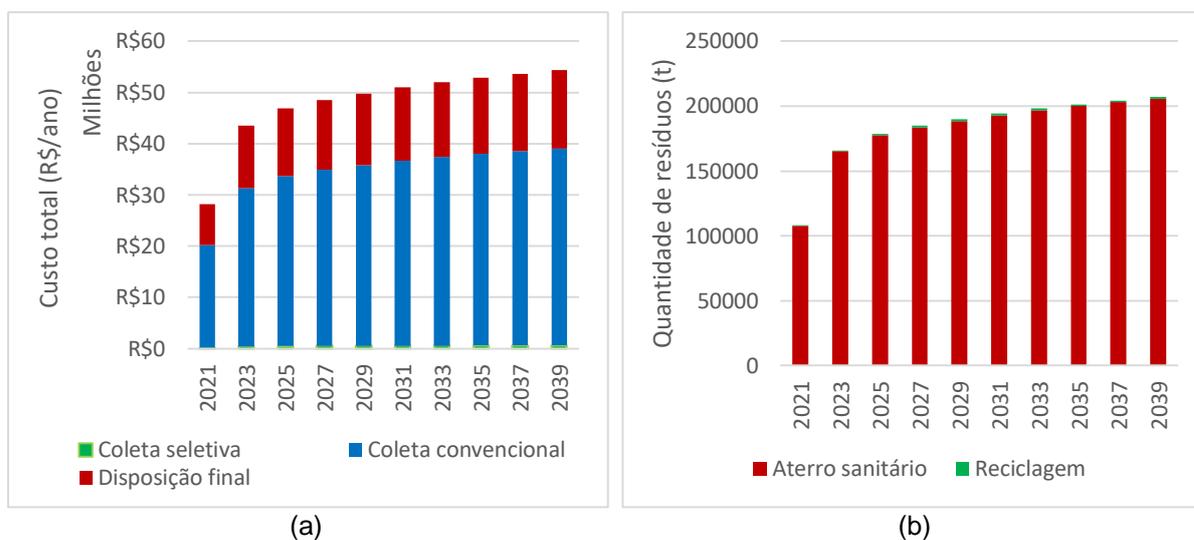
5.4.2. Resultados da simulação e análise dos cenários

5.4.2.1. Cenário Base

O cenário 1, definido como cenário base, foi idealizado com o objetivo de ilustrar como seria a situação do município da Serra – ES, considerando a manutenção de uma tendência de dificuldade em ampliar a coleta seletiva e implementar a política de educação ambiental ao longo de 20 anos de planejamento, contribuindo no custo total de gerenciamento de RDO. Esse cenário considera uma perpetuação da disposição final como principal forma de destinação dos RSU e serve de base para avaliação das propostas incluídas nos demais cenários simulados. Isso permitiu verificar o impacto das estratégias propostas e simuladas em cada cenário em comparação ao base.

A Figura 5-7a mostra o resultado da simulação do cenário base para os custos de coleta seletiva, convencional e disposição final, os quais compõem o custo total de gerenciamento de RDO e a Figura 5-8b apresenta a quantidade de rejeitos enviados para aterro sanitário e de resíduos recicláveis no cenário base.

Figura 5-7 - Custo total da coleta seletiva, coleta convencional e disposição final (a) e quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário e para reciclagem (b) para a prefeitura entre 2020 e 2039 no Cenário base.



Fonte: Autoria própria. RRT: Resíduos Recicláveis Totais

Como pode ser visto na Figura 5-7a, no Cenário base, conforme esperado, os custos de coleta convencional, representaram a maior parte do custo total de gerenciamento de RDO pela prefeitura municipal, descrevendo o equivalente a 71% deste. O custo da coleta seletiva, por sua vez, representou apenas 1% do custo total de gerenciamento. Esse resultado corrobora com a literatura, a qual já alertava para a magnitude que os custos de coleta de resíduos podem ser responsáveis por até 60% a 70% do custo total de gerenciamento de resíduos sólidos nos países em desenvolvimento (HOORNWEG; BHADA-TATA, 2012; DI MARIA; MICALE, 2014; D'ONZA; GRECO; ALLEGRINI, 2016; COLVERO *et al.*, 2020).

Conforme observa-se na Figura 5-7b, a maior parte dos resíduos gerados no município, cerca de 99,37%, é coletada convencionalmente e segue para disposição final em aterro sanitário. Nesse cenário, a coleta convencional que possuía um custo unitário de R\$ 187,09/t para a prefeitura atingiu, ao final dos 20 anos de simulação, um valor de R\$ 38,5 milhões no ano de 2039. Esse valor é superior ao valor gasto com a coleta de resíduos domiciliares e públicos no ano de 2018 pela prefeitura da Serra/ES, que chegou a R\$ 22,1 milhões (BRASIL, 2019). No entanto, é esperado que ao longo dos anos os custos aumentem, de acordo com reajustes. Além disso, o valor verificado para o município em 2018 engloba os resíduos domiciliares e públicos, enquanto que nesse trabalho foram considerados apenas os resíduos domiciliares.

O custo unitário de coleta seletiva foi de R\$ 412,03/t e, embora seja maior do que o da coleta convencional, o custo total da coleta seletiva representou apenas 1% do custo total de gerenciamento de RDO, chegando ao final dos 20 anos em R\$ 605,56 mil. Entretanto, vale ressaltar que nesse cenário, apenas 1.469,71t seriam coletados em sistemas de coleta seletiva (0,71% dos resíduos gerados), enquanto 205.531,94t de resíduos seriam coletados convencionalmente e seguiriam para disposição final em aterro sanitário (Figura 5-7b). O custo de disposição final em aterros sanitários igual a R\$ 74,23/t, por sua vez, representou 28% do custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal no cenário base, totalizando cerca de R\$ 15,27 milhões no ano de 2039.

Por fim, o custo total de gerenciamento de RDO, que consiste na soma dos custos de coleta convencional, coleta seletiva e disposição final, atingiria um valor anual de R\$ 54,33 milhões, no ano de 2039. Esse valor é muito inferior ao valor das despesas com SLUMRS no município da Serra/ES em 2018, que foi de R\$ 109,30 milhões (BRASIL, 2019). Entretanto, o valor indicado pela prefeitura inclui a coleta de resíduos domiciliares e públicos, a coleta de resíduos de saúde, a varrição de logradouros públicos e demais serviços, inclusive administrativos e com unidade de processamento. Dessa forma, não é adequado para ser comparado com o valor encontrado na simulação.

Com relação aos custos *per capita*, no cenário base foi verificado ao final dos 20 anos, um custo de gerenciamento de RDO de R\$ 85,56/habitante. Essa valor está aquém do valor verificado para o município da Serra/ES no ano de 2018, de R\$ 216/habitante, assim como para o valor médio do Espírito Santo e do Brasil, de R\$ 149,50/habitante e R\$ 130,47/habitante, respectivamente (BRASIL, 2019). Conforme explicado anteriormente, outras atividades de gerenciamento de RSU estão inclusas nas despesas apresentadas no SNIS, ao passo que nessa pesquisa foram consideradas apenas as atividades de coleta convencional e coleta seletiva de RDO e disposição final dos rejeitos em aterros sanitários.

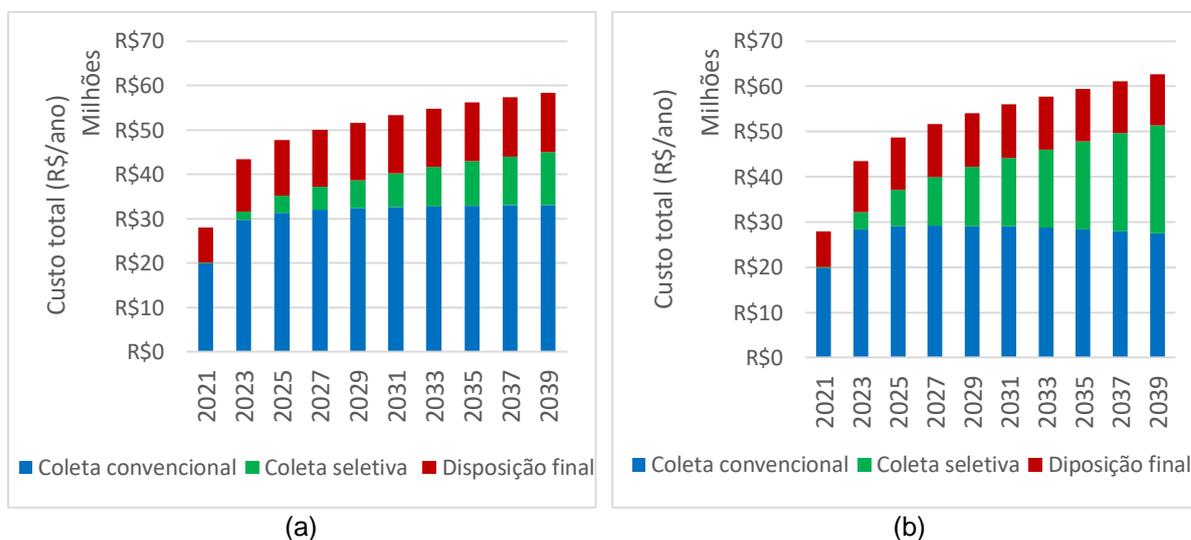
5.4.2.2. Política de ampliação da cobertura da coleta seletiva, modalidades e agentes executores da coleta seletiva

Os Cenários 2 e 3 tiveram como finalidade analisar o impacto da política de ampliação da coleta seletiva no custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal

da Serra/ES. Assim, foram verificadas duas situações, no caso em que a implementação da política de ampliação da coleta seletiva seria parcialmente efetiva, chegando a um percentual de coleta seletiva de 15% dos resíduos gerados em 20 anos e quando a implementação da política de ampliação da coleta seletiva fosse totalmente efetiva, atingindo um percentual de coleta seletiva de 30% dos resíduos gerados em 20 anos, conforme estipulado pelo PERS. As variáveis referentes à política de educação ambiental, modalidades e agentes executores da coleta seletiva foram mantidas iguais a do Cenário base.

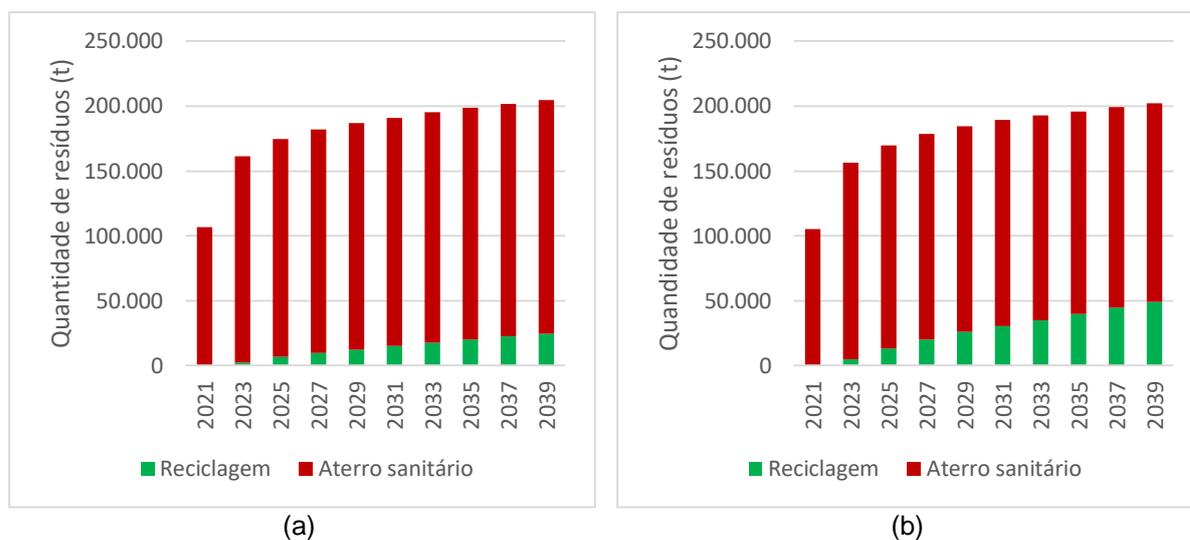
A Figura 5-8 e a Figura 5-9 apresentam os resultados do impacto da ampliação da coleta seletiva para 15% e 30% de cobertura da coleta seletiva em massa de resíduo nos custos de coleta convencional, coleta seletiva e disposição final e na quantidade de resíduos enviada para aterro sanitário e desviada para a reciclagem, respectivamente.

Figura 5-8 - Impacto da ampliação da coleta seletiva de 0,71% para 15% (a) e 30% (b) nos custos de coleta convencional, coleta seletiva e disposição final para a prefeitura municipal ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria

Figura 5-9 - Impacto da ampliação da coleta seletiva de 0,71% para 15% (a) e 30% (b) na quantidade de rejeitos enviados para aterro sanitário e resíduos recicláveis desviados para reciclagem ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. RRT – Resíduos recicláveis totais

As Figuras 5-8a e 5-8b mostram que com a ampliação da cobertura de coleta seletiva de 0,71% para 15% e 30% dos resíduos gerados, o custo total de gerenciamento de RDO, que consiste na soma dos custos de coleta convencional, seletiva e disposição final, obteve um aumento, atingindo no ano de 2039 um valor de R\$ 58 milhões e R\$ 62 milhões, respectivamente, equivalente a um aumento de 7,52% e 15,43% com relação ao Cenário base.

Esses resultados corroboram com o verificado por Chifari *et al* (2017), os quais afirmaram que um aumento de 1% na coleta seletiva pode resultar em um aumento de 0,4% nos custos totais de gerenciamento de RSU. Paes *et al.* (2020) também relataram um aumento nos custos totais de gerenciamento em função da ampliação da coleta seletiva e reciclagem. Com relação à população urbana, foram verificados custos de gerenciamento de RDO *per capita* de R\$ 91,99/habitante/ano e R\$ 98,76/habitante/ano. De forma análoga ao cenário base, esses custos estão abaixo da média estadual e nacional, assim como do valor indicado para o município da Serra/ES no ano de 2018 (BRASIL, 2019).

O aumento do custo de gerenciamento se deu devido ao aumento do custo total da coleta seletiva, o qual ocorreu devido à ampliação da cobertura da coleta seletiva que se traduz em aumento da quantidade de resíduos recicláveis enviados para reciclagem (Figura 5-10). Com um custo unitário de coleta seletiva de cerca de R\$

412,03/t, verificou-se que no cenário base, o custo total de coleta seletiva representava 1% do custo total de gerenciamento. A partir do aumento da cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos de 0,71% para 15%, o custo total de coleta seletiva passou a representar 20% do custo total de gerenciamento de RDO. Esse aumento na coleta seletiva representou a quantidade de resíduos enviados para a reciclagem, que passou de 0,63% para 12,07% do total de resíduos gerados. Quando a ampliação da coleta seletiva atingiu 30%, o custo total de coleta seletiva passou a representar 38% do custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal. A quantidade de resíduos enviados para reciclagem, por sua vez, chegou a 24,37% dos resíduos gerados.

