

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELO DE *SYSTEM DYNAMICS* PARA A GESTÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE ARARAQUARA-SP**

Augusto Cesar Hernandes Pinha

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa

São Carlos
Março/2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

**MODELO DE *SYSTEM DYNAMICS* PARA A GESTÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE ARARAQUARA-SP**

Augusto Cesar Hernandez Pinha

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa

São Carlos
Março/2019



Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Augusto Cesar Hernandez Pinha, realizada em 07/03/2019:

Juliana K. Sagawa

Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa
UFSCar

Paulo R. Politano

Prof. Dr. Paulo Rogerio Politano
UFSCar

Walther Azzolini Júnior

Prof. Dr. Walther Azzolini Júnior
USP

*“A natureza criou o tapete sem fim que recobre a superfície da terra.
Dentro da pelagem desse tapete vivem todos os animais, respeitosamente.
Nenhum o estraga, nenhum o rói, exceto o homem.”*

Monteiro Lobato

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Profa. Juliana Keiko Sagawa pela orientação, dedicação e pelo apoio, bem como por sempre me desafiar a buscar a perfeição ou o mais próximo dela no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores, membros da banca, Profs. Paulo Rogério Politano e Walther Azzolini Junior, pelas suas contribuições que enriqueceram o trabalho.

Às Sras. Marta e Vânia, da Cooperativa Acácia, bem como ao Sr. Agamemnon, do Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Arararaquara que me receberam e muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Também ao Sr. Welington José Rocha dos Santos, do setor de controladoria da autarquia, pela sua prestatividade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar, Profs Pedro Carlos Oprime, Roberto Antônio Martins, Moacir Godinho Filho e Nilton Luiz Menegon, que ministraram suas disciplinas com maestria e ampliaram meu conhecimento na área.

Aos colegas discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção que foram ótimas companhias nos intervalos entre as aulas e de estudos.

Aos Srs. Robson Lopes dos Santos e Lucas Gomes Duarte, secretários do Programa, pelo auxílio quando necessário e por sempre orientar os procedimentos administrativos. Também a Sra. Regilene Vieira Inácio, que, mesmo no pouco tempo que esteve na secretaria, foi de extrema importância para auxiliar nas questões administrativas.

Aos meus colegas de trabalho e chefias, tanto do Departamento de Computação quanto da Pró-Reitoria de Graduação, que me cobriram em minha ausência e permitiram que eu cumprisse os créditos e desenvolvesse o trabalho, sem o qual não teria tempo suficiente para realizar todas as tarefas que um mestrado demanda.

Aos amigos Thiago, Mirela, Amandia, Felipe e Rafael, pelo apoio e companheirismo, em todos os momentos.

Aos meus pais, por terem me ensinado a sempre correr atrás dos meus sonhos e a nunca desistir no meio do caminho.

A todos vocês, meu eterno agradecimento!

RESUMO

PINHA, A. C. H. **Modelo de System Dynamics para a Gestão de Resíduos Sólidos do Município de Araraquara-SP.** 175 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019.

A gestão eficiente dos resíduos sólidos municipais é um dos objetivos da administração pública, principalmente diante da obrigação de se atender a legislação vigente desde 2010, com a promulgação da Lei 12.305. Sendo assim, os gestores devem ter disponibilidade de toda e qualquer ferramenta que os auxiliem na tomada de decisão e que lhes permita realizar projeções, preferencialmente no longo prazo, de modo a atender essa necessidade. Uma dessas ferramentas é a modelagem e simulação. Esse trabalho tem por objetivo apresentar um modelo de *System Dynamics* que possibilite aos gestores a simulação e projeção de determinados cenários que influenciam na geração de resíduos, bem como na tomada de decisão no que se refere ao tratamento necessário e os recursos disponíveis e necessários para tal fim. O modelo proposto determina, num período de 10 anos, a população do município de Araraquara e a quantidade de resíduos gerados, separando-o por tipos, conforme nomenclatura utilizada, sendo, basicamente, tipos de papeis, plásticos, metais, vidro e outros resíduos que não se enquadram nos grupos anteriores. Também são determinados a quantidade efetivamente reciclada e os custos e receitas envolvidos no processo. A partir do modelo desenvolvido foram propostos seis cenários. O primeiro é aquele em que não há investimentos tanto por parte do município quanto da Cooperativa e simula-se a continuação das atividades para os próximos 10 anos mantendo-se constantes as taxas de crescimento e de coleta. O segundo cenário simula o aumento da coleta seletiva dos atuais 8,5% para 15% nos próximos 5 anos, por meio da educação e informação da população. Com isso, prevê-se a diminuição na quantidade de resíduos enviados indevidamente para o aterro sanitário no período com relação ao cenário 1 na ordem de 14.585 toneladas. Por outro lado, devido a necessidade de mais cooperados para atenderem a demanda, a Cooperativa passa a registrar prejuízo ao longo do tempo. No terceiro cenário é feita a inclusão da prática da compostagem em relação ao cenário 1. Com essa implementação, diminui em 50.534 toneladas a quantidade de resíduos encaminhada indevidamente ao aterro sanitário. O quarto cenário simula uma melhoria nas atividades desenvolvidas pelos cooperados, principalmente na triagem e separação. Com isso, o lucro obtido, em relação ao cenário 1 é superior em R\$790.000,00, aproximadamente. O quinto cenário reúne as implementações realizadas nos cenários 2 e 4, ou seja, aumento da coleta e melhoria nas atividades desenvolvidas pela Cooperativa. O resultado obtido é que o prejuízo percebido no cenário 2 é eliminado e a Cooperativa volta a registrar lucro ao longo do tempo. Por fim, o sexto cenário simula todas as

alterações concomitantemente, ou seja, aumento da coleta, inclusão da compostagem e melhoria na eficiência da Cooperativa. Dessa forma, diminui em 65.118 toneladas a quantidade de resíduos encaminhada ao aterro sanitário. Tendo em vista que a implementação de cada um dos cenários 2 a 6 possuem custos específicos, seja para a Cooperativa, seja para o município, concluiu-se que o cenário 5 apresenta resultados positivos ao município com um investimento possível de ser executado pelo Poder Público. O trabalho contribuiu com a literatura ao ampliar os modelos existentes e se realizar um maior detalhamento dos tipos de resíduos coletados e comercializados, bem como suas quantidades e o valor real praticado no mercado. Além disso, foi possível fazer uma análise financeira a partir dos cenários simulados, apresentando as receitas e despesas existentes no processo e seu crescimento ao longo do tempo. Permitiu analisar que apenas a receita obtida com a comercialização dos recicláveis não é suficiente para suprir as despesas da Cooperativa, sendo necessária a união com o Poder Público e com outras de modo a aumentar o poder de barganha e de negociação.

Palavras-chaves: Gestão Municipal de Resíduos Sólidos, Coleta Seletiva, System Dynamics, Modelagem, Tomada de decisão, Cenários.

ABSTRACT

PINHA, A. C. H. **Modelo de System Dynamics para a Gestão de Resíduos Sólidos do Município de Araraquara-SP.** 175 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2019.

The efficient management of municipal solid waste is one of the objectives of public administration, especially considering the compliance with the legislation in force since 2010, with the enactment of Law 12,305. Therefore, managers should have available all the tools that can assist them in decision making and enable them to carry out projections, preferably in the long term, in order to meet this requirement. One of these tools is modeling and simulation. This work aims to present a System Dynamics model that allows managers to simulate and forecast certain scenarios that influence the generation of solid waste, as well as a model that supports decision making regarding the necessary treatment and resources for such end. The proposed model aims to determine, for a period of 10 years, the population of Araraquara and the amount of generated waste, separating it by type, namely paper, plastics, metals, glass and other residues. The actually recycled quantity and the costs and revenues involved in the process are also determined. With the developed model, six scenarios were proposed, each of which presents a different situation of the city and the Cooperative in charge of the collection and sorting of the recyclable material. The first scenario is where there is no change and the last one is where the city increases its capacity for selective collection and implements composting and the Cooperativa increases the efficiency of its activities. After simulations, it was concluded that scenario five, in which there is an increase in the amount of waste collected by the Selective Collection and an improvement in the process of sorting and separation presents positive results to the city with a viable investment to be executed by the Public Authorities. This work contributed to the literature by expanding the existing models and making a greater detail of the types of wastes collected and commercialized, as well as their quantities and the actual value practiced. In addition, it was possible to make a financial analysis from the simulated scenarios, showing the revenues and expenses existing in the process and their growth over time. It allowed to analyze that only the revenue obtained with the commercialization of the recyclables is not sufficient to supply the expenses of the Cooperative, being necessary the union with the Public Authorities and with other ones in order to increase the bargaining power of negotiation.

Keywords: Municipal Solid Waste Management, Selective Collection, System Dynamics, Modeling, Decision taking, Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Notação de estoque e fluxo	28
Figura 2 - Cálculos no tempo K.....	31
Figura 3 - Exemplo de cálculo de equação de taxa.....	33
Figura 4 - Exemplo de cálculo de equação auxiliar	35
Figura 5 - Atividades de reciclagem no setor de uso de resíduos	51
Figura 6 - Limites do sistema	55
Figura 7 - Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos da Malásia	56
Figura 8 - Resultados da simulação.....	57
Figura 9 - Modelo de Simulação para análise de geração e disposição de RSU.....	64
Figura 10 - Modelo de Gestão de resíduos sólidos desenvolvido	67
Figura 11- Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos de Dacca.	69
Figura 12 - Modelo proposto para o PIMGRS de Bandung	71
Figura 13 - Representação do subsistema referente ao aterro sanitário	73
Figura 14 - Projeção de utilização de aterro.....	74
Figura 15 - Custos simulados para a gestão de resíduos de Bandung	74
Figura 16 - Receitas provenientes do tratamento dos resíduos de Bandung	75
Figura 17 - Relação entre os módulos	90
Figura 18- Início da simulação (módulo 1)	91
Figura 19 - Cálculo de coleta de PET e Aparas de papel (módulo 2)	95
Figura 20 - Cálculo de coleta de PP e PS (módulo 2)	96
Figura 21- Cálculo de coleta de PEAD (módulo 2).....	96
Figura 22 - Cálculo de coleta de outros tipos de resíduos (módulo 2).....	97
Figura 23 - Cálculo de coleta de metais (módulo 2)	97
Figura 24 - Receitas da Cooperativa (módulo 3).....	99
Figura 25 - Despesas (módulo 4).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do RSU no Brasil e exemplos.....	38
Tabela 2 - Quantidade de municípios com iniciativas de coleta seletiva	38
Tabela 3 - Quantidade de publicações por periódico	42
Tabela 4 - Palavras-chave mais encontradas	44
Tabela 5 - Cenários para a GMRS de Bancoque	55
Tabela 6 - Quantidades coletadas por ano	105
Tabela 7 - Estatística de Desigualdade de Theil das variáveis analisadas.....	119
Tabela 8 - Cobertura das despesas por meio do comércio de recicláveis.....	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regiões abordadas nos trabalhos.....	41
Quadro 2 - Trabalhos selecionados na RBS	45
Quadro 3 - Intervenções propostas pelos autores.....	59
Quadro 4 - Pacotes de intervenções.....	59
Quadro 5 - Descrição dos módulos do modelo	88
Quadro 6 - Variáveis do Módulo 1: Geração de resíduos.....	92
Quadro 7 - Variáveis do Módulo 2: Quantidade de resíduos por tipo e receita.....	98
Quadro 8 - Variáveis do Módulo 3: Receitas.....	99
Quadro 9 - Variáveis do Módulo 4: Despesas.....	102
Quadro 10 - Valores utilizados no módulo 1 - geração de resíduo.....	107
Quadro 11 - Valores utilizados no módulo 2 - quantidade de resíduos e receita.....	108
Quadro 12 - Valores utilizados no módulo 3 - receitas.....	109
Quadro 13 - Valores utilizados no módulo 4 - despesas	109
Quadro 14 - Questões para avaliação de um modelo	112
Quadro 15 - Cenários simulados com o modelo	127

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de publicações por ano	43
Gráfico 2 - Trabalhos desenvolvidos por continente.....	43
Gráfico 3 - Valores reais e simulados da variável PP e PS reciclado	120
Gráfico 4 - Valores reais e simulados da variável papel reciclado.....	121
Gráfico 5 - Valores reais e simulados da variável PEAD reciclado.....	122
Gráfico 6 - Valores reais e simulados da variável PET reciclado	122
Gráfico 7 - Valores reais e simulados da variável Coleta Seletiva.....	123
Gráfico 8 - Valores reais e simulados da variável receita com recicláveis.....	123
Gráfico 9 - Comparação das quantidades de resíduos enviadas para aterro	129
Gráfico 10 - Comparação da quantidade advinda da Coleta Seletiva	130
Gráfico 11 - Resultados financeiros com ampliação da Coleta Seletiva	131
Gráfico 12 - Resultados financeiros sem ampliação da Coleta Seletiva	132
Gráfico 13 - Comparação de resíduos reciclados	133
Gráfico 14 - Receitas obtidas com recicláveis.....	133
Gráfico 15 - Participação dos grupos na receita de recicláveis	134
Gráfico 16 - Participação dos grupos na quantidade de resíduos recicláveis.....	135
Gráfico 17- Comparativo das despesas	136
Gráfico 18 - Comparação dos lucros acumulados.....	137
Gráfico 19 - Investimento do DAAE na implantação do cenário 5	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