Com relação à quantidade de resíduos enviados para reciclagem, ao comparar com o Cenário base, a ampliação da coleta seletiva para 15% proporcionou um aumento de 72% nos primeiros anos, chegando a ser 1802% maior no final dos 20 anos. Com a ampliação da coleta seletiva para 30%, a quantidade de resíduos recicláveis teria um aumento de 154% nos primeiros anos, chegando a ser 3695% em 2039. Esses resultados estão em conformidade com o verificado por Dutra, Yamane e Siman (2020), que constataram um crescimento de 233% na quantidade de resíduos sólidos recicláveis a partir de um aumento da cobertura de coleta seletiva de 15% para 50%. Simonetto *et al.* (2014) também verificaram um crescimento expressivo de 153% na quantidade de recicláveis com o aumento da coleta seletiva.

No que diz respeito ao aumento do custo da coleta seletiva, o resultado já era esperado e foi verificado por outros autores. Maalouf; Di Maria e El-Fadel (2020), por exemplo, constataram que com o aumento da coleta seletiva de 13% para 68%, os custos de coleta seletiva aumentaram em 44% (MAALOUF; DI MARIA; EL-FADEL, 2020). Em contrapartida, a medida que a cobertura da coleta seletiva aumenta, os custos totais de coleta convencional e de disposição final diminuem (PINHA; SAGAWA, 2020).

No cenário base, o custo total de coleta convencional em 2039 chegou ao valor de R\$38,45 milhões, representando 71% do custo total de gerenciamento. Quando a cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos coletados atingiu 15% esse valor diminuiu 13,89%, custando cerca de R\$33,11 milhões em 2039, o equivalente a 57% do custo total de gerenciamento de RDO. Por fim, quando a cobertura da coleta

seletiva em massa de resíduos atingiu 30%, a coleta convencional chegou ao valor R\$27,47 milhões em 2039, representando 44% do custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal e sendo 28,49% menor do que no Cenário base.

Com relação à disposição final em aterro sanitário, observou-se uma redução na quantidade de resíduos dispostos em aterro à medida que a coleta seletiva é ampliada (Figuras 5-9a e 5-9b). Enquanto no cenário base cerca de 99% dos resíduos coletados eram enviados para aterro sanitário, com o aumento da cobertura da coleta seletiva para 15% e 30%, esse percentual reduziu para 87,93% e 75,63%, respectivamente. Paralelamente, o custo total de disposição final que representava 28% do custo total de gerenciamento no cenário base, passou a representar 23% e 18% em detrimento do aumento da cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos coletados de 0,71% para 15% e 30%, respectivamente.

No entanto, esses valores ainda estão muito longe das metas estabelecidas pelas legislações. O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo, por exemplo, estabelece como meta a redução de resíduos recicláveis secos dispostos em aterros em 50% entre 16 e 20 anos (ESPÍRITO SANTO, 2019). Em países europeus a meta é de que a reutilização e reciclagem seja de, no mínimo, 55% do total de resíduos gerados até o ano de 2025, aumentando para 60% até 2030 e 65% até 2035 (UE, 2018). Portugal, por sua vez, estabeleceu que até 2035, somente poderão ser depositados em aterros sanitários até 10% dos RSU que não puderam ser valorizados (APA, 2019).

Diante disso, fica evidente que as metas de ampliação da coleta seletiva no município da Serra não seriam suficientes para atender às metas de desvios de resíduos recicláveis do aterro sanitário para reciclagem. Muitos países desenvolvidos já atingiram essas metas ou estão bem próximos, mas países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, enfrentam dificuldades financeiras, falta de tecnologias de gerenciamento, capacidade inadequada das estruturas institucionais, barreiras para separação de resíduos na fonte gerada, entre outros (MMEREKI; BALDWIN; LI, 2016; SAUVE; ACKER, 2020), o que resulta em maior lentidão para atingimento das metas.

Os municípios podem escolher a modalidade de coleta seletiva a ser implementada na localidade e o agente executor responsável pela atividade, o que irá influenciar diretamente no custo total de coleta seletiva e, conseqüentemente, no custo total de

gerenciamento de RDO para a prefeitura. Nesse sentido, foram definidos 6 cenários para verificar o impacto das diferentes modalidades (Cenários 10 a 15) e 9 cenários para verificar o impacto dos agentes executores da coleta seletiva (Cenários 16 a 24).

Para cada cenário relacionado às modalidades de coleta seletiva foram simulados os seguintes percentuais de resíduos coletados: Cenário 10 (porta a porta 33%, PEV 33% e mista 33%), Cenário 11 (porta a porta 75%, PEV 13,9% e mista 11,1%), Cenário 12 (porta a porta 11,1%, PEV 75% e mista 13,9%), Cenário 13 (porta a porta 100%), Cenário 14 (PEV 100%), Cenário 15 (mista 100%). É importante ressaltar que nesses cenários, a cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos coletada permanece igual à do Cenário base (0,71%), assim como os percentuais coletados pelos agentes executores permanecem iguais ao do cenário base, sendo a coleta porta a porta realizada apenas por catadores, a coleta PEV realizada somente pela própria prefeitura e a coleta mista realizada 80% pela prefeitura e 20% por catadores.

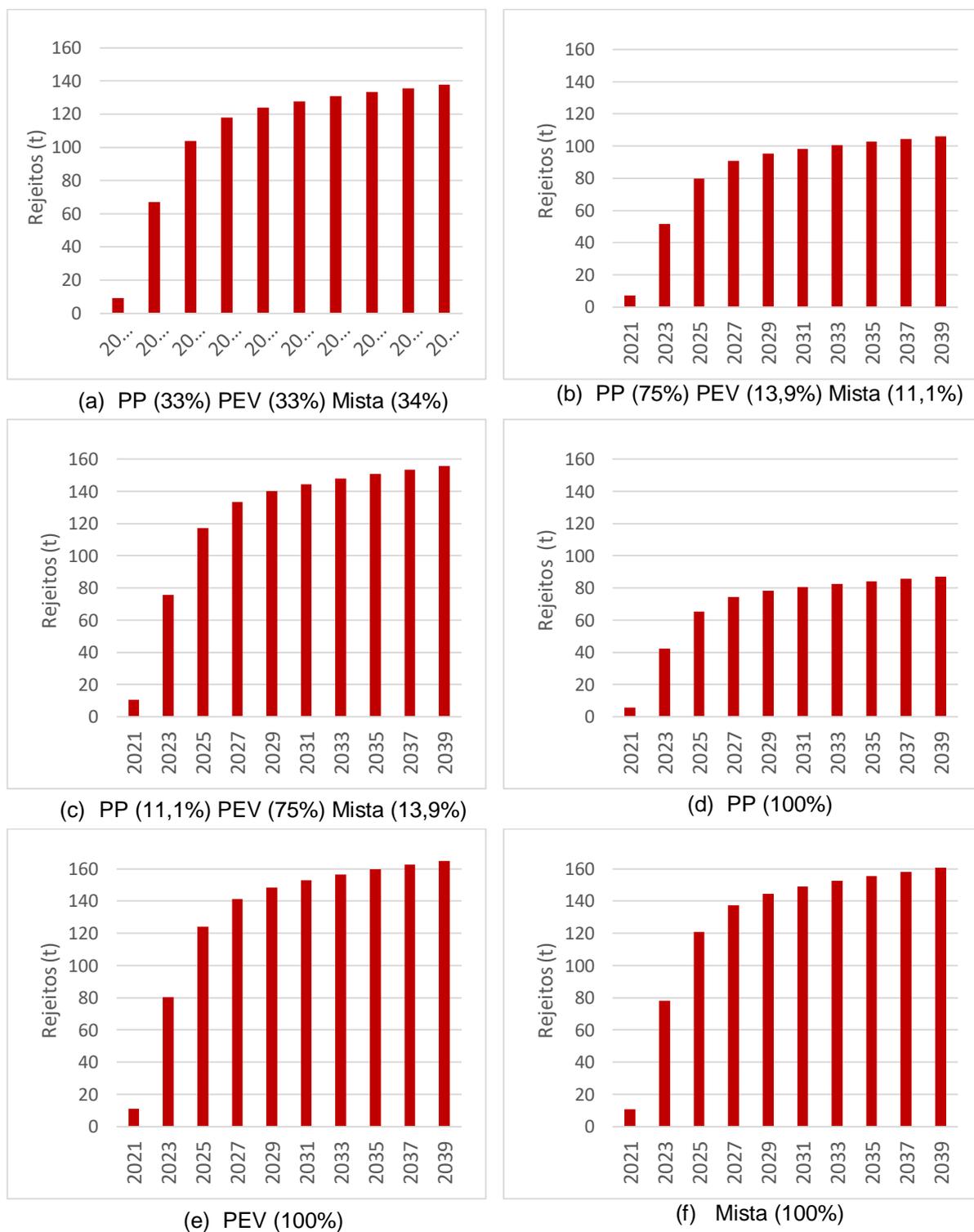
Em todos esses cenários, verificou-se que o custo total de coleta convencional não se altera, visto que a cobertura de coleta seletiva e de coleta convencional permanecem constantes, o que corrobora com o relatado por Chifari *et al.* (2017), os quais afirmaram que o método de coleta não afeta os custos de processamento e descarte. O custo total da coleta seletiva, por sua vez, altera conforme o percentual coletado por cada modalidade, definido em cada um dos cenários e em função também do agente executor da coleta seletiva.

Ao final dos 20 anos de simulação, verificou-se um menor custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura no cenário em que a coleta seletiva seria realizada somente pela modalidade mista, a qual seria realizada 80% pela prefeitura e 20% pelos catadores, com um custo de R\$ 356,85/t e R\$ 434,77/t, respectivamente. O maior custo foi verificado no cenário em que a coleta seletiva seria realizada somente pela modalidade PEV, a qual seria executada pela própria prefeitura, com um custo de R\$ 596,13/t.

Entretanto, é importante verificar como a opção mais barata reflete na quantidade de resíduos recicláveis e de resíduos enviados para aterro sanitário para avaliar um benefício geral da alternativa. A Figura 5-10 mostra que os cenários com as diferentes modalidades de coleta seletiva também influenciam na quantidade de rejeitos e,

consequentemente, na quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário e para reciclagem.

Figura 5-10 – Quantidade de rejeitos de acordo com os percentuais das modalidades de coleta seletiva para cada cenário ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. PP: Porta a Porta; PEV: Pontos de Entrega Voluntária.

Na Figura 5-10 é possível observar que, o cenário em que a coleta seletiva é realizada exclusivamente pela modalidade porta a porta, apresentou menor quantidade de rejeitos, o que resulta em mais resíduos enviados para reciclagem e menos resíduos dispostos em aterro sanitário. Esse resultado já era esperado, pois essa modalidade possuía menor percentual de rejeitos, o que corrobora com o exposto por Bertanza, Ziliani e Menoni (2018). Verificou-se ainda que, apesar do custo ser menor no cenário em que a coleta seletiva é realizada exclusivamente pela modalidade mista, a quantidade de rejeitos nessa estratégia seria a segunda maior, atrás somente de quando a atividade é realizada 100% pela modalidade PEV, a qual é realizada apenas pela prefeitura.

Dessa forma, fica evidente que a escolha da modalidade de coleta seletiva deve levar em consideração não apenas o custo total de gerenciamento dos resíduos para a prefeitura, como também o percentual desviado do aterro sanitário para reciclagem. Dessa forma torna-se possível descrever uma estratégia pautada não somente no custo, mas também nos benefícios ambientais ao longo do tempo e que se adequem às metas impostas nas legislações vigentes.

Com relação ao impacto dos diferentes agentes executores (prefeitura, catadores e empresa terceirizada) no custo total de gerenciamento de RDO para as prefeituras municipais, foram definidos nove cenários com os seguintes percentuais: Cenário 16: (porta a porta prefeitura 100%), Cenário 17 (porta a porta empresa terceirizada 100%), Cenário 18 (porta a porta prefeitura 33%, catador 33%, empresa terceirizada 34%), Cenário 19 (PEV catador 100%), Cenário 20 (PEV empresa terceirizada 100%), Cenário 21 (PEV prefeitura 33%, catador 33%, empresa terceirizada 34%), Cenário 22 (mista catador 80%, empresa terceirizada 20%), Cenário 23 (mista prefeitura 20%, empresa terceirizada 80%), Cenário 24 (mista prefeitura 33%, catador 33%, empresa terceirizada 34%). É importante ressaltar que nesses cenários, a cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos coletada permanece igual à do Cenário base (0,71%), assim como as modalidades de coleta seletiva (porta a porta 11,1%, PEV 13,9% e mista 75%).

Nesses cenários, o custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal sofreu variação em função do custo total de coleta seletiva que, por sua vez, é influenciado pela combinação ou não dos agentes executores da coleta seletiva. Os

custos de coleta convencional e de disposição final não são impactados pelo agente executor da coleta seletiva. A Figura 5-11 mostra os resultados do impacto dos diferentes agentes executores no custo total de coleta seletiva. É importante ressaltar que no Cenário base considerou-se que a coleta porta a porta é realizada 100% por OCMRR, a coleta PEV é realizada 100% pela prefeitura e a mista 80% pela prefeitura e 20% por OCMRR.

Figura 5-11 – Impacto dos diferentes agentes executores no custo total da coleta seletiva para cada cenário ao longo dos 20 anos.