DAAE - Departamento Autônomo de Água e Esgoto

EPS - Poliestireno Expandido (Isopor®)

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

GMRS - Gestão Municipal de Resíduos Sólidos

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

IFDM - Índice FUIRJAN de Desenvolvimento Municipal

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

NAFTA - Acordo de Livre Comércio da América do Norte

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PET - Politereftalato de Etileno

PMA - Prefeitura Municipal de Araraquara

PMGIRS - Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PPR - Polipropileno (Ráfia)

RBS - Revisão Bibliográfica Sistemática

PS - Poliestireno

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SD - *System Dynamics*

STArt - *State of the Art through Systematic Review* (Estado da Arte por meio de Revisão Sistemática)

WEEE - *Waste Electrical and Electronic Equipment* (Resíduo de equipamento elétrico e eletrônico)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO TEMA, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	23
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	26
2.1. DEFINIÇÕES E HISTÓRICO DE <i>SYSTEM DYNAMICS</i>	26
2.2. PROCESSO DE MODELAGEM.....	28
2.3. EQUAÇÕES BÁSICAS DE <i>SYSTEM DYNAMICS</i>	29
2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	36
2.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	39
2.5.1. UTILIZAÇÃO DE <i>SYSTEM DINAMICS</i> PARA GESTÃO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	46
2.6. DETALHAMENTO DE ALGUNS MODELOS DE <i>SYSTEM DYNAMICS</i> PARA GESTÃO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS	61
3. METODOLOGIA.....	76
3.1. ETAPAS DA PESQUISA.....	79
4. DESENVOLVIMENTO.....	81
4.1. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	81
4.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	87
4.3. VALORES E PARÂMETROS DO MODELO DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA O ESTUDO DE CASO	105
4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO.....	110
4.5. TESTE PARA VERIFICAÇÃO DO MODELO QUANTO À SUA VIABILIDADE.....	116
5. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	125
6. CONCLUSÕES.....	143
6.1. DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS	147
REFERÊNCIAS	148
Anexos.....	153

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita a caracterização do tema, formula-se o problema e os objetivos de pesquisa bem como sua justificativa, e se apresenta a organização deste trabalho.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO TEMA, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS DA PESQUISA

Com a promulgação da Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, ficou instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações relativas à gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos em território brasileiro (BRASIL, 2010). A referida Lei define gestão integrada de tais resíduos como “o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, e sob a premissa do desenvolvimento sustentável” (BRASIL, 2010) e tem como objetivo o enfrentamento aos variados problemas decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos.

Para efeitos de entendimento, a PNRS define resíduos sólidos como todo “material, substância objeto ou bem descartados resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido” (BRASIL, 2010). Também se enquadra ainda, nessa definição, os gases contidos em recipientes e os líquidos que não possam ser despejados em redes de coleta de esgoto ou corpos d’água.

A PNRS tem como objetivo, nessa ordem de prioridade, a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, cujo objetivo é estabelecer que os resíduos sólidos sejam reutilizados, reciclados, recuperados ou utilizados na compostagem ou no aproveitamento energético, e que os rejeitos sejam descartados de modo a se observar normas específicas que evitem danos ou riscos à saúde

pública e à segurança, bem como a se minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Além disso, a PNRS institui alguns instrumentos para fins de gestão dos resíduos sólidos. Um deles é o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), sendo sua elaboração de fundamental importância para que a União ou órgãos por ela controlados destinem recursos ou incentivos a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos.

O PMGIRS, ainda em conformidade com a Lei 12.305/2010, deve apresentar um diagnóstico da situação do território no que tange ao tema, identificar áreas para disposição final ambientalmente adequada, definir procedimentos operacionais e especificações mínimas a serem adotadas nos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, apresentar indicadores de desempenho operacional e ambiental dos serviços prestados, bem como as regras para a gestão dos resíduos gerados no município (BRASIL, 2010).

Em Araraquara, cidade do interior de São Paulo que é objeto de estudo desta pesquisa, fazem parte do processo de gestão de resíduos sólidos a Prefeitura Municipal (PMA) do município e o Departamento Autônomo de Água e Esgotos (DAAE), por meio da gestão e da proposição de políticas, e a Cooperativa Acácia de Coleta Seletiva, conveniada com a PMA/DAAE, que executa o trabalho de coleta, triagem, reciclagem, processamento, beneficiamento e comercialização de sucatas e resíduos sólidos urbanos, conforme consta em seu Estatuto.

Em 2013 foi apresentado seu PMGIRS, documento este elaborado por uma empresa terceirizada, contratada pelo DAAE, cuja finalidade foi apresentar o cenário do município e as propostas e metas de longo prazo, conforme demanda a legislação.

No referido Plano foi considerado um intervalo de tempo de 16 anos (de 2015 a 2031) com algumas metas de redução de envio de materiais recicláveis para o aterro sanitário, iniciando em 30 a 33%, em 2015, (cenário pessimista, ou seja, de menor valor, e otimista, de maior valor, respectivamente) e finalizando em 50 e 53% (cenários pessimista e otimista), em 2031 (ARARAQUARA, 2013).

Com relação aos resíduos compostáveis, o mesmo plano apresenta metas definidas como 25 a 28%, em 2015, objetivando envio para compostagem

numa taxa de 55 a 58%, em 2031, considerando-se os cenários pessimistas e o otimista (ARARAQUARA, 2013).

Modelos de simulação são ferramentas relevantes para a análise dos cenários que possam auxiliar os gestores responsáveis pela tomada de decisão e implantação do PMGIRS. Uma abordagem apropriada a este contexto é a de *System Dynamics* (SD).

Tal método foi desenvolvido durante a década de 1950 por Jay W. Forrester, do Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), e lida com interações de larga escala, podendo ser usado em sistemas complexos e dinâmicos. Segundo Forrester (1961), as vantagens desse método são permitir a realimentação do resultado do sistema, ou seja, o acúmulo do efeito obtido, e a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo de maneira a possibilitar a percepção das consequências das decisões tomadas.

Diante do exposto, o presente trabalho busca responder as seguintes questões:

1. Como um modelo de simulação baseado na abordagem de *System Dynamics* pode auxiliar na tomada de decisão para uma gestão integrada de resíduos sólidos do município de Araraquara?
2. Como fazer uma análise financeira, por meio de ferramentas de Engenharia Econômica, a partir dos cenários obtidos na simulação, de modo a planejar os recursos necessários para a gestão desses resíduos?

Assim, os objetivos do trabalho são:

1. Desenvolver um modelo de *System Dynamics* para gestão de resíduos sólidos que possibilite a simulação do crescimento populacional (com dados do IBGE), da geração de resíduos, discriminando o tipo gerado, ou seja, resíduos orgânicos e inorgânicos (classificando-os nos diferentes tipos), da quantidade enviada para aterro, compostagem e reciclagem e dos custos e receitas envolvidos no processo ao longo do tempo;
2. Realizar uma análise financeira, a partir das simulações do modelo, para indicar aos gestores um cronograma de desembolso de recursos e para verificar as possibilidades de recuperação de parte dos investimentos mediante a venda do material reciclado.

Mais especificamente, pretende-se elaborar cenários utilizando um modelo que atenda a legislação e o contexto brasileiros, tomando por base alguns

modelos encontrados na literatura e considerando aspectos tais como geração de resíduos, suas características e a destinação correta, além de, posteriormente, realizar a análise financeira. O modelo deve permitir que sejam feitas, dentre outras possíveis, as seguintes simulações:

- População do município, baseado no crescimento populacional dos últimos 10 anos;
- Quantidade de resíduos sólidos gerada, inclusive discriminando a composição (orgânico e reciclável, e dentre os recicláveis papel, plástico, metal e vidro);
- Quantidade de resíduos destinada para aterro, para compostagem e para reciclagem, bem como a quantidade que foi efetivamente reciclada;
- Custos e receitas envolvidos na operação de coleta e tratamento de materiais recicláveis.

Juntamente com os cenários, pretende-se descobrir as variáveis que mais impactam no sistema, ou seja, aquelas que afetam em maior proporção o comportamento das demais. Além disso, com o modelo, pretende-se analisar a evolução do descarte de resíduos sólidos, já que esta é relacionada com o número de habitantes e com as práticas adotadas pelo município, e também realizar a análise financeira com os resultados encontrados nos cenários.

Tomando por base a previsão no PMGIRS de o município implantar a compostagem e reduzir o envio de resíduos recicláveis para os aterros, pretende-se identificar a quantidade de resíduo disponível para esse tratamento, evitando o envio inadequado para aterro sanitário, que possui vida útil limitada, e atendendo, portanto, as disposições da PNRS.

Com os resultados encontrados, será possível auxiliar os gestores nas políticas a serem adotadas para atingir as metas e no planejamento dos recursos financeiros. Entende-se que as atividades de gestão de resíduos sólidos são um dever do Estado e, assim sendo, não devem ser feitas tendo em vista a geração de lucro, mas sim como um investimento de fundo perdido. Por outro lado, se aplicável, buscar-se-á utilizar outras ferramentas da Engenharia Econômica para se estimar quanto dos investimentos podem ser recuperados.

Sendo assim, a modelagem baseada em *System Dynamics* tem por objetivo apresentar cenários futuros e, dentro do possível, apresentar resultados que apontem os setores que devem ser atendidos com o objetivo de atingir as metas propostas ou até mesmo superá-las.

Esse trabalho não pretende fazer alterações na realidade da cidade nem será realizado em conjunto com os gestores. Entretanto, a partir dos resultados obtidos e dentro da possibilidade, o pesquisador pretende apresentar o trabalho tanto para validar o modelo e os cenários, quanto para sugerir possíveis adequações nas práticas e políticas adotadas, caso elas existam e sejam menos convenientes do que as simuladas.

1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Também conhecida como “Morada do Sol”, Araraquara fica a 270 km de São Paulo. A cidade é considerada uma das mais desenvolvidas do Brasil em qualidade de vida pelos seus índices de saúde, renda e educação. Além disso, apresenta outros bons índices, como o Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) que acompanha anualmente o desenvolvimento socioeconômico dos municípios brasileiros nas áreas de emprego e renda, educação e saúde. O município também ocupa posição de destaque no que se refere ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH): 14ª colocação no *ranking* nacional, com 0,815, o que é considerado muito alto por estar entre 0,8 e 1 na escala (UNDP, 2010). O IDH é uma medida resumida do progresso em longo prazo, considerando dimensões tais como renda, educação e saúde.

Considerando essas boas características do município em vários aspectos, não se pode contentar com baixas taxas de crescimento no que tange a gestão de resíduos sólidos. Araraquara apresenta características que podem torná-la referência em outros índices além daqueles propostos pelo IFDM e o IDH.

Além disso, somente pela existência da legislação que trata do tema, ou seja, o PNRS, já se justificaria a necessidade da pesquisa. Entretanto, considerando que o município de Araraquara elaborou seu PMGIRS, cabe agora apontar, com base na modelagem do sistema, os resultados que podem ser obtidos com a implantação das políticas definidas no referido Plano e outras que possam surgir no decorrer do trabalho.

Como será apresentado no capítulo 2, poucos trabalhos, nos últimos 13 anos, adotaram o uso de *System Dynamics* para a gestão de resíduos sólidos. No Brasil, apenas os trabalhos de Simonetto et. al, (2014), Simonetto (2014) e Simonetto e Löbler (2014) foram desenvolvidos utilizando a união desses temas.

Entretanto, a região adotada e a abordagem do problema é a mesma em todos. Dada a necessidade de cada município brasileiro implantar seu PMGIRS, o método se mostra eficiente por lidar com cenários futuros e contribuir com o desenvolvimento de políticas de gestão.

Em relação aos trabalhos internacionais, a revisão bibliográfica sistemática realizada demonstrou que, no período analisado, apenas 19 trabalhos abordaram as questões relacionadas à geração, à coleta e ao tratamento dos resíduos sólidos utilizando a modelagem e simulação por meio de SD e que apenas 9 apresentaram alguma avaliação financeira, ainda que superficial, do processo.

Em consonância com o baixo número de trabalhos desenvolvidos, a proposta do presente trabalho é reunir pontos positivos abordados em diferentes modelos elaborados e construir um único modelo que seja mais completo e apresente resultados detalhados com relação à destinação de resíduos, principalmente a reciclagem, considerando o cenário brasileiro e o da região adotada, bem como apresente os investimentos necessários e o retorno possível (ou a possibilidade de recuperação de parte do investimento).