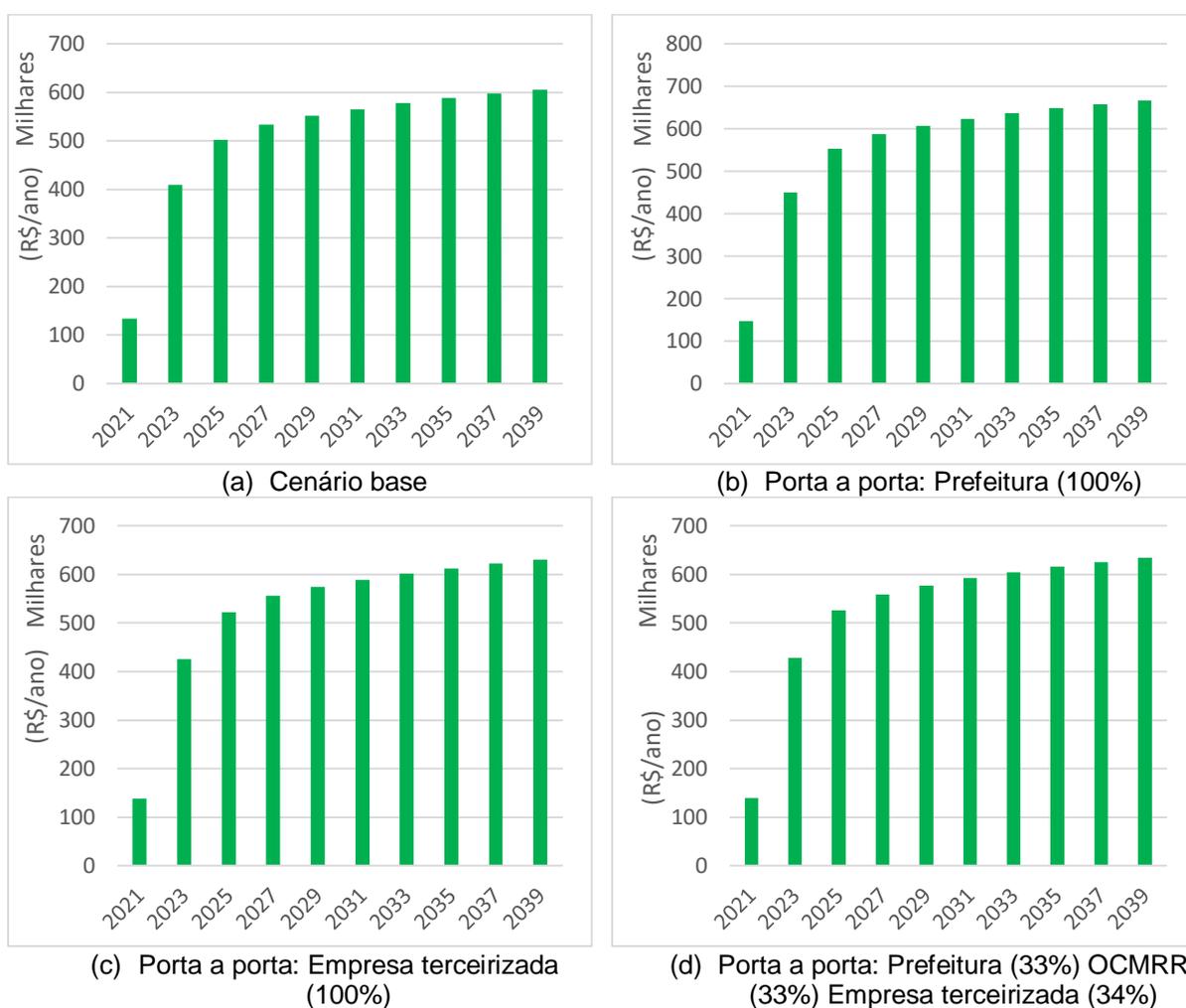
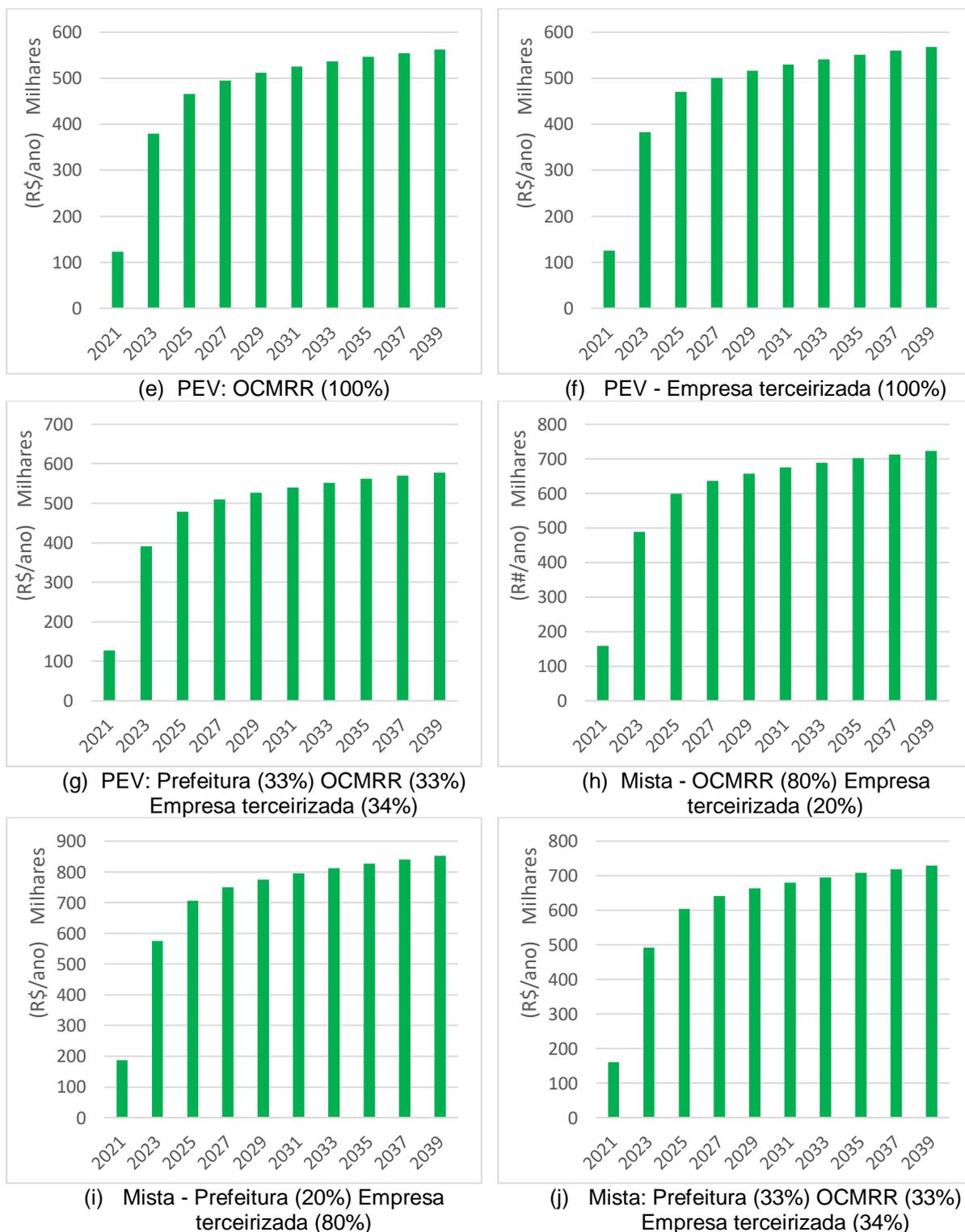


Figura 5-11 – Impacto dos diferentes agentes executores no custo total da coleta seletiva para cada cenário ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5-11e mostra que o menor custo total de coleta seletiva foi identificado quando atribuiu-se que a modalidade PEV seria realizada apenas pelos catadores,

visto que essa configuração apresenta um custo unitário de R\$ 382,14/t, inferior à dos outros executantes para essa modalidade. Da mesma forma, a Figura 5-11a mostra que, no caso da modalidade porta a porta, o custo total da coleta seletiva também foi menor quando é executada apenas por catadores, a um custo unitário de R\$ 472,76/t. O mesmo foi verificado por Rutkowski e Rutkowski (2015) e Varella (2011), os quais afirmaram que o custo da atividade de coleta seletiva é menos dispendiosa quando são contratadas OCMRR para realizar o serviço. Além disso, embora não tenha sido analisado nessa pesquisa, estudos mostram que a qualidade do resíduo e consequente quantidade de recicláveis coletada por meio da coleta seletiva, também é influenciada pelo agente executor da atividade, sendo maior quando a mesma é realizada por catadores (GODECKE *et al.*, 2012; RUTKOWSKI; RUTKOWSKI, 2015; FERRONATO *et al.*, 2020).

Em contrapartida, é possível observar nas Figuras 5-11b e 5-11a que os maiores custos totais de coleta seletiva para as modalidades porta a porta e PEV foram verificados nos cenários em que a atividade seria realizada exclusivamente pela própria prefeitura, pois apresentam os maiores valores por tonelada, de R\$ 851,22/t e R\$ 596,13/t, respectivamente. No entanto, é importante ressaltar que os custos unitários introduzidos como parâmetros no modelo matemático para a atividade de coleta seletiva realizada pela prefeitura foram calculados a partir de uma estimativa, visto que não foram encontrados dados reais sobre esses custos, pois geralmente estão embutidos com outros custos de manejo de RSU.

Na modalidade de coleta seletiva mista, verificou-se o menor custo total de coleta seletiva no Cenário base (Figura 5-11a), em que haveria uma combinação onde 80% dos resíduos seriam coletados pela prefeitura e 20% pelos catadores, a um custo de R\$ 356,85/t e R\$ 434,77/t, respectivamente. O maior custo nessa modalidade é verificado quando a atividade é realizada prioritariamente (80%) por empresas terceirizadas, a um custo de R\$ 657,98/t e pela prefeitura (20%), sem a presença de catadores (Figura 5-11i).

Após verificar o impacto das estratégias de coleta seletiva, foi verificado o impacto da implementação de uma política de educação ambiental. O tópico a seguir apresenta os resultados encontrados.

5.4.2.3. Política de educação ambiental

Com a finalidade de avaliar o impacto da PEA sobre o custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal, foram simulados seis cenários (Cenários 4, 5, 6, 7, 8 e 9). Verificou-se o comportamento dos custos de gerenciamento de RDO considerando que a implementação da política seria parcialmente efetiva, chegando a 50%, com um comportamento lento (Cenário 4), intermediário (Cenário 5) e rápido (Cenário 6). Em seguida, considerou-se uma implementação da PEA totalmente efetiva, chegando a 100%, com um comportamento lento (Cenário 7), intermediário (Cenário 8) e rápido (Cenário 9).

Nesses cenários, a cobertura da coleta seletiva permanece igual à do Cenário base (0,71% dos resíduos gerados), assim como as modalidades de coleta seletiva (porta a porta 11,1%, PEV 13,9% e mista 75%) e os agentes executores (porta a porta 100% catadores, PEV 100% prefeitura e mista 80% prefeitura e 20% catadores).

A Figura 5-12 mostra os resultados da simulação desses cenários para o custo total de gerenciamento de RDO.

Figura 5-12 – Impacto da política de educação ambiental no custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal ao longo dos 20 anos.

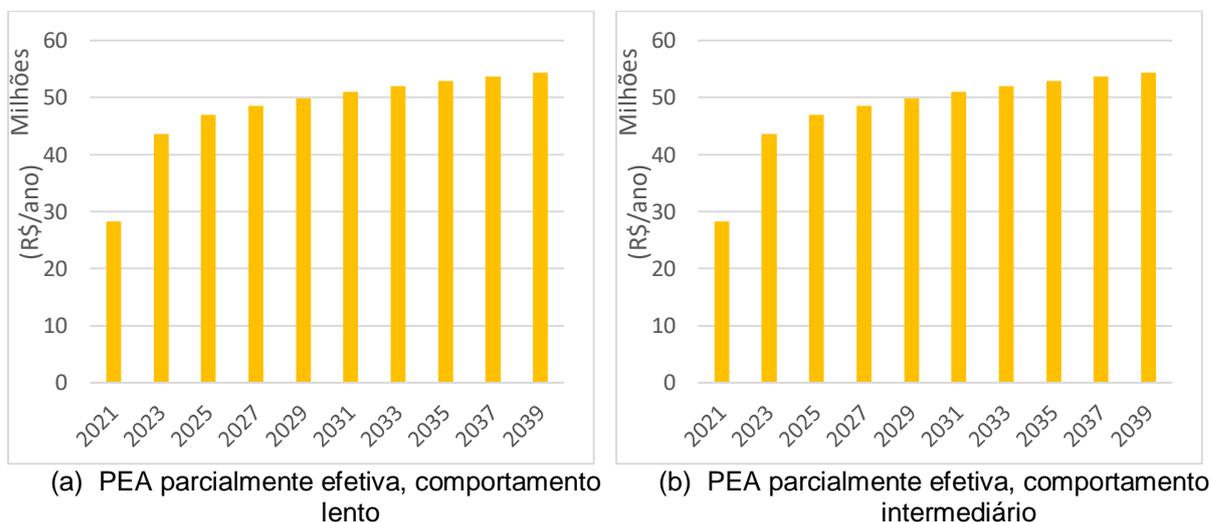
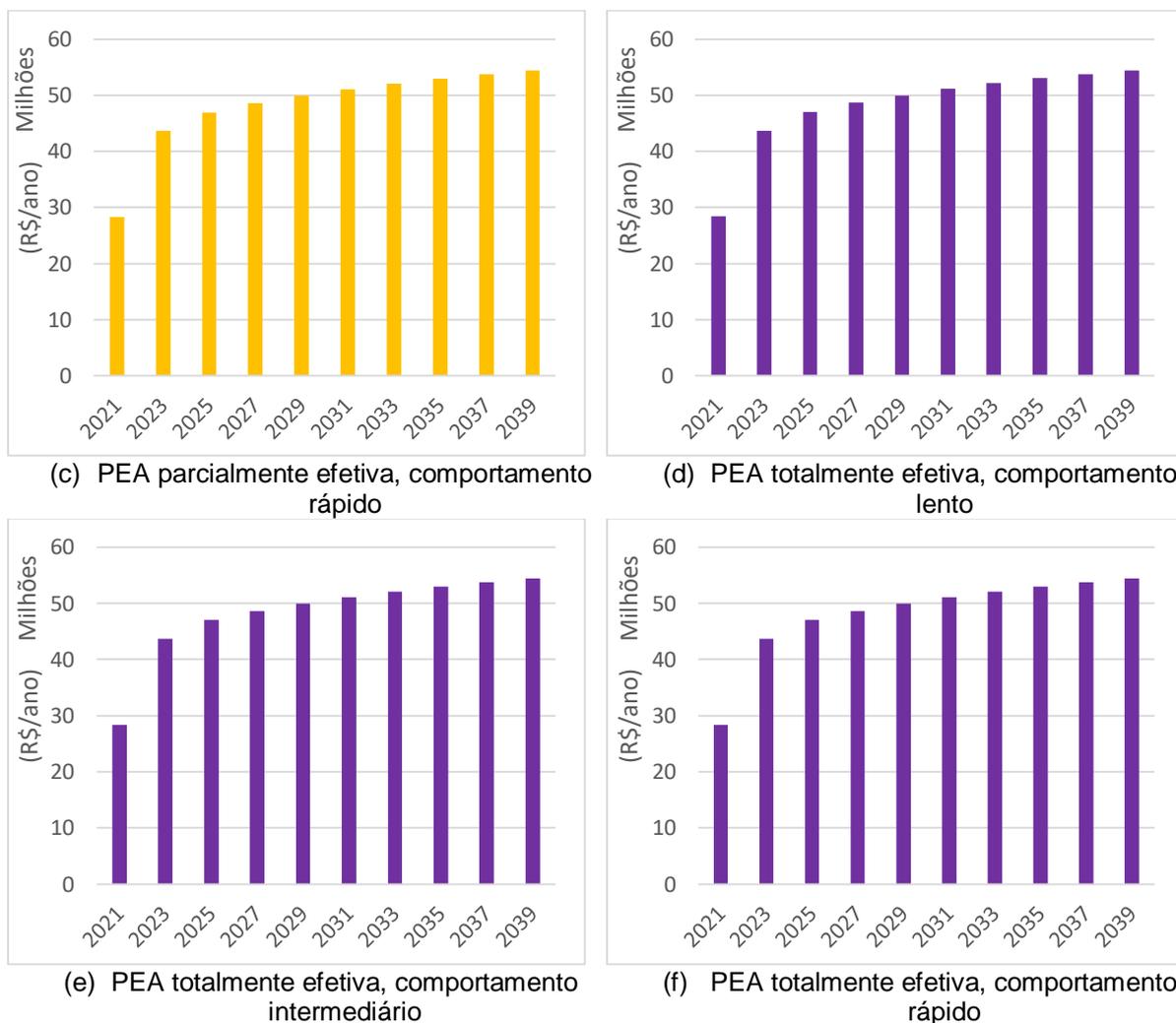