Na RBS foi possível verificar que os trabalhos existentes focavam, em sua maioria, no crescimento populacional e, conseqüentemente, no aumento da geração de resíduos, mas poucos tratavam da questão da destinação adequada para tratamento (reciclagem e compostagem, por exemplo), tampouco separavam os resíduos por classes com base em sua composição, de modo a definir políticas para lidar com esses resíduos. Além disso, os trabalhos encontrados que tratavam de aspectos financeiros, nem sempre apontavam todos os custos e os investimentos necessários para a gestão dos resíduos, nem a receita possível de se obter.

Dessa forma, pretende-se complementar o corpo teórico existente na literatura ao se elaborar um modelo de simulação que reúna todos esses aspectos e que, com o resultado obtido, permita realizar uma análise financeira por meio de fluxo de caixa e outras ferramentas da área de Engenharia Econômica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é realizada a revisão da literatura, onde são apresentadas as definições básicas do

método a ser utilizado, bem como seu histórico, a explanação do método de modelagem e definição de resíduos sólidos, com base na legislação vigente, bem como a revisão bibliográfica sistemática, realizada com o objetivo de apontar e discutir os trabalhos publicados relacionados ao tema. No fim do capítulo é realizado um detalhamento dos modelos que serão referência para a construção daquele que será utilizado neste trabalho. Já o Capítulo 3 apresenta a metodologia e as etapas da pesquisa. No Capítulo 4 é feito o desenvolvimento do modelo de simulação com base no estudo de caso. O capítulo 5 apresenta a simulação dos cenários e suas características. No capítulo 6 são feitas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros. Por fim as referências bibliográficas que norteiam o trabalho desenvolvido. O Anexo I apresenta um quadro geral dos trabalhos selecionados na RBS, com informações tais como objetivo, cenários, métodos adicionais utilizados pelos autores, avaliação financeira (caso tenha sido feita), contribuição e/ou diferencial e os resultados obtidos. O Anexo II apresenta a documentação referente ao modelo desenvolvido no software Vensim PLE e o Anexo III os cálculos da dependência existente do subsídio do município pela Cooperativa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados definições e histórico do método *System Dynamics* (Dinâmica de Sistemas), etapas de um processo de modelagem, definição de resíduos sólidos com base na Lei 12.305 de 2010, a revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de apontar os trabalhos relevantes sobre o tema e o detalhamento dos trabalhos encontrados na literatura.

2.1. DEFINIÇÕES E HISTÓRICO DE *SYSTEM DYNAMICS*

O método *System Dynamics* (SD) foi desenvolvido durante a década de 1950 por Jay Wright Forrester, do Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), e lida com interações de larga escala, podendo ser usado em sistemas complexos e dinâmicos. Por considerar o *feedback* no próprio sistema, fazendo a realimentação dos dados, com a modelagem de SD é possível simular longos períodos de tempo para a tomada de decisão em diversos problemas (AL-KHATIB et al., 2015).

Forrester (1961) exhibe o comportamento de sistemas industriais e apresenta como as políticas, decisões, estrutura e atrasos influenciam no crescimento e na estabilidade de um sistema, no caso, empresarial. Já em Forrester e Collins (1969) é apresentada a modelagem de problemas sociais mais amplos.

Uma das vantagens desse método é a possibilidade da realimentação do resultado do sistema, ou seja, o acúmulo do efeito obtido e a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo de maneira a possibilitar a percepção dos efeitos das decisões tomadas (STERMAN, 2000).

A origem do comportamento de um sistema está em sua estrutura, que consiste em ciclos de resposta (*feedback*), estoques, fluxos e interações não lineares criadas na interação física e institucional do sistema com o processo de tomada de decisão dos agentes que atuam sobre ele (STERMAN, 2000).

Em SD são utilizados diagramas que definem a estrutura do sistema, como o diagrama de ciclo causal, ou simplesmente diagrama de causas, e o de estoque e fluxos.

O diagrama causal enfatiza a estrutura de *feedback* do sistema e representa a resposta obtida pelas variáveis em determinada situação. Essa

resposta pode ser positiva (também chamado de reforço) ou negativa (chamada de balanço) de modo a indicar o quanto a variável dependente sofre alteração quando a variável independente é alterada. Uma resposta positiva indica que, à medida que o resultado da variável independente aumenta, o da variável dependente também aumenta. Já a resposta negativa indica o inverso, ou seja, se o resultado da variável independente cresce, o da variável dependente diminui (STERMAN, 2000; AL-KHATIB et al., 2015). Sua representação é uma seta circular além da indicação de reforço (R) ou balanço (B).

O diagrama de estoque e fluxos faz a comunicação dos resultados do modelo com as diferentes variáveis do sistema.

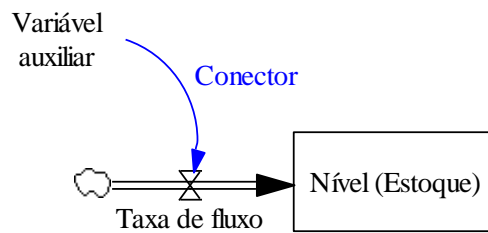
System Dynamics utiliza uma notação específica de estoque e fluxo:

- a) os estoques são representados por retângulos e indicam a acumulação ou o estado do sistema em determinado momento;
- b) fluxos são representados por flechas, cuja direção define se aquele fluxo é de entrada ou saída de informação, aumentando ou diminuindo o estoque;
- c) reguladores, também chamados de válvulas, controlam o fluxo, ou seja, regulam a intensidade com que há o fluxo de atividades no sistema; e
- d) nuvens representam o início e o fim do fluxo. Elas são consideradas de capacidade infinita.

Para se construir um modelo de SD deve-se identificar um problema e desenvolver uma hipótese dinâmica explicando a causa do problema. Depois de elaborado o modelo, ele recebe modificações nos valores de suas variáveis, ou seja, inicia a fase da modelagem utilizando informações esperadas a partir da implantação de políticas ou mudanças de comportamento de seus componentes por meio de ações dos diversos atores do modelo ao longo do tempo (DYSON; CHANG, 2005).

Existem *softwares* para modelar e simular utilizando-se Dinâmica de Sistemas. Os mais comuns são o STELLA, da ISEE Systems (www.iseesystems.com) e o Vensim PLE, da Ventana Systems (www.vensim.com). A Figura 1 representa uma notação de estoque e fluxo feito no *software* Vensim PLE.

Figura 1 - Notação de estoque e fluxo



Fonte: Elaborado pelo autor no Vensim PLE

2.2. PROCESSO DE MODELAGEM

Sterman (2000) define alguns passos para se organizar um processo de modelagem:

- a) articulação do problema;
- b) formulação da hipótese dinâmica;
- c) desenvolvimento do modelo de simulação;
- d) testes; e
- e) planejamento de políticas e avaliação.

Na articulação do problema é determinado o tema, definido o problema e deve se argumentar os motivos para aquele ser um problema. Também são definidas as variáveis chaves e os conceitos que devem ser considerados, além do tempo que será utilizado como horizonte de estudo. A definição do tempo não se limita apenas ao tempo futuro, mas desde quando o problema ou a questão existe em dado sistema, ou seja, seu histórico.

A formulação da hipótese dinâmica tem a função de apresentar o comportamento histórico das variáveis existentes no sistema, além das influências que elas terão no futuro. A hipótese deve ser formulada de modo a explicar a dinâmica como consequência endógena na estrutura de *feedback*. Por endógeno deve-se entender como algo relacionado internamente, ou seja, o padrão de comportamento dentro das fronteiras do sistema e suas interações. Em outras palavras, pode se dizer que a hipótese deve ser formulada considerando as respostas e/ou consequências das interações do próprio sistema. Os mapas de

estrutura causal devem se basear na hipótese inicial, nas variáveis chaves e outras informações disponíveis a partir de ferramentas disponíveis.

O modelo formulado deve especificar a estrutura e as regras de decisão; também devem ser inseridos os parâmetros, os relacionamentos e as condições iniciais e serem realizados testes de consistência.

Na fase de testes deve-se comparar se o modelo desenvolvido reproduz o comportamento do sistema real e se reage realisticamente quando submetido a condições extremas. Além disso, o teste para verificar a sensibilidade determina se o modelo age adequadamente frente às incertezas nos parâmetros e condições iniciais.

Por fim, ao se planejar as políticas e suas avaliações, especificam-se os cenários a partir de sua implementação, ou seja, definem-se quais alterações podem ser realizadas no modelo para que se saiba o resultado que se pode obter no mundo real. Nessa fase também se pode fazer testes de sensibilidade e estudos quanto às interações das políticas implantadas.

2.3. EQUAÇÕES BÁSICAS DE *SYSTEM DYNAMICS*

De acordo com Forrester (1961), um modelo deve ser capaz de alcançar alguns objetivos e apresentar algumas características, dentre elas:

- Demonstrar uma relação de causa e efeito;
- Apresentar natureza matemática simples;
- Possuir nomenclatura similar às terminologias industriais, econômicas e sociais;
- Ser extensível a inúmeras variáveis, sem exceder a capacidade computacional;
- Lidar com interações contínuas desconsiderando intervalos de soluções que provoquem discontinuidades.

Um modelo pode ser representado por muitos níveis (também chamados de estoques, conforme definido anteriormente), fluxos que transportem o conteúdo de um nível para outro, funções de decisão que controlam as taxas de fluxo entre os níveis e canais de informação que conectem as funções de decisão aos níveis.

Níveis são os reservatórios do sistema (estoques, bens em trânsito, número de empregados etc). É o resultado da diferença acumulada entre as entradas e saídas. Um teste para determinar se uma variável é um nível ou uma taxa é considerar se a variável continuaria ou não a existir e possuir significado em um sistema em repouso.

Taxas de fluxo definem o presente, os fluxos instantâneos entre os níveis no sistema. Correspondem à atividade, enquanto o nível mede o estado resultante do sistema em atividade. Essas taxas atualizam o valor do nível (estoque) do sistema de acordo com regras definidas pelas funções de decisão.

Funções de decisão, também chamadas de equações de taxa, são os demonstrativos de políticas que determinam como a informação disponível sobre os níveis guiam as decisões (taxas presentes). Todas as funções de decisão pertencem tanto a decisões gerenciais quanto a ações que são resultados inerentes de um estado físico do sistema.

Uma função de decisão pode ser uma equação simples que determina um fluxo em relação a um ou dois níveis. Por outro lado, uma função de decisão pode ser descrita por uma longa e elaborada sequência de cálculos que avança com base na avaliação de um número de conceitos intermediários necessários para uma tomada de decisão.

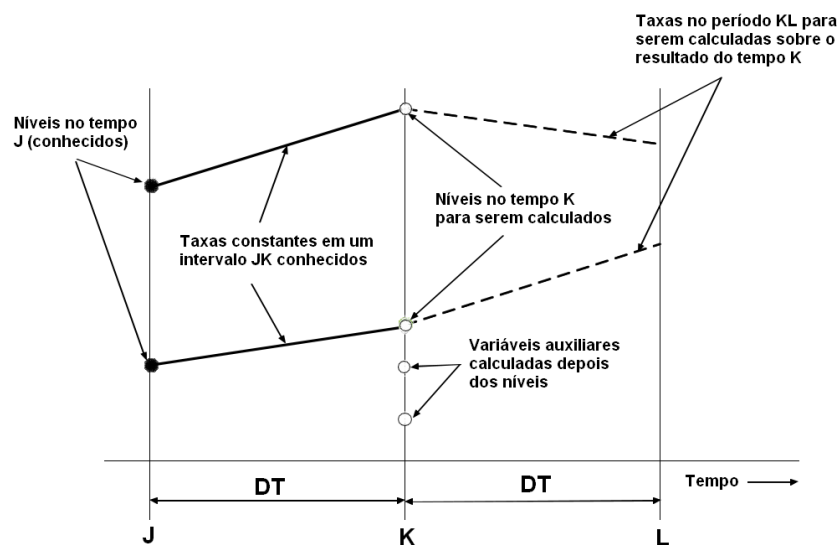
Um sistema de equações é escrito no contexto de certas convenções que determinam como as equações são avaliadas. Está se lidando aqui com um sistema de equações que controla a mudança de interações de um conjunto de variáveis conforme o tempo avança. Esse sistema de equações implica que as equações serão computadas periodicamente para produzir novos estados sucessivos do sistema.

Em cada instante de tempo pode haver uma sequência particular de cálculos implícitos pelo sistema de equações. O tempo total é dividido em pequenos intervalos DT ("delta T"), também chamados de incremento de tempo. Por definição, esse intervalo de tempo pode ser pequeno o suficiente tanto quanto se queira para que as taxas constantes de fluxo em um intervalo apresentem uma aproximação satisfatória de variação das taxas no sistema real.

Na Figura 2 temos a representação dos cálculos de um sistema nos instantes J, K e L, espaçados igualmente com uma distância DT . Suponhamos que o instante K representa o "presente". O intervalo JK acabou de ocorrer e as

informações sobre esse e tempos anteriores estão disponíveis para uso do sistema. Entretanto, não há, ainda, qualquer informação sobre o intervalo KL, ou o instante L que estejam disponíveis para uso, pois ele ainda não ocorreu. Mesmo as previsões não são informações futuras, mas sim conceitos no presente com relação ao futuro, baseados em informações do presente e do passado.