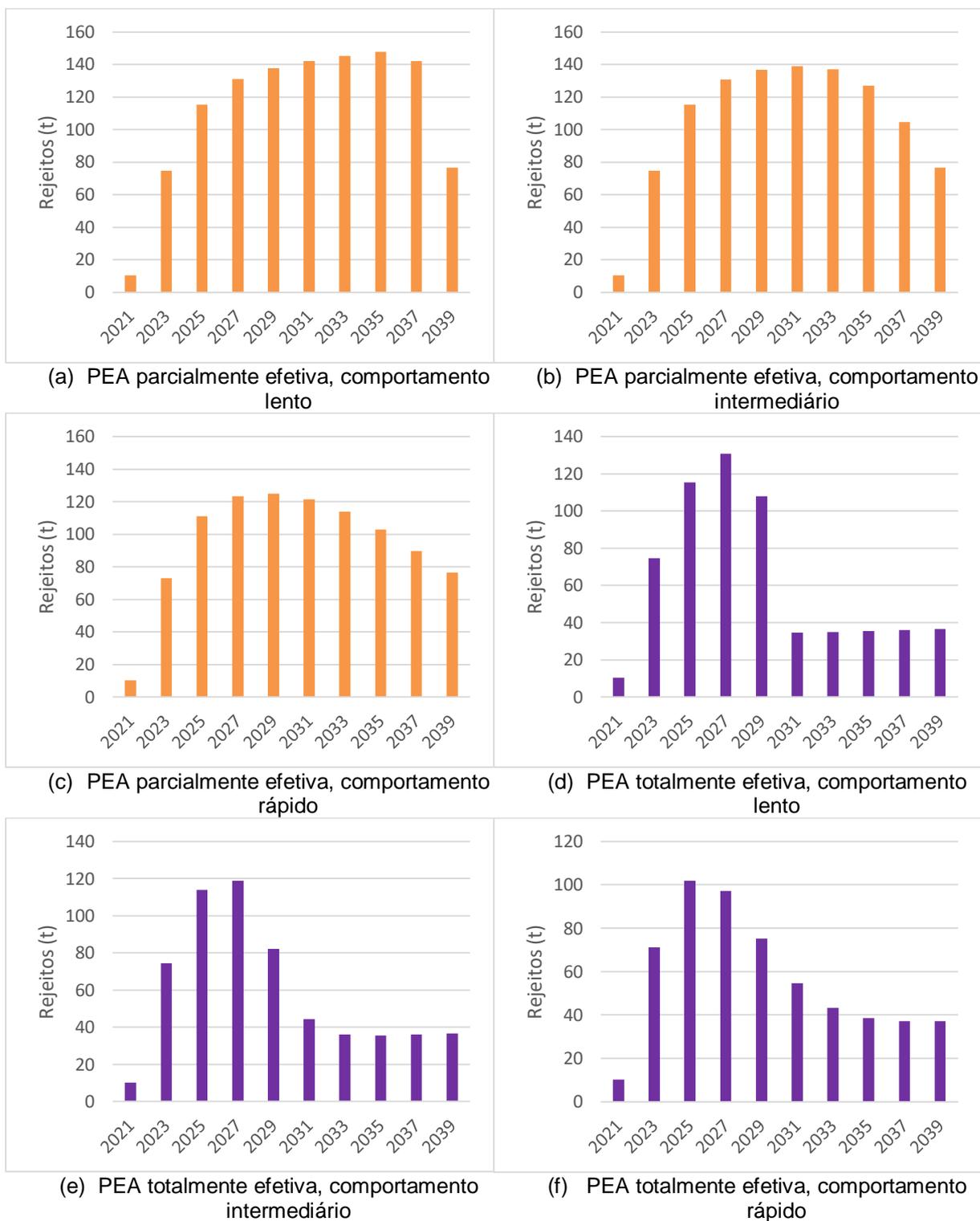
Figura 5-12 – Impacto da política de educação ambiental no custo total de gerenciamento de RDO para a prefeitura municipal ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. PEA = Política de Educação Ambiental

Conforme observado na Figura 5-12, em todos os cenários simulados, o custo total de gerenciamento de RDO sofreu pouco impacto da PEA, apresentando diferenças menores do que 1%. Essas diferenças foram consequência da redução dos rejeitos que, por sua vez, reduziram o custo total de disposição final. A Figura 5-13 mostra o impacto da PEA na quantidade de rejeitos.

Figura 5-13 - Impacto da política de educação ambiental na quantidade de rejeitos ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. PEA = Política de Educação Ambiental.

Na Figura 5-13 é possível observar que, ao final dos 20 anos, nos cenários em que a PEA seria totalmente efetiva (Figuras 5-14d, 5-14e e 5-14f), a quantidade de rejeitos

reduziria em 76%, enquanto que no cenário em que a PEA seria parcialmente efetiva (Figuras 5-14a, 5-14b e 5-14c), a quantidade de rejeitos reduziria em 50%, conforme estabelecido. A redução na quantidade de rejeitos possibilitou uma diminuição na disposição de resíduos em aterros sanitários, conforme também verificado por Sukholthaman e Sharp (2016) e Pinha e Sawaga, (2020). Conseqüentemente também ocorreria uma redução no custo total de disposição final, conforme exposto também por Silva (2018). Em contrapartida, a implementação de estratégias de educação ambiental gerou custos para a prefeitura municipal. Dessa forma, nesses cenários, o custo total de gerenciamento apresentou-se maior do que quando não houvesse implementação da PEA.

Isso pode ser explicado pelo fato de que a parcela de rejeitos enviada para aterro sanitário a partir da coleta convencional é muito grande, de cerca de 99,29% dos resíduos gerados. Logo, os percentuais de rejeitos em todas as modalidades de coleta seletiva (5,99% na coleta seletiva porta a porta, 11,37% na PEV e 11,07% na mista) são descontados de uma parcela de 0,71% dos resíduos gerados, o que se traduz em quantidades menores (Figura 5-14) e, conseqüentemente, custos menores quando comparado com o da coleta convencional.

Nota-se que, o percentuais rejeitos observados nas diferentes fontes da área de estudo, quando somados chegam a 28,43% dos resíduos coletados por meio de sistemas de coleta seletiva. Esse percentual está próximo ao verificado no Brasil no ano de 2018, quando os rejeitos representaram 26% do total dos resíduos coletados por meio de programas de coleta seletiva (CEMPRE, 2019) e no Espírito Santo, onde o índice de rejeito é em média 20,17% (DUTRA; YAMANE; SIMAN, 2018).

Com relação à quantidade de resíduos recicláveis, verificou-se que quando a PEA foi parcialmente efetiva, reduzindo os rejeitos em 50%, foi verificado em 2039 um aumento de resíduos recicláveis de 0,36%, 1,16% e 2,26%, para o comportamento lento, intermediário e rápido, respectivamente. Quando a PEA foi totalmente efetiva, reduzindo os rejeitos em 76%, verificou-se um aumento dos recicláveis de 5,57%, 5,78% e 6,02% para o comportamento lento, intermediário e rápido, respectivamente. Com isso, é perceptível que, quanto mais rápida for a velocidade de aprendizagem da população com relação à segregação dos resíduos na fonte geradora, maior será o

ganho na quantidade de recicláveis e, conseqüentemente, menor será a demanda do aterro sanitário.

Isso já era esperado, visto que a separação de resíduos na fonte geradora aumenta o volume de recicláveis enviados para a coleta seletiva (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016). No entanto, esses valores estão aquém do exposto por Dai *et al.* (2015) e Silva (2018), que constataram um aumento de cerca de 12% de resíduos recicláveis com um investimento em estratégias de educação ambiental (SILVA, 2018). Nesse sentido, é importante ressaltar que, a intenção de se realizar a segregação na fonte geradora e o real comportamento de melhoria não é linear (PICKERING *et al.*, 2020), ou seja, existem pessoas que possuem fortes intenções em relação à coleta seletiva, mas não agem a respeito, principalmente quando a disponibilidade de infraestruturas e o estímulo governamental são fracos (ZHANG *et al.*, 2019).

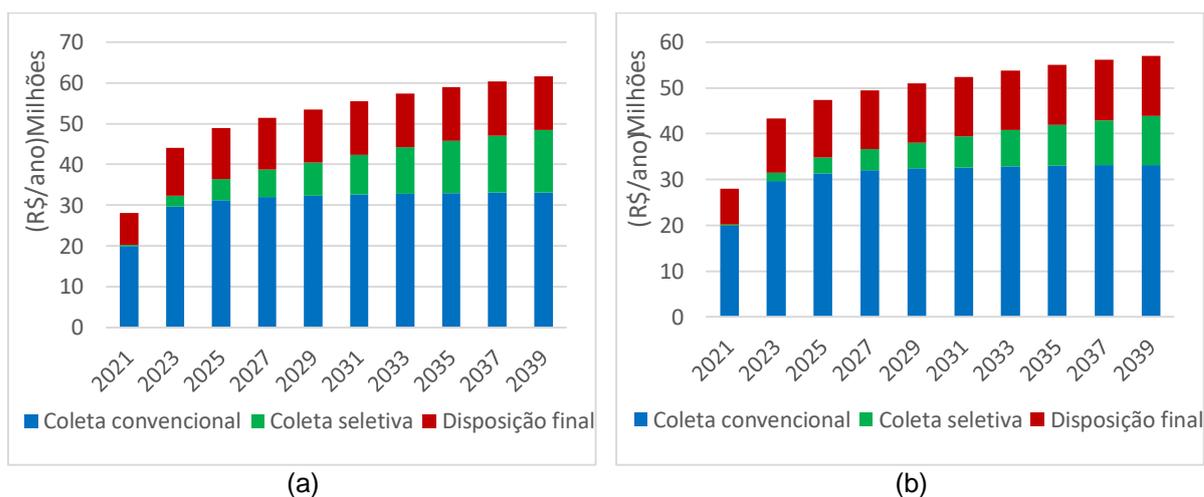
Nesse sentido, apesar do investimento em uma política pública de educação ambiental influenciar diretamente na sociedade e na sua intenção de separação dos resíduos na fonte, Silva (2018) afirma que apenas isso não é suficiente para tornar as cadeias de valor da reciclagem viáveis e constantes ao longo do tempo. São necessárias a implementação de políticas de indústria e inovação, associadas às políticas ambientais, para reorganizar as redes, conforme sugerido por Silva (2018).

5.4.2.4. Implementação de todas as políticas simultaneamente: avaliação da governança

Por fim, com objetivo de verificar o impacto do planejamento da governança local foram definidos dois cenários. O Cenário 25 reflete uma situação em que haveria um governança parcial, ou seja, quando ambas políticas seriam implementadas parcialmente, tendo a curva de aprendizagem da PEA na redução dos rejeitos um comportamento intermediário e adotando que as modalidades de coleta seletiva e os respectivos agentes executores realizam a atividade de coleta seletiva de forma proporcional. O Cenário 26 reflete uma situação em que ocorreria uma governança total. Nesse caso, ambas políticas seriam totalmente implementadas, considerando um rápido resultado da PEA na redução dos rejeitos. A coleta seletiva seria apenas realizada na modalidade mista, a qual seria executada 80% pela prefeitura e 20% por catadores.

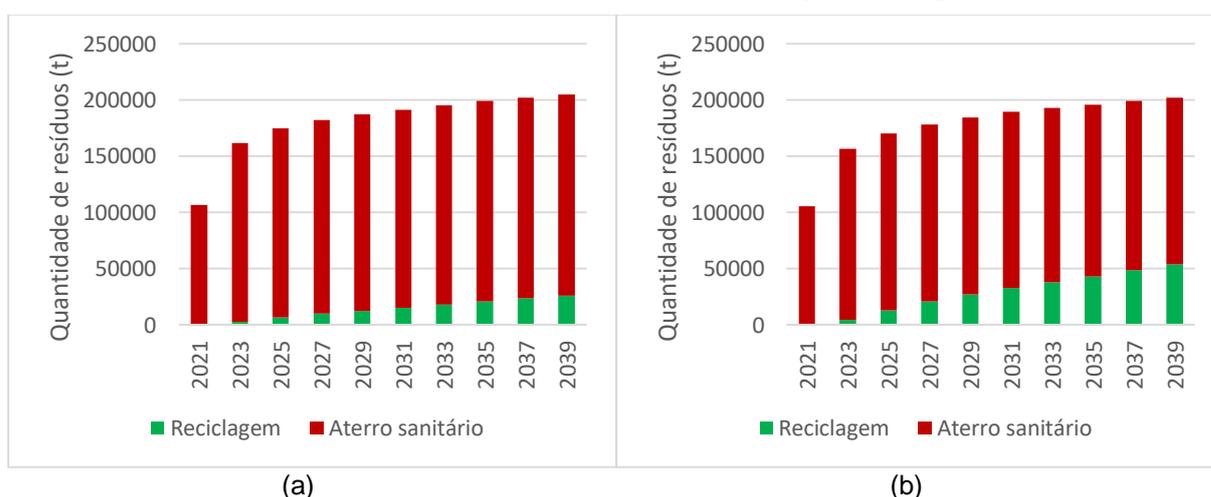
A Figura 5-14 apresenta os resultados do impacto dessas configurações nas variáveis de custo total de coleta convencional, coleta seletiva e de disposição final, que compõem o custo total de gerenciamento de RDO. A Figura 5-15, por sua vez ilustra o impacto da governança parcial e total na quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário e na quantidade resíduos recicláveis.