Figura 2 - Cálculos no tempo K



Fonte: Adaptado de Forrester (1961)

Para fins de avaliação numérica, as equações são separadas em dois tipos: equações de nível e equações de taxa. Em cada instante, primeiro são calculadas as equações de nível e os resultados ficam disponíveis para serem utilizados nas equações de taxas.

As equações de nível obtêm o nível no instante K, baseadas em valores dos níveis no instante J e nas taxas no intervalo JK. Quando é finalizado o cálculo das equações no instante K, todas as informações ficam disponíveis para o próximo instante e assim ocorre sucessivamente.

As equações de taxa são calculadas após as equações de nível no instante K. Assim, essas equações podem ser calculadas utilizando-se os valores obtidos nos níveis naquele instante. Os valores obtidos nas equações de taxas serão utilizados para determinar a ação que se tomará no intervalo KL. Taxas constantes implicam mudanças constantes nos intervalos de tempo. A inclinação da reta no intervalo JK é proporcional à taxa naquele instante e conecta os valores de cada ponto J e K.

Após o término do cálculo no intervalo K (níveis e taxas), o tempo é incrementado e os cálculos se repetem agora para o tempo L, de modo a apresentar o estado do sistema no instante L, e assim sucessivamente.

Como já dito anteriormente, os níveis são os conteúdos variáveis do reservatório (estoque, inventário etc.) do sistema. Sendo assim, eles existem independentemente do sistema estar em repouso, ou seja, sem fluxo ou movimento. Seus valores são atualizados a cada incremento de tempo. Um exemplo de equação de nível é o cálculo da população em um dado instante de tempo, apresentado na equação (1) e para fins de demonstração, serão utilizados os instantes J, K e L da Figura 2.

$$Pop(K) = Pop(J) + (DT)(NascImig(JK) - MortEmig(JK)), \quad (1)$$

em que

$Pop(K)$ é a população no instante K

DT é o incremento de tempo

$NascImig(JK)$ é a taxa de nascimentos e imigrações no intervalo JK

$MortEmig(JK)$ é a taxa de mortes e emigrações no intervalo JK

Em outras palavras, é possível dizer, por meio da equação, que a população no instante K está diretamente ligada à população no instante anterior (J) somada às variações ocorridas no intervalo de tempo anterior ao do cálculo (JK), ou seja, aumento e decréscimo no número de pessoas causado pelos nascimentos e entradas de indivíduos (emigrações) e pelas mortes e saídas de indivíduos (imigrações), respectivamente.

Tendo em vista a possibilidade de utilização de equações diferenciais, a equação (1) pode ser substituída pela equação (2), na forma de integral, que acumula o resultado no tempo passado em que ocorreram mudanças nos níveis.

$$Pop = Pop_{t=0} + \int_0^t (NascImig - MortEmig) dt \quad (2)$$

em que

$Pop_{t=0}$ é o valor do nível “população” no início da simulação.

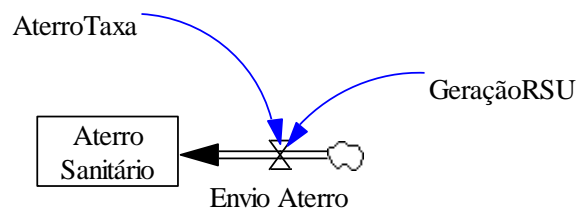
As equações de nível são independentes entre si, pois dependem unicamente do resultado de nível no momento anterior ao cálculo e das equações de taxas do intervalo anterior.

As equações de taxas, também chamadas de função decisão, definem as taxas de fluxo entre os níveis do sistema. Elas são calculadas a partir dos valores presentes de nível no sistema, frequentemente incluindo o valor do nível de entrada e transferindo o valor para o nível de saída.

Uma equação de taxa é determinada no instante K para determinar a ação que ocorrerá no intervalo seguinte (KL). Essas equações dependem unicamente dos valores das variáveis naquele instante K. Entretanto, taxas do intervalo anterior (JK) podem ser utilizadas ocasionalmente como um atalho para se obter uma taxa média dos intervalos passados. Uma característica da equação de taxa é determinar a ação do intervalo imediatamente posterior. Essas equações são independentes entre si e, portanto, a sequência na qual são calculadas é irrelevante.

A Figura 3 apresenta um trecho do modelo desenvolvido por Simonetto e Löbler (2014) que trata da quantidade de resíduos sólidos enviados para aterro sanitário, e que pode ser utilizado para exemplificar uma equação de taxa.

Figura 3 - Exemplo de cálculo de equação de taxa



Fonte: Adaptado de Simonetto e Löbler (2014).

A equação de taxa no intervalo KL seria a representada em (3)

$$\text{EnvioAterro}(KL) = \text{GeraçãoRSU}(K) \times \text{AterroTaxa}, \quad (3)$$

em que

$\text{EnvioAterro}(KL)$ é a taxa com que os resíduos sólidos urbanos vão para o estoque Aterro Sanitário;

AterroTaxa é a o percentual de resíduos enviados para aterro sanitário conforme resultados de órgãos especializados; e

*Geração*RSU(*K*) é a quantidade de resíduos gerados no instante *K*.

Por fim, as equações auxiliares são formuladas quando se torna muito complexo formular equações apenas a partir de níveis e taxas. Além disso, uma taxa pode ser mais bem definida utilizando-se um ou mais conceitos que podem ter significados independentes e relacionamento com determinado nível. Dessa forma, uma equação de taxa é “quebrada” em outras equações, que não dependem diretamente dos níveis aos quais se relacionam, ou quando a formulação pode se tornar complexa.