Figura 5-14 - Impacto da governança parcial (a) e total (b) no custo total de coleta convencional, custo total de coleta seletiva e custo total de disposição final ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. CT CC = Custo total de coleta convencional; CT CS = Custo total de coleta seletiva; CT DF = Custo total de disposição final.

Figura 5-15 - Impacto da governança parcial (a) e total (b) na quantidade de rejeitos enviados para aterro sanitário e resíduos recicláveis desviados para reciclagem ao longo dos 20 anos.



Fonte: Autoria própria. RRT – Resíduos recicláveis totais.

Conforme observa-se na Figura 5-14, o custo total de gerenciamento de RDO apresenta maiores valores no cenário de governança parcial, chegando em 2039 a ser 13,64% maior do que no cenário base. No cenário de governança total, o custo total de gerenciamento de RDO apresentou-se 5,24% menor do que no cenário base.

Isso ocorreu pois os custos totais de coleta convencional e de disposição final foram menores no cenário de governança total, em função da quantidade de resíduos enviados para aterro sanitário, conforme observado na Figura 5-14a. A modalidade e o agente executor da coleta seletiva atribuídas no cenário de governança total também contribuíram para um menor custo total de gerenciamento de RDO.

Com relação à quantidade de resíduos recicláveis, a Figura 5-15 mostra que enquanto no cenário de governança parcial, 26.285,71t de resíduos recicláveis seriam encaminhados para a reciclagem (cerca de 13% do total de resíduos gerados), no cenário de governança total esse valor chegou a 53.565,49t (cerca de 27% do total de resíduos gerados). Esses resultados mostram que é mais viável tanto em termos de custo total de gerenciamento de RDO, quanto de desvio de resíduos recicláveis do aterro sanitário para reciclagem, a escolha da estratégia de governança total, ou seja, ampliar a coleta seletiva totalmente (30% em 20 anos) e realizar a atividade pela modalidade mista, sendo os agentes executores da atividade divididos em prefeitura (80%) e catadores (20%).

5.4.3. Discussão dos resultados

Em termos de sustentabilidade, uso de recursos naturais e desvio de resíduos do aterro sanitário para reciclagem, o Cenário 26 que refere-se a implementação de uma governança total, apresentou o melhor resultado para o município. Nesse cenário a quantidade total de resíduos encaminhados para aterro sanitário foi reduzida em 28%, quando comparado com o Cenário base, passando de 205.684,9 toneladas para 148.441,8 toneladas. A quantidade de resíduos recicláveis enviados para reciclagem nesse cenário chegou a 53.565,5 toneladas no ano de 2039, um aumento de 4028% com relação ao Cenário base, no qual apenas 1.297,5 toneladas de resíduos eram enviados para reciclagem no mesmo ano.

Resultado semelhante foi identificado no Cenário 3, no qual também foi considerada uma ampliação da coleta seletiva para 30% em massa de resíduos coletados. O resultado do Cenário 26 foi um pouco melhor em termos de desvio de resíduos recicláveis para reciclagem, devido a implementação da PEA, o que contribuiu para uma redução na quantidade de rejeitos provenientes da coleta seletiva sendo enviados para aterro sanitário. Com relação aos custos, no Cenário 3 verificou-se um

custo total de gerenciamento de RDO maior do que no Cenário 26. Isso ocorreu pois, neste último cenário houve redução dos rejeitos com a implementação da PEA e a partir do planejamento da governança total, foi escolhida uma combinação de estratégias de modalidade e agente executor de coleta seletiva de menores custos.

Os cenários 2 e 25 também obtiveram resultados semelhantes no que diz respeito à redução na quantidade de resíduos desviada do aterro sanitário para reciclagem de 13%, uma vez que ambos tratam de uma ampliação de coleta seletiva para 15%. O Cenário 25 apresentou valor um pouco superior na quantidade de resíduos desviados em função da implementação da PEA, o que também contribuiu para um custo de disposição final um pouco menor. No entanto, ao verificar o custo total de gerenciamento de RDO, comparando com o Cenário 2, observou-se maior valor para o Cenário 25, que trata da governança parcial. Isso mostra que as escolhas das estratégias de modalidade e agente executor de coleta seletiva a partir do planejamento da governança parcial, não contribuiu para redução dos custos totais.

Com relação aos demais cenários, verificou-se que a implementação da PEA e a consequente redução dos rejeitos provenientes da coleta seletiva, contribuiu para a redução da quantidade rejeitos enviados para aterro sanitário e, conseqüentemente, reduziu os custos de disposição final. Logo quanto maior for o impacto da PEA na redução dos rejeitos, melhores serão os resultados de desvio dos recicláveis do aterro sanitário para reciclagem. No que diz respeito às modalidades de coleta seletiva, verificou-se que a quantidade de resíduos recicláveis é influenciada pelo percentual de rejeitos de cada modalidade e os custos são influenciados pelos agentes executores da atividade. Dessa forma, os melhores resultados foram verificados para as modalidades de coleta seletiva que possuíam os menores percentuais de rejeito e os menores custos de coleta.

De forma geral, para a prefeitura municipal não seria economicamente viável ampliar a coleta seletiva. No entanto, sabe-se que devido às questões ambientais, as regulamentações estabelecem metas para ampliação da coleta seletiva, a fim aumentar o desvio dos resíduos recicláveis para reciclagem. Dessa maneira, a administração pública deve buscar estratégias, tais como taxas de gestão de resíduos e incentivos, para ampliar a coleta seletiva de forma que atenda às metas e, ao mesmo tempo, consiga arcar com os custos das atividades.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, um modelo de dinâmica de sistemas foi proposto, o qual permitiu avaliar o impacto da implementação de políticas públicas de educação ambiental e de ampliação da coleta seletiva, assim como das modalidades e agentes executores da atividade no custo total de gerenciamento de RDO das prefeituras municipais, atendendo ao objetivo estabelecido.

O diagrama de causa e efeito expôs a influência de políticas públicas de coleta seletiva e de educação ambiental na quantidade de resíduos recicláveis enviados para coleta seletiva que, por sua vez, influencia diretamente nos custos de disposição final, coleta convencional e coleta seletiva, os quais sofrem influência das modalidades e agentes executores da atividade. Esses custos compõem o custo total de gerenciamento de RDO da prefeitura municipal.

O diagrama de estoque e fluxo e a sua formulação matemática, permitiu a simulação computacional para verificar o efeito das variáveis expostas no custo total de gerenciamento de RDO da prefeitura municipal. Para verificar a confiabilidade do modelo matemático, foram realizados seis testes cujo resultados foram satisfatórios. A ausência de alguns dados, impossibilitou a realização de alguns testes. Ainda assim, os testes realizados já conferem a confiabilidade necessária ao modelo e aqueles que não foram, poderão ser realizados à medida que os dados necessários sejam obtidos.

Cabe ressaltar o teste de análise de sensibilidade do modelo, o qual foi realizado afim de verificar o quão sensível o modelo é a partir da incerteza das variáveis de custo utilizadas para simulação. O resultado da análise de sensibilidade mostrou que a variação dos custos unitários de coleta seletiva em conformidade com a modalidade e agente executor adotados, podem impactar significativamente no custo total de coleta setiva e, conseqüentemente, no custo total de gerenciamento de RDO da prefeitura municipal. Sendo assim, é importante que seja feito o controle e acompanhamento destes custos ao longo dos anos.

Utilizando como objeto estudo de caso o município da Serra/ES, foram estabelecidos 26 cenários para simulação do modelo computacional, o que possibilitou compreender o impacto dessas variáveis no custo total de gerenciamento de RDO da prefeitura

municipal. Ressalta-se que o modelo matemático proposto pode ser utilizado para avaliar qualquer outro município, desde que os parâmetros de entrada sejam alterados, caracterizando a localidade estudada.

Os cenários foram definidos para avaliar o impacto da implementação uma política de ampliação da cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos coletados de forma parcialmente efetiva e totalmente efetiva, passando 0,71% para 15% e 30%, respectivamente. Avaliar o impacto das diferentes modalidades de coleta seletiva (porta a porta, PEV e mista) e dos diferentes agentes executores da atividade (prefeitura, OCMRR e empresa terceirizada). Avaliar o impacto da implementação de uma política de educação ambiental de forma parcialmente efetiva e totalmente efetiva, de forma que fosse possível reduzir os rejeitos em 50% e 76%, respectivamente. E, por fim, avaliar o impacto de uma governança, onde ocorreria a implementação de todas as políticas simultaneamente.

Os resultados confirmaram que a ampliação da cobertura de coleta seletiva em massa de resíduos de 0,71% para 15% e 30% em conjunto com a implementação de uma política de educação ambiental visando a segregação na fonte e a redução de rejeitos, contribui para a diminuição da quantidade de rejeitos dispostos em aterro sanitário e, conseqüentemente, para redução dos custos de disposição final. Os custos de coleta convencional também são reduzidos. Entretanto, apesar da redução desses custos, o custo total de gerenciamento de RDO ainda permanece alto, tendo em vista que os custos unitários de coleta seletiva são superiores aos de coleta convencional e de disposição final, o que acarreta em altos custos totais de coleta seletiva, a medida que a cobertura da atividade é ampliada.

A quantidade de rejeitos dispostos em aterro sanitário foi 13% menor com a ampliação da coleta seletiva para 15% e redução dos rejeitos em 50% a partir da implementação da PEA, situação que reflete o cenário de governança parcial. A quantidade de resíduos recicláveis encaminhados para reciclagem, por sua vez, aumentou 1926% sob essas condições. No entanto, o custo total de gerenciamento de RDO também aumentou em cerca de 13,64%. Com a ampliação da coleta seletiva para 30% e redução dos rejeitos em 76% a partir da implementação da PEA, a quantidade de rejeitos dispostos em aterro sanitário foi 28% menor e a quantidade de resíduos recicláveis cresceu 4028%. Entretanto, o custo total de gerenciamento de RDO

também cresceu, sendo 10,63% maior do que no cenário sem ampliação da coleta seletiva e sem implementação da PEA.

Nota-se que com a ampliação da cobertura de coleta seletiva para 30% e redução dos rejeitos em 76%, o custo total de gerenciamento de RDO cresceu em uma magnitude menor do que quando ampliou-se a cobertura de coleta seletiva para 15% com redução dos rejeitos em 50%. Tal fato ocorreu devido as modalidades de coleta seletiva e agentes executores escolhidos para cada um desses cenários. Em vista disso, gestores municipais devem escolher a estratégia de coleta seletiva (modalidade e agente executor) que tenha os menores custos e menores índices de rejeito da sua localidade, o que contribuirá na redução dos custos de gerenciamento de RDO.

Sendo assim, os resultados demonstraram que com a ampliação da coleta seletiva e implementação da PEA visando a redução de rejeitos em conjunto com a escolha da melhor estratégia de coleta seletiva considerando todas as variáveis envolvidas (modalidades e agentes executores), é possível encontrar um sistema de coleta seletiva economicamente, ambientalmente e socialmente sustentável. Outrossim, é importante ressaltar que, apesar de acarretar em custos totais de gerenciamento mais altos, a coleta seletiva contribui para a sustentabilidade social e ambiental, a partir da valorização dos resíduos recicláveis, além da redução do uso de aterros sanitários, questão que tem sido prioridade nas regulamentações ambientais do mundo todo.

Com relação às limitações do estudo, evidencia-se que a carência de dados dificultou a avaliação de algumas variáveis. Os custos de coleta seletiva quando a própria prefeitura realiza a atividade, por exemplo, não foram encontrados na base de dados do SNIS. Geralmente, esses custos estão embutidos com outros custos de gerenciamento de RSU ou não são aferidos. Além disso, para outras questões relacionadas à coleta seletiva, tais como as modalidades e percentuais de rejeito, não foram encontrados dados mais atuais para o município da Serra/ES, tendo sido utilizado dados de um estudo do ano de 2017. Tal fato mostra que há uma dificuldade de se encontrar uma base de dados de todo sistema de gerenciamento de RSU, o que reforça não só a carência de dados, mas também a pouca confiabilidade.

Diante dessas e outras limitações desta pesquisa, ainda existem questões que podem ser analisadas de forma mais detalhada, podendo ser abordadas em pesquisas

futuras. Sendo assim, como recomendação para trabalhos futuros são sugeridas as seguintes atividades:

- Verificar além da questão das despesas, as receitas dos SLMRSU, o que irá permitir a avaliação da sustentabilidade financeira das prefeituras municipais com relação ao gerenciamento de RSU. As receitas arrecadadas envolvem a cobrança de taxas dos SLMRSU, incentivos fiscais e a TGR – Taxa de gestão dos resíduos. Porém, nem todos os municípios realizam tal cobrança ou não é suficiente para suprir as necessidades do sistema, o que dificulta o alcance da autossuficiência.
- Incluir outras formas de destinação dos RSU, tais como compostagem de resíduos úmidos, que também podem contribuir para desvio dos resíduos do aterro sanitário e que é uma prática que alguns municípios realizam.
- Avaliar a possibilidade de incluir o percentual de rejeitos de acordo com o agente executor da atividade de coleta seletiva, pois alguns estudos abordam que quando a coleta seletiva é realizada por catadores, por exemplo, o percentual de rejeitos é menor, ou seja, a produtividade e qualidade dos resíduos recicláveis são maiores.
- Estimar mais precisamente os custos de educação ambiental das prefeituras municipais. Neste estudo, foi considerado que o custo de educação ambiental anual permaneceria constante ao longo dos 20 anos. Entretanto, sabe-se que esses valores devem sofrer flutuação.
- Estimar mais precisamente os custos de coleta seletiva quando a atividade é realizada pela própria prefeitura. Nesse caso, podem ser realizadas pesquisas de campo para verificar os valores reais desse custo por tonelada coletada.
- Avaliar a implementação de uma política pública de responsabilização dos grandes geradores de RSU, que são responsáveis pelo gerenciamento dos resíduos gerados, conforme preconiza a PNRS. Contudo, a PNRS também estabelece que essas atividades podem ser realizadas pelo poder público desde remuneradas pelos geradores responsáveis. Existem muitos municípios que realizam atividades de gerenciamento para esses geradores, mas não são remunerados ou a remuneração não é suficiente, o que pode acarretar em maiores custos para a administração pública.

Em suma, o modelo de dinâmica de sistemas proposto permite a verificação do impacto das variáveis relacionadas à coleta seletiva e à educação ambiental nos custos de gerenciamento de RDO das prefeituras municipais. Acredita-se que esse trabalho contribui para gestores públicos municipais na tomada de decisão em busca do alcance das metas de desvio de resíduos recicláveis do aterro sanitário, considerando os custos das atividades para as prefeituras, de forma a encontrar a sustentabilidade ambiental e econômica dos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, de acordo com as realidades locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2018**. São Paulo: ABRELPE, 2019.

ADERES – Agência de Desenvolvimento das Micro e Pequenas Empresas e do Empreendedorismo. **Relatório de composição gravimétrica das Organizações de Catadores de Materiais Recicláveis do Espírito Santo**. 2017.

ALZAMORA, B. R.; BARROS, R. T. V. Review of municipal waste management charging methods in different countries. **Waste Management**, v. 115, p. 47-55, 2020.

ANDERSSON, C.; STAGE, J. Direct and indirect effects of waste management policies on household waste behaviour: The case of Sweden. **Waste Management**, v. 76, p. 19–27, 2018.

APA - Agência Portuguesa do Ambiente. **PERSU2020+**: Reflexão estratégica e ajustamentos às medidas do PERSU 2020. República Portuguesa, 2019.

ARBUÉS, F.; VILLANÚA, I. Determinants of behavior toward selective collection of batteries in Spain. A bivariate probit model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 106, p. 1-8, 2016.

AREMU, A. S. In-town tour optimization of conventional mode for municipal solid waste collection. **Nigerian Journal of Technology**, v. 32, n. 3, p. 443-449, 2013.

BABAEI, A. A.; ALAVI, N.; GOUDARZI, G.; TEYMOURI, P.; AHMADI, K.; RAFIEE, M. Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 102, p. 94–100, 2015.

BABAZADEH, T.; NADRAN, H.; MOSAFERI, M.; ALLAHVRDIPOUR, H. Identifying Challenges and Barriers to Participating in the Source Separation of Waste Program in Tabriz, Northwest of Iran: A Qualitative Study from the Citizens' Perspective. **Resources**, v. 7, n. 3, p. 53, 2018.

BASSANI, P. D. **Caracterização de resíduos sólidos de coleta seletiva em condomínios residenciais Estudo de Caso em Vitória-ES**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.

BERNARDO, M.; DA SILVA LIMA, R. Using Action Research to Implement Selective Waste Collection Program in a Brazilian City. **Systemic Practice and Action Research**, v. 30, n. 6, p. 593–608, 2017.

BERTANZA, G.; ZILIANI, E.; MENONI, L. Techno-economic performance indicators of municipal solid waste collection strategies. **Waste management**, v. 74, p. 86-97, 2018.

BESEN, G. R.; GUNTHER, W. M. R.; RIBEIRO, H.; JACOBI, P. R.; DIAS, S. M. **Gestão da coleta seletiva e de organizações de catadores**: indicadores e índices de sustentabilidade. São Paulo, Fundação Nacional de Saúde, 2017.

BOONROD, K.; TOWPRAYOON, S.; BONNET, S.; TRIPETCHKULL, S. Enhancing organic waste separation at the source behavior: A case study of the application of

motivation mechanisms in communities in Thailand. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 95, p. 77–90, 2015.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2017**. Brasília, 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018**. Brasília, 2019.

BRASIL, G. H.; CASTIGLIONI, A. H.; FELIPE, C. U. **Projeções Populacionais para o Município de Serra: 2018-2038**. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Espírito Santo (PERS-ES). Governo do Espírito Santo, 2018.

BRENNAN, R. B.; HEALY, M. G.; MORRISON, L.; HYNES, S.; NORTON, D.; CLIFFORD, E. Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives. **Waste management**, v. 55, p. 355-363, 2016.

CALABRO, P. S.; SATIRA, A. Recent advancements towards resilient and sustainable municipal solid waste collection systems. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100375, 2020.

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130-138, 2014.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. **Cempre review 2019**:. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

CHIFARI, R.; PIANO, S. L.; MATSUMOTO, S.; TASAKI, T. Does recyclable separation reduce the cost of municipal waste management in Japan?. **Waste management**, v. 60, p. 32-41, 2017.

CHEN, B.; LEE, J. Household waste separation intention and the importance of public policy. **International Trade, Politics and Development**, v. 4, n. 1, p. 61-79, 2020.

COLVERO, D. A.; RAMALHO, J.; GOMES, A. P. D.; DE MATOS, M. A. A.; TARELHO, L. A. C. Economic analysis of a shared municipal solid waste management facility in a metropolitan region. **Waste Management**, v. 102, p. 823-837, 2020.

CONKE, L. S.; DO NASCIMENTO, E. P. A coleta seletiva nas pesquisas brasileiras: uma avaliação metodológica. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 10, n. 1, p. 199-212, 2018.

CUDJOE, D.; YUAN, Q.; HAN, M. S. An assessment of the influence of awareness of benefits and perceived difficulties on waste sorting intention in Beijing. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 123084, 2020.

DAI, Y. C.; GORDON, M.P.R.; YE, J.Y.; XU, D.Y.; LIN, Z.Y.; ROBINSON, N.K.L.; HARDER, M.K. Why doorstepping can increase household waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 102, p. 9–19, 2015.

DE MATOS, A.V.; SANTOS, C.M.S.; DE ALMEIDA, S.R.; VARELLA, C.V.S.; LIMA, F.P.A.; FAZITO, S. **Análise comparada de custos da coleta seletiva realizada pelos catadores, pela prefeitura e por empresas contratadas**. INSEA – Instituto Nenuca de Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte, 2010.

DE SOUZA, R. L. R. Teoria Geral dos Sistemas e Dinâmica de Sistemas– Similaridades e possibilidades em Administração. **Revista Espaço Acadêmico**, v. 11, n. 131, p. 81-88, 2012.

DI MARIA, F.; MICALE, C. Impact of source segregation intensity of solid waste on fuel consumption and collection costs. **Waste management**, v. 33, n. 11, p. 2170-2176, 2013.

DI MARIA, F. MICALE, C. A holistic life cycle analysis of waste management scenarios at increasing source segregation intensity: The case of an Italian urban area. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 2382-2392, 2014.

DI NOLA, M. F.; ESCAPA, M.; ANSAH, J. P. Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy. **Waste management**, v. 78, p. 717-729, 2018.

D'ONZA, G.; GRECO, G.; ALLEGRINI, M. Full cost accounting in the analysis of separated waste collection efficiency: A methodological proposal. **Journal of environmental management**, v. 167, p. 59-65, 2016.

DRI, M.CANFORA, P.; ANTONOPOULOS, I. S.; GAUDILLAT, P. Best environmental management practice for the waste management sector. **JRC Science for Policy Report**, EUR, v. 29136, 2018.

DUTRA, R. M. S.; YAMANE, L.H.; SIMAN, R.R. Influence of the expansion of the selective collection in the sorting infrastructure of waste pickers' organizations: A case study of 16 Brazilian cities. **Waste Management**, v. 77, p. 50-58, 2018.

DYSON, B.; CHANG, N.B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste management**, 25(7), pp.669-679, 2005.

ESPINOZA, A., BAUTISTA, S., NARVÁEZ, P. C., ALFARO, M.; CAMARGO, M. Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model. **Journal of Cleaner Production**, 141, 1145–1163, 2017.

ESPÍRITO SANTO. **Diagnóstico sobre a gestão dos resíduos sólidos no Espírito Santo**. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Espírito Santo (PERS-ES). 2019.

FAN, C.; FAN, S. K. S.; WANG, C. S.; TSAI, W. P. Modeling computer recycling in Taiwan using system dynamics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 167-175, 2018.

FERREIRA, F.; AVELINO, C.; BENTES, I.; MATOS, C.; TEIXEIRA, C. A. Assessment strategies for municipal selective waste collection schemes. **Waste management**, v. 59, p. 3-13, 2017.

FERRONATO, N.; PREZIOSI, G.; PORTILLO, M. A. G.; LIZARAZU, E. G. G.; TORRETTA, V. Assessment of municipal solid waste selective collection scenarios with geographic information systems in Bolivia. **Waste Management**, v. 102, p. 919-931, 2020.

FIGUEIREDO, J. C. B. Estudo da difusão da tecnologia móvel celular no Brasil: uma abordagem com o uso de Dinâmica de Sistemas. **Production**, v. 19, n. 1, p. 230-245, 2009.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics—after the first decade. **Management Science**, v. 14, n. 7, p. 398-415, 1968.

FREITAS, L. F. da S.; FONSECA, I. F. da. **Diagnóstico sobre catadores de resíduos sólidos**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.silvaporto.com.br/admin/downloads/CATADORES_BRASIL_IPEA_2012.pdf>.

FUSS, M.; BARROS, R. T. V.; POGANIETZ, W. Designing a framework for municipal solid waste management towards sustainability in emerging economy countries-An application to a case study in Belo Horizonte (Brazil). **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 655-664, 2018.

GEOBRAS. Boletim de medição nº 196. **Contrato nº MS/SESE Nº 10.792/91. Março/2019. Prefeitura Municipal da Serra**. 2019.

GEORGIADIS, P. An integrated System Dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 32, p. 116-137, 2013.

GHISOLFI, V., CHAVES, G.D.L.D., SIMAN, R.R.; XAVIER, L.H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste management**, 60, pp.14-31, 2017

GIANNIS, A.; CHEN, M.; YIN, K.; TONG, H.; VEKSHA, A. Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 19, n. 3, p. 1177-1185, 2017.

GODECKE, M. V.; CHAVES, I. R.; NAIME, R. H. Gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: o caso de Canoas, RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 7, n. 7, p. 1430-1439, 2012.

GOMES, M. H. S. C.; OLIVEIRA, E. C.; BRESCIANI, L. P.; PEREIRA, R. S. Política Nacional de Resíduos Sólidos: Perspectivas de Cumprimento da Lei 12.305/2010 pelos municípios brasileiros, paulistas e da região do ABC. **Revista de Administração da UFSM**, v. 7, p. 93-110, 2014.

GRODZIŃSKA-JURCZAK, M.; TOMAL, P.; TARABULA-FIERTAK, M.; NIESZPOREK, K.; READ, A.D. Effects of an educational campaign on public environmental attitudes and behaviour in Poland. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 46, n. 2, p. 182–197, 2006.

GUADAGNIN, M.R.; PONT, C. B. D.; VALVASSORI, M. L.; WESSLER, L. P.. Inclusão de catadores em programas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos no Sul Catarinense: Acafor um caminho e exemplo possível. **Tecnologia e Ambiente**, v. 20, 2014.

HAN, H.; ZHANG, Z. O impacto da política de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos na redução de resíduos: um estudo de caso na China. **Journal of Material Cycles and Waste Management** , v. 19, n. 1, pág. 382-393, 2017.

HOORNWEG, D., BHADA-TATA, P. What a waste: a global review of solid waste management. **Urban Development Series Knowledge Papers**, v.15, p. 1-98, 2012.

IBRAHIM, M. A. Modeling of risk for improper sorting of waste at Recycling Centers. **Waste Management**, v. 102, p. 550-560, 2020.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 135-158, jan./abr. 2011.

JOUHARA, H.; CZAJZZYNSKA, D.; GHAZAL, H.; KRZYZYNSKA, R.; ANGUILANO, L.; REYNOLDS, A. J.; SPENCER, N. Municipal waste management systems for domestic use. **Energy**, v. 139, p. 485-506, 2017.

KAYAKUTLU, G.; DAIM, T.; KUNT, M.; ALTAY, A.; SUHARTO, Y. Scenarios for regional waste management. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 1323-1335, 2017.

KNICKMEYER, D. Social factors influencing household waste separation: A literature review on good practices to improve the recycling performance of urban areas. **Journal of cleaner production**, v. 245, p. 118605, 2020.

KO, S.; KIM, W.; SHIN, S.; SHIN, J. The economic value of sustainable recycling and waste management policies: The case of a waste management crisis in South Korea. **Waste Management**, v. 104, p. 220-227, 2020.

KOLLIKATHARA, N., FENG, H.; YU, D. A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues. **Waste management**, 30(11), pp.2194-2203, 2010.

KUNC, M. System dynamics: a soft and hard approach to modelling. In: **Winter Simulation Conference (WSC)**. IEEE, p. 597-606, 2017.

LAKHAN, C. Exploring the relationship between municipal promotion and education investments and recycling rate performance in Ontario, Canada. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 222–229, 2014.

MAGALHÃES, S. C. Z. **Influência das modalidades de execução da coleta seletiva na composição gravimétrica dos resíduos secos recicláveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2020.

MAALOUF, A.; DI MARIA, F.; EL-FADEL, M. Reciclagem de resíduos em um contexto em desenvolvimento: implicações econômicas de um esquema de coleta separada na UE. In: **Waste Management as Economic Industry Towards Circular Economy**. Springer, Cingapura, 2020. p. 105-114.

- MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; GANDOLLA, M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Européia. **Revista Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 379-385, 2016.
- MARSHALL, R. E., FARAHBAKHS, K. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. **Waste Management**, v. 33, n. 4, p. 988- 1003, 2013.
- MEMON, M. A. Integrated solid waste management based on the 3R approach. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 12, n. 1, p. 30-40, 2010.
- MMEREKI, D.; BALDWIN, A.; LI, B. A comparative analysis of solid waste management in developed, developing and lesser developed countries. **Environmental Technology Reviews**, v. 5, n. 1, p. 120-141, 2016.
- MORECROFT, J. DW. **Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach**. John Wiley & Sons, 2015.
- MUNGUÍA-LÓPEZ, A. D. C.; ZAVALA, V. M.; SANTIBAÑEZ-AGUILAR, J. E.; PONCE-ORTEGA, J. M. Optimization of municipal solid waste management using a coordinated framework. **Waste Management**, v. 115, p. 15-24, 2020.
- MWANZA, B. G.; MBOHWA, C.; TELUKDARIE, A. The Influence of Waste Collection Systems on Resource Recovery: A Review. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 846-853, 2018.
- PAES, M. X.; DE MEDEIROS, G. A.; MANCINI, S. D.; BORTOLETO, A. P.; DE OLIVEIRA, J. A. P.; KULAY, L. A. Municipal solid waste management: Integrated analysis of environmental and economic indicators based on life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 119848, 2020.
- PANIS, S.; OLIVEIRA, M. A.; VERÇOZE, M. O. V.; SOUSA, J. S.; MELO, L. F. **A coleta seletiva realizada pela prefeitura através de pontos de entrega voluntária em Teresina - PI**. In: III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Goiânia/GO–19 a 22/11. 2012.
- PARREIRA, G. F. **Coleta seletiva solidária: agregando valor pela integração da cadeia de reciclagem**. 2010. 156 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- PEREIRA, T. S.; FERNANDINO, G. Evaluation of solid waste management sustainability of a coastal municipality from northeastern Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v. 179, p. 104839, 2019.
- PINHA, A. C. H.; SAGAWA, J. K. A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 122350, 2020.
- PMS – Prefeitura Municipal da Serra. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS)**. Serra, 2013
- POMBERGER, R.; SARC, R.; LORBER, K. E. Dynamic visualisation of municipal waste management performance in the EU using Ternary Diagram method. **Waste management**, v. 61, p. 558-571, 2017.

RIBEIRO, L. C. S.; FREITAS, L. F. S.; CARVALHO, J. T. A.; OLIVEIRA FILHO, J. D. **Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável do Estado do Rio de Janeiro.** *Nova Economia*, v. 24, n. 1, p. 191-214, 2014.

RODRIGUES, W.; MAGALHÃES FILHO, L.N. L.; PEREIRA, R. S. Análise dos Determinantes dos custos de resíduos sólidos urbanos nas capitais estaduais brasileiras. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, n. 1, p. 130-141, 2016.

ROUSTA, K.; BOLTON, K.; LUNDIN, M.; DAHLÉN, L. Quantitative assessment of distance to collection point and improved sorting information on source separation of household waste. **Waste Management**, v. 40, n. 2015, p. 22–30, 2015.

RUTKOWSKI, J E.; RUTKOWSKI, E W. Expanding worldwide urban solid waste recycling: The Brazilian social technology in waste pickers inclusion. **Waste Management & Research**, v. 33, n. 12, p. 1084-1093, 2015.

SAUVE, G.; VAN ACKER, K. The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 110216, 2020.

SILVA, C. L. Proposal of a dynamic model to evaluate public policies for the circular economy: Scenarios applied to the municipality of Curitiba. **Waste Management**, v. 78, p. 456–466, 2018.

SILVA, A.; ROSANO, M.; STOCKER, L.; GORISSEN, L. From waste to sustainable materials management: Three case studies of the transition journey. **Waste management**, v. 61, p. 547-557, 2017.

SILVA, S. P. **A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da Economia Solidária.** Texto para discussão. Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29271>

SIMAN, R. R.; YAMANE, L. H.; BALDAM, R. L.; TACKLA, J. P.; LESSA, S. F. A.; BRITTO, P. M. Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. **Waste Management**, v. 105, p. 148-169, 2020.

SIMONETTO, E. O.; BORENSTEIN, D. A decision support system for the operational planning of solid waste collection. **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1286-1297, 2007.

SIMONETTO, E. O.; LÖBLER, M. L. Simulação baseada em System Dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos. **Production**, v. 24, n. 1, p. 212-224, 2014.

SOLTANI, A.; SADIQ, R.; HEWAGE, K.. The impacts of decision uncertainty on municipal solid waste management. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 305-315, 2017.

SOUKIAZIS, E.; PROENÇA, S. The determinants of waste generation and recycling performance across the Portuguese municipalities—A simultaneous equation approach. **Waste Management**, v. 114, p. 321-330, 2020.

SRIVASTAVA, V. ISMAIL, S. A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, n. 2, p. 317-337, 2015.

STERMAN, J.D. **Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: Editora McGraw Hill, 2000.

STRUK, M. Distance and incentives matter: The separation of recyclable municipal waste. **Resources, conservation and recycling**, v. 122, p. 155-162, 2017.

SUFIAN, M.A.; BALA, B.K. Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. **Waste Management**, 27(7), pp.858-868 2007.

SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, v. 52, p. 50-61, 2016.

SUTHAR, S.; RAYAL, P.; AHADA, C. PS. Role of different stakeholders in trading of reusable/recyclable urban solid waste materials: A case study. **Sustainable cities and society**, v. 22, p. 104-115, 2016.

TAM, V. WY; LI, J.; CAI, H. System dynamic modeling on construction waste management in Shenzhen, China. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 5, p. 441-453, 2014.

TEIXEIRA, C.; RUSSO, M.; MATOS, C.; BENTES, I. Evaluation of operational, economic, and environmental performance of mixed and selective collection of municipal solid waste: Porto case study. **Waste Management & Research**, v. 32, n. 12, p. 1210-1218, 2014.

UE - União Europeia. Parlamento Europeu e do Conselho. **Diretiva 2018/851/CE** de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2008/98 / CE relativa aos resíduos, 2018.

VARELLA, C. V. S. **Revirando o lixo: possibilidades e limites da reciclagem como alternativa de tratamento dos resíduos sólidos**. Dissertação de Pós- Graduação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

VENTANA SYSTEM. Vensim Help. Revision Sept 2020. Disponível em: <<http://www.vensim.com/documentation/>>. Acesso em 16 out. 2020.

XIAO, S.; DONG, H.; GENG, Y.; TIAN, X.; LIU, C.; LI, H. Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. **Journal of Cleaner Production**, p. 121366, 2020.

XU, L.; LING, M.; LU, Y.; SHEN, M. Influências externas na formação do comportamento de separação de resíduos dos residentes: Evidência de famílias em Hangzhou, China. **Habitat International** , v. 63, p. 21-33, 2017.

XU, L.; LING, M.; WU, Y. Economic incentive and social influence to overcome household waste separation dilemma: A field intervention study. **Waste Management**, v. 77, p. 522–531, 2018.

XUE, Y.; WEN, Z.; BRESSERS, H.; AI, N. Can intelligent collection integrate informal sector for urban resource recycling in China? **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 307–315, 2019.

WANG, S.; WANG, J.; YANG, S.; LI, J.; ZHOU, K. From intention to behavior: Comprehending residents' waste sorting intention and behavior formation process. **Waste Management**, v. 113, p. 41-50, 2020.

WANG, S.; WANG, J.; ZHAO, S.; YANG, S. Information publicity and resident's waste separation behavior: an empirical study based on the norm activation model. **Waste management**, v. 87, p. 33-42, 2019.

YOUSEFLOO, A.; BABAZADEH, R. Designing an integrated municipal solid waste management network: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118824, 2020.

YUAN, H.; CHINI, A.; LU, Y.; SHEN, L. A dynamic model for assessing the effects of management strategies on the reduction of construction and demolition waste. **Waste management**, v. 32, n. 3, p. 521-531, 2012.

ZAGONEL, A. A.; CORBET, T. F. Levels of confidence in System dynamics modeling: a pragmatic approach to assessment of dynamic models. **In: 24th International Conference of the System Dynamics Society**. Nijmegen, The Netherlands, 2006.

ZAMAN, A. U. A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems. **Journal of cleaner production**, v. 124, p. 41-50, 2016.

ZHANG, B.; LAI, K.; WANG, B.; WANG, Z. From intention to action: How do personal attitudes, facilities accessibility, and government stimulus matter for household waste sorting?. **Journal of environmental management**, v. 233, p. 447-458, 2019.

ZHANG, Z.; WANG, X. Nudging to promote household waste source separation: Mechanisms and spillover effects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 162, p. 105054, 2020.

ZON, J. L. N.; LEOPOLDINO, C. J.; YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R. Waste pickers organizations and municipal selective waste collection: Sustainability indicators. **Waste Management**, v. 118, p. 219-231, 2020.

APÊNDICE A – EQUAÇÕES E UNIDADES DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

O Quadro A-1 apresenta as variáveis do modelo proposto de acordo com o tipo (estoque, fluxo e auxiliares), bem como as equações matemáticas relacionadas e suas respectivas unidades.

Quadro A-1 – Equações matemáticas do modelo de dinâmica de sistemas.

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
Estoque	População	hab	Crescimento populacional + 517510	1
Estoque	Geração total de RDO	ton	Geração de RDO - Coleta convencional - Coleta seletiva-Resíduo não coletado + 170778	2
Estoque	Resíduos não coletados	ton	Resíduo não coletado	3
Estoque	Resíduos coletados por coleta convencional	ton	Coleta convencional-Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada-Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura + 0	4
Estoque	Aterro Sanitário	ton	Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada+ Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura + Geração de rejeitos da CS PEV por catador + Geração de rejeitos da CS PEV por empresa terceirizada + Geração de rejeitos da CS PEV por prefeitura + Geração de rejeitos da CS PP por catador + Geração de rejeitos da CS PP por empresa terceirizada + Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura + 0	5
Estoque	Resíduos coletados por coleta seletiva	ton	Coleta seletiva-Coleta seletiva mista-Coleta seletiva PEV-Coleta seletiva porta a porta + 0	6
Estoque	Resíduos coletados por CS PP	ton	Coleta seletiva porta a porta-CS PP por catador-CS PP por empresa terceirizada-CS PP por prefeitura, valor inicial + 0	7
Estoque	Resíduos coletados por CS PP por prefeitura	ton	CS PP por prefeitura-Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura-Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura + 0	8
Estoque	Resíduos coletados por CS PP por catador	ton	CS PP por catador-Geração de recicláveis da CS PP por catador-Geração de rejeitos da CS PP por catador + 0	9
Estoque	Resíduos coletados por CS PP por empresa terceirizada	ton	CS PP por empresa terceirizada-Geração de recicláveis da CS PP por empresa terceirizada-Geração de rejeitos da CS PP por empresa terceirizada + 0	10
Estoque	Resíduos recicláveis CS PP	ton	Geração de recicláveis da CS PP por catador + Geração de recicláveis da CS PP por empresa terceirizada + Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura + 0	11
Estoque	Resíduos coletados por CS PEV	ton	Coleta seletiva PEV-CS PEV por catador-CS PEV por empresa terceirizada-CS PEV por prefeitura +0	12

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
Estoque	Resíduos coletados por CS PEV por prefeitura	ton	CS PEV por prefeitura-Geração de recicláveis da CS PEV por prefeitura-Geração de rejeitos da CS PEV por prefeitura + 0	13
Estoque	Resíduos coletados por CS PEV por catador	ton	CS PEV por catador-Geração de recicláveis da CS PEV por catador-Geração de rejeitos da CS PEV por catador +0	14
Estoque	Resíduos coletados por CS PEV por empresa terceirizada	ton	CS PEV por empresa terceirizada-Geração de recicláveis da CS PEV por empresa terceirizada-Geração de rejeitos da CS PEV por empresa terceirizada, valor inicial)	15
Estoque	Resíduos recicláveis CS PEV	ton	Geração de recicláveis da CS PEV por catador + Geração de recicláveis da CS PEV por empresa terceirizada + Geração de recicláveis da CS PEV por prefeitura + 0	16
Estoque	Resíduos coletados por CS mista	ton	Coleta seletiva mista-CS mista por catador-CS mista por empresa terceirizada-CS mista por prefeitura + 0	17
Estoque	Resíduos coletados por CS mista por prefeitura	ton	CS mista por prefeitura-Geração de recicláveis da CS mista por prefeitura-Geração de rejeitos da CS mista por prefeitura + 0	18
Estoque	Resíduos coletados por CS mista por catador	ton	CS mista por catador-Geração de recicláveis da CS mista por catador-Geração de rejeitos da CS mista por catador + 0	19
Estoque	Resíduos coletados por CS mista por empresa terceirizada	ton	CS mista por empresa terceirizada-Geração de recicláveis da CS mista por empresa terceirizada-Geração de rejeitos da CS mista por empresa terceirizada + 0	20
Estoque	Resíduos recicláveis CS mista	ton	Geração de recicláveis da CS mista por catador+Geração de recicláveis da CS mista por empresa terceirizada+Geração de recicláveis da CS mista por prefeitura + 0	21
Fluxo	Crescimento populacional	hab/ano	População*Taxa geométrica de crescimento populacional	22
Fluxo	Geração de RDO	ton/ano	População*Taxa de geração RDO <i>per capita</i>	23
Fluxo	Coleta convencional	ton/ano	Geração total de RDO*Percentual de coleta convencional	24
Fluxo	Coleta seletiva	ton/ano	Geração total de RDO*Percentual de coleta seletiva	25
Fluxo	Coleta seletiva porta a porta	ton/ano	Resíduos coletados por coleta seletiva*percentual de coleta seletiva porta a porta	26
Fluxo	Coleta seletiva PEV	ton/ano	Resíduos coletados por coleta seletiva*Percentual de coleta seletiva PEV	27
Fluxo	Coleta seletiva mista	ton/ano	Resíduos coletados por coleta seletiva*Percentual de coleta seletiva mista	28
Fluxo	Resíduo não coletado	ton/ano	Geração total de RDO*(1-(Percentual de coleta convencional+Percentual de coleta seletiva))	29
Fluxo	Aterramento dos resíduos	ton/ano	Percentual de CC por prefeitura*Resíduos coletados por CC	30

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
	coletados por prefeitura			
Fluxo	Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada	ton/ano	Percentual de CC por empresa terceirizada*Resíduos coletados por CC	31
Fluxo	CS PP por prefeitura	ton/ano	Percentual de CS PP por prefeitura*Resíduos coletados por CS PP	32
Fluxo	CS PP por catador	ton/ano	Percentual de CS PP por catador*Resíduos coletados por CS PP	33
Fluxo	CS PP por empresa terceirizada	ton/ano	Percentual de CS PP por empresa terceirizada*Resíduos coletados por CS PP	34
Fluxo	Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS PP por prefeitura*Percentual de rejeitos da CS PP prefeitura	35
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PP por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS PP por prefeitura*(1-Percentual de rejeitos CS PP prefeitura)	36
Fluxo	Geração de rejeitos da CS PP por catador	ton/ano	Resíduos CS PP por catador*Percentual de rejeitos da CS PP catador	37
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PP por catador	ton/ano	Resíduos CS PP por catador*(1-Percentual de rejeitos CS PP catador)	38
Fluxo	Geração de rejeitos da CS PP por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS PP por empresa terceirizada*Percentual de rejeitos da CS PP empresa terceirizada	39
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PP por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS PP por empresa terceirizada*(1-Percentual de rejeitos CS PP empresa terceirizada)	40
Fluxo	CS PEV por prefeitura	ton/ano	Percentual de CS PEV por prefeitura*Resíduos coletados por CS PEV	41
Fluxo	CS PEV por catador	ton/ano	Percentual de CS PEV por catador*Resíduos coletados por CS PEV	42
Fluxo	CS PEV por empresa terceirizada	ton/ano	Percentual de CS PEV por empresa terceirizada*Resíduos coletados por CS PEV	43
Fluxo	Geração de rejeitos da CS PEV por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS PEV por prefeitura*Percentual de rejeitos da CS PEV prefeitura	44
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PEV por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS PEV por prefeitura*(1-Percentual de rejeitos da CS PEV prefeitura)	45
Fluxo	Geração de rejeitos da	ton/ano	Resíduos CS PEV por catador*Percentual de rejeitos da CS PEV catador	46

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
	CS PEV por catador			
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PEV por catador	ton/ano	Resíduos CS PEV por catador*(1-Percentual de rejeitos da CS PEV catador)	47
Fluxo	Geração de rejeitos da CS PEV por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS PEV por empresa terceirizada*Percentual de rejeitos da CS PEV empresa terceirizada	48
Fluxo	Geração de recicláveis da CS PEV por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS PEV por empresa terceirizada*(1-Percentual de rejeitos da CS PEV empresa terceirizada)	49
Fluxo	CS mista por prefeitura	ton/ano	Percentual de CS mista por prefeitura*Resíduos coletados por CS mista	50
Fluxo	CS mista por catador	ton/ano	Percentual de CS mista por catador*Resíduos coletados por CS mista	51
Fluxo	CS mista por empresa terceirizada	ton/ano	Percentual de CS mista por empresa terceirizada*Resíduos coletados por CS mista	52
Fluxo	Geração de rejeitos da CS mista por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS mista por prefeitura*Percentual de rejeitos da CS mista prefeitura	53
Fluxo	Geração de recicláveis da CS mista por prefeitura	ton/ano	Resíduos CS mista por prefeitura*(1-Percentual de rejeitos da CS mista prefeitura)	54
Fluxo	Geração de rejeitos da CS mista por catador	ton/ano	Resíduos CS mista por catador*Percentual de rejeitos da CS mista catador	55
Fluxo	Geração de recicláveis da CS mista por catador	ton/ano	Resíduos CS mista por catador*(1-Percentual de rejeitos da CS mista catador)	56
Fluxo	Geração de rejeitos da CS mista por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS mista por empresa terceirizada*Percentual de rejeitos da CS mista empresa terceirizada	57
Fluxo	Geração de recicláveis da CS mista por empresa terceirizada	ton/ano	Resíduos CS mista por empresa terceirizada*(1-Percentual de rejeitos da CS mista empresa terceirizada)	58
Auxiliar	Taxa geométrica de crescimento populacional	1/ano	Withlookup (time, ((2020,0)-(2040,0.1)],(2020,0.021),(2021,0.017),(2026,0.013),(2031,0.009),(2036,0.006),(2039,0.006))	59
Auxiliar	Percentual de coleta seletiva	1/ano	Política de ampliação da coleta seletiva	60

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
Auxiliar	Percentual de coleta convencional	1/ano	1-Percentual de coleta seletiva	61
Auxiliar	Política de ampliação da coleta seletiva	1/ano	Withlookup (time, ((2020,0)-(2040,1]),(2020,0.0071),(2023,0.0071),(2027,0.0071),(2031,0.0071),(2035,0.0071),(2039,0.0071)))	62
Auxiliar	Custo da CC por prefeitura	R\$/ano	Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura*Custo unitário CC por prefeitura	63
Auxiliar	Custo da CC por empresa terceirizada	R\$/ano	Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada*Custo unitário CC por empresa terceirizada	64
Auxiliar	Custo de disposição final dos resíduos coletados prefeitura	R\$/ano	Aterramento dos resíduos coletados por prefeitura*Custo unitário de aterramento	65
Auxiliar	Custo de disposição final dos resíduos coletados empresa terceirizada	R\$/ano	Aterramento dos resíduos coletados por empresa terceirizada*Custo unitário de aterramento	66
Auxiliar	Custo CS porta a porta prefeitura	R\$/ano	CS PP por prefeitura*custo unitário CS porta a porta prefeitura	67
Auxiliar	Custo CS porta a porta catador	R\$/ano	CS PP por catador*custo unitário CS porta a porta catador	68
Auxiliar	Custo CS porta a porta empresa terceirizada	R\$/ano	CS PP por empresa terceirizada*custo unitário CS porta a porta empresa terceirizada	69
Auxiliar	Custo total da coleta seletiva porta a porta	R\$/ano	Custo CS porta a porta catador + Custo CS porta a porta empresa terceirizada + Custo CS porta a porta prefeitura	70
Auxiliar	Custo CS PEV prefeitura	R\$/ano	CS PEV por prefeitura*custo unitário CS PEV prefeitura	71
Auxiliar	Custo CS PEV catador	R\$/ano	CS PEV por catador*custo unitário CS PEV catador	72
Auxiliar	Custo CS PEV empresa terceirizada	R\$/ano	CS PEV por empresa terceirizada*custo unitário CS PEV empresa terceirizada	73
Auxiliar	Custo total da coleta seletiva PEV	R\$/ano	Custo CS PEV catador + Custo CS PEV empresa terceirizada + Custo CS PEV prefeitura	74
Auxiliar	Custo CS mista prefeitura	R\$/ano	CS mista por prefeitura*custo unitário CS mista prefeitura	75
Auxiliar	Custo CS mista catador	R\$/ano	CS mista por catador*custo unitário CS mista catador	76

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
Auxiliar	Custo CS mista empresa terceirizada	R\$/ano	CS mista por empresa terceirizada*custo unitário CS mista empresa terceirizada	77
Auxiliar	Custo total da coleta seletiva mista	R\$/ano	Custo CS mista catador+Custo CS mista empresa terceirizada+Custo CS mista prefeitura	78
Auxiliar	Custo total da coleta seletiva	R\$/ano	Custo total da coleta seletiva PEV+Custo total da coleta seletiva porta a porta+Custo total da coleta seletiva mista	79
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PP prefeitura	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PP por prefeitura	80
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PP catador	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PP por catador	81
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PP empresa terceirizada	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PP por empresa terceirizada	82
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PEV prefeitura	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PEV por prefeitura	83
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PEV catador	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PEV por catador	84
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS PEV empresa terceirizada	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS PEV por empresa terceirizada	85
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS mista prefeitura	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS mista por prefeitura	86
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS mista catador	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS mista por catador	87
Auxiliar	Custo disposição final rejeitos CS mista	R\$/ano	Custo unitário de aterramento*Geração de rejeitos da CS mista por empresa terceirizada	88

Tipo	Variável	Unidade	Equação	Nº
	empresa terceirizada			
Auxiliar	Custo total de disposição final	R\$/ano	Custo de disposição final resíduos coletados prefeitura+Custo disposição final rejeitos CS PEV catador+Custo disposição final rejeitos CS PEV empresa terceirizada+Custo disposição final rejeitos CS PEV prefeitura+Custo disposição final rejeitos CS PP catador+Custo disposição final rejeitos CS PP empresa terceirizada+Custo disposição final rejeitos CS PP prefeitura+Custo disposição final resíduos coletados empresa terceirizada+Custo disposição final CS mista empresa terceirizada+Custo disposição final rejeitos CS mista catador+Custo disposição final rejeitos CS mista prefeitura	89
Auxiliar	Custo de educação ambiental	R\$/ano	IF THEN ELSE(Política de educação ambiental=0, 0, IF THEN ELSE(Política de educação ambiental=RAMP(0.0263158, 2020 , 2039) , 67500 , 135000))	90
Auxiliar	Custo total de gerenciamento RDO	R\$/ano	Custo de educação ambiental + Custo total da coleta seletiva + Custo total de coleta convencional +Custo total de disposição final	91

O Quadro A-2 mostra as equações para a política de ampliação da coleta seletiva e política de educação ambiental, nos cenários em que a implementação da política seria totalmente efetiva e quando seria parcialmente efetiva. Como no cenário base não envolve a implementação de políticas, o valor atual apresentado no Quadro A-1 permanece durante todo período simulado e, por esse motivo, não foi incluído no Quadro A-2.

Quadro A-2 – Equações para variáveis dependendo do cenário de política de ampliação da coleta seletiva.

Cenário	Política parcialmente efetiva	Política totalmente efetiva
Política de ampliação da coleta seletiva	Withlookup (time, ([(2020,0)-(2040,1)],(2020,0.0071),(2023,0.06),(2027,0.08),(2031,0.11),(2035,0.13),(2039,0.15))	Withlookup (time, ([(2020,0)-(2040,1)],(2020,0.0071),(2023,0.12),(2027,0.17),(2031,0.21),(2035,0.26),(2039,0.3))
Política de educação ambiental	RAMP(0.0263158, 2020 , 2039)	RAMP(0.0526316, 2020 , 2039)

Por fim, foram calculadas as equações das curvas de aprendizagem S que representam cada implementação da política de educação ambiental para os cenários 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Para isso, foram utilizadas funções sigmoidais, que apresentam o crescimento de algum fator em um intervalo de tempo. Essas funções possuem esse nome devido ao formato de “S” que os seus gráficos possuem, e existem várias funções sigmoidais, porém a função utilizada nesta pesquisa foi:

$$Y = a * \tanh(bx + c) + d \quad \dots(\text{Eq. 35})$$

Em que “Y” representa o percentual de rejeitos, “x” representa o impacto da política pública de educação ambiental, as variáveis “a” e “d” determinam os limites da curva e as variáveis “b” e “c” determinam o comportamento que ela irá assumir, podendo ser lento, intermediário ou rápido. Os percentuais de rejeito de cada modalidade de coleta seletiva para o município da Serra – ES, de acordo com dados da Aderes (2017), são iguais a 5,99% para modalidade porta a porta, 11,37% para modalidade PEV e 11,07% para modalidade mista.

O cálculo da função sigmoide para a modalidade porta a porta foi realizado, conforme detalhado na Equação 36, considerando-se que a função tangente hiperbólica varia entre -1 e 1. Conseqüentemente, obtém-se que:

$$\begin{cases} a * (-1) + d = 0,0599 \\ a * (1) + d = 0,0144 \end{cases} \quad (\text{Eq. 36})$$

Resolvendo o sistema:

$$2d = 0,0599 + 0,0144 \therefore d = \frac{0,0743}{2} = 0,0371;$$

$$2a = 0,0144 - 0,0599 \therefore a = \frac{-0,0455}{2} = -0,0228 .$$

O coeficiente b determina a inclinação da curva, que está relacionada com a velocidade com que o percentual de rejeitos diminui em função da implementação da política de educação ambiental e que está relacionado com o comportamento de aprendizagem da população. Adotando $b = 10$, considerando que o comportamento possui uma velocidade de crescimento intermediária, e sendo $a = -0,0228$, $F(0,5) = 0,0300$ e $d = 0,0371$, conforme calculado anteriormente, é possível calcular o valor de c :

$$F(x) = a * \tanh(bx + c) + d$$

$$F(0,5) = -0,0228 * \tanh(10 * (0,5) + c) + 0,0371$$

$$\frac{0,0300 - 0,0371}{-0,0228} = \tanh(5 + c) \therefore 5 + c = \text{ArcTanh} \left[\frac{-0,0071}{-0,0228} \right]$$

$$c = -4,6730$$

Da mesma forma, foi calculado o valor de c adotando $b = 5$ e $b = 30$, representando um comportamento de aprendizagem mais rápido ($c = -2,1730$) e mais lento ($c =$

–14,6730), respectivamente. A adoção dos diferentes valores de “b” foi utilizada para a simulação dos cenários. Seguindo a mesma lógica matemática, foi possível obter as equações dos percentuais de rejeitos para todas as modalidades, conforme apresentado no Quadro A-3.

Quadro A-3 - Equações do percentual de rejeito para cada modalidade de coleta.

Modalidade	Comportamento	Equação do percentual de rejeito
Porta a porta	Intermediário	$y = -0,0228 * \tanh(10x - 4,6730) + 0,0371$
	Rápido	$y = -0,0228 * \tanh(5x - 2,1730) + 0,0371$
	Lento	$y = -0,0228 * \tanh(30x - 14,6730) + 0,0371$
PEV	Intermediário	$y = -0,0432 * \tanh(10x - 4,6730) + 0,0705$
	Rápido	$y = -0,0432 * \tanh(5x - 2,1730) + 0,0705$
	Lento	$y = -0,0432 * \tanh(30x - 14,6730) + 0,0705$
Mista	Intermediário	$y = -0,0421 * \tanh(10x - 4,6730) + 0,0686$
	Rápido	$y = -0,0421 * \tanh(5x - 2,1730) + 0,0686$
	Lento	$y = -0,0421 * \tanh(30x - 14,6730) + 0,0686$

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – RESULTADO DO TESTE DE INTEGRAÇÃO

A Tabela B-1 apresenta os resultados dos testes de integração do método de Runge Kutta.

Tabela B-1 - Resultados do custo total de gerenciamento de RDO para diferentes valores de time step utilizando o método de integração de Runge Kutta.

	Time Step (TS)	Diferença	Time Step (TS)	Diferença	Time Step (TS)	Diferença	Time Step (TS)
Ano	1	TS 1 - TS 0,5	0,5	TS 0,5 - TS 0,25	0,25	TS 0,25 - TS 0,125	0,125
2020	0	0%	0,00	0%	0	0%	0
2021	25.861.688	0%	25.861.702,00	0%	25.861.712	0%	25.861.724
2022	35.788.296	0%	35.788.312,00	0%	35.788.336	0%	35.788.344
2023	39.871.576	0%	39.871.576,00	0%	39.871.588	0%	39.871.596
2024	41.801.720	0%	41.801.704,00	0%	41.801.700	0%	41.801.712
2025	42.928.648	0%	42.928.628,00	0%	42.928.612	0%	42.928.620
2026	43.745.640	0%	43.745.604,00	0%	43.745.588	0%	43.745.596
2027	44.432.368	0%	44.432.324,00	0%	44.432.300	0%	44.432.320
2028	45.053.744	0%	45.053.696,00	0%	45.053.672	0%	45.053.696
2029	45.632.720	0%	45.632.664,00	0%	45.632.640	0%	45.632.656
2030	46.176.896	0%	46.176.840,00	0%	46.176.808	0%	46.176.832
2031	46.688.308	0%	46.688.248,00	0%	46.688.208	0%	46.688.232
2032	47.167.252	0%	47.167.188,00	0%	47.167.156	0%	47.167.172
2033	47.615.340	0%	47.615.284,00	0%	47.615.244	0%	47.615.272
2034	48.034.832	0%	48.034.772,00	0%	48.034.732	0%	48.034.768
2035	48.426.968	0%	48.426.912,00	0%	48.426.864	0%	48.426.912
2036	48.792.120	0%	48.792.064,00	0%	48.792.016	0%	48.792.060
2037	49.131.008	0%	49.130.944,00	0%	49.130.892	0%	49.130.932
2038	49.450.312	0%	49.450.252,00	0%	49.450.208	0%	49.450.248
2039	49.759.204	0%	49.759.144,00	0%	49.759.104	0%	49.759.148

Fonte: Autoria própria