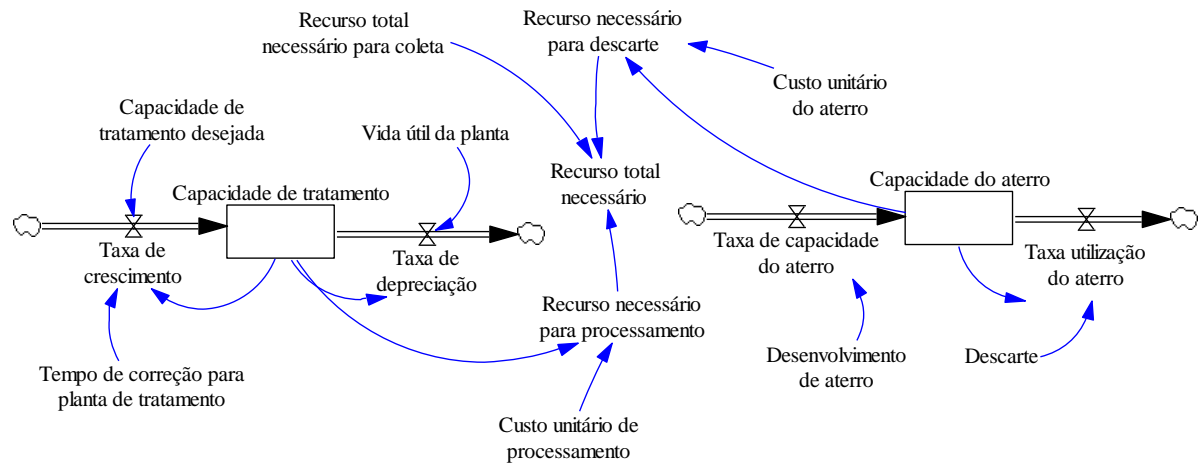
As equações auxiliares são calculadas no instante *K* depois do cálculo das equações de nível desse mesmo instante. O motivo é que como as taxas podem depender de resultados dos níveis, então se faz necessário ter esse valor antes dos demais cálculos. Entretanto, o cálculo das equações auxiliares é feito antes do cálculo das equações de taxas, tendo em vista que essas podem depender daquelas.

Diferentemente do que ocorre com as equações de taxa, o cálculo das equações auxiliares deve ser feito em uma sequência determinada. Pode acontecer uma situação em que duas ou mais equações auxiliares precisem estar calculadas para que seja possível realizar o cálculo seguinte.

Além disso, não pode ocorrer um laço fechado de equações auxiliares, onde duas ou mais variáveis dependam dos valores das outras, pois, nesse caso, os cálculos teriam que ser realizados simultaneamente, o que representa uma falha na formulação.

Na Figura 4 está representado parte do modelo desenvolvido por Sufian e Bala (2007) que trata da variável que indica o recurso público necessário para processar os resíduos sólidos. Com ele será realizado um exemplo de cálculo de equação auxiliar.

Figura 4 - Exemplo de cálculo de equação auxiliar



Fonte: Parte do modelo desenvolvido por Sufian e Bala (2007).

A variável “Recurso total necessário” é calculada pela equação (4) que apresenta as variáveis com as quais se calcula o valor dessa variável.

$$RTN = f(RTNPC, RNPDP, RNPP), \quad (4)$$

em que

RTN = Recurso Total Necessário;

$RTNPC$ = Recurso Total Necessário Para Coleta;

$RNPDP$ = Recurso Necessário Para Descarte; e

$RNPP$ = Recurso Necessário Para Processamento,

Por sua vez, e apenas para fins de exemplo, vamos detalhar o cálculo das variáveis $RNPDP$ e $RNPP$ nas equações (5) e (6)

$$RNPDP = g(CUA, CA) \quad (5)$$

$$RNPP = h(CUP, CT) \quad (6)$$

em que

CUA = Custo unitário do aterro (variável auxiliar); e

CA = Capacidade do aterro (nível);

CUP = Custo unitário de processamento (variável auxiliar); e

CT = Capacidade de tratamento (nível).

Se substituirmos as equações (5) e (6) na equação (4), chegaríamos a uma complexidade muito maior do que as anteriores e mesmo antes de detalhar o cálculo da variável *RTNPC*. A equação (7) apresenta o resultado da substituição.

$$RTN = f(RTNPC, g(CUA, CA), h(CUP, CT)), \quad (7)$$

Essa equação removeria as variáveis *RNPD* e *RNPP* do modelo, mas, por outro lado, poderia dificultar sua visualização além do indivíduo poder ter mais chances de erro na formulação das equações. Daí a necessidade de se utilizar equações auxiliares nos sistemas. No fragmento do modelo apresentado, pode-se observar também que a variável auxiliar RTN está indiretamente ligada a variáveis de nível.

2.4. RESÍDUOS SÓLIDOS

Em 02 de agosto de 2010, após mais de duas décadas de discussões no Congresso Nacional, foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) por meio da Lei 12.305, que visa à gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Com isso, teve início uma articulação dos entes federados, do setor produtivo e de toda sociedade para buscar soluções às questões relacionadas com a gestão desses resíduos, de modo a buscar melhor qualidade de vida para a população brasileira.

A legislação define resíduos sólidos como

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

São considerados, pela Lei 12.305/2010, resíduos sólidos urbanos aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas ou da varrição e limpeza de ruas e outros serviços de limpeza urbana. Além disso, podem se

enquadrar como resíduos domésticos aqueles originários de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, em razão de sua natureza, composição ou volume, desde que sejam caracterizados como não perigosos (BRASIL, 2010).

Entretanto, a legislação exclui da definição de resíduos sólidos provenientes de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço aqueles originários de serviços públicos, exceto os provenientes da limpeza urbana; os industriais; os de serviços de saúde, definidos em regulamentos específicos; os da construção civil; os agrossilvopastoris; os de transporte e os de mineração (BRASIL, 2010).

Sendo assim, conclui-se que são resíduos sólidos urbanos apenas os provenientes de atividades domésticas, de varrição e limpeza urbana, de atividades comerciais e de prestadoras de serviço considerados não perigosos.

Quanto à periculosidade, podem ser classificados como resíduos perigosos, ou seja, aqueles que devido a suas características específicas, tais como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, apresentam risco à saúde pública ou à qualidade ambiental. Os resíduos considerados não perigosos são aqueles que não se enquadram na classificação anterior (BRASIL, 2010).

Dentre os resíduos não perigosos, a norma brasileira NBR 10004/04 define materiais inertes como aqueles que não têm nenhum de seus constituintes solúveis em água, não são inflamáveis, não sofrem qualquer tipo de reação física ou química, nem afetam negativamente outras substâncias que entrem em contato com esse tipo de resíduo. Exemplos de resíduos inertes são entulhos de demolição, pedras, areia, madeira, dentre outros. Já os resíduos não inertes são aqueles que possuem propriedades tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2016 o Brasil gerou 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), ou seja, mais de 214 toneladas de RSU por dia. Mesmo assim, a quantidade gerada apresentou uma queda de 2% referente ao ano anterior. Entretanto, desse montante anual, apenas 41,7 milhões de toneladas foram enviadas para aterros sanitários. O restante foi enviado para lixões ou aterros controlados que não são adequados por não possuírem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e

degradações (ABRELPE, 2017). A Tabela 1 apresenta a composição dos resíduos descartados no Brasil.

Tabela 1 - Composição do RSU no Brasil e exemplos

Tipo de Resíduo	Proporção
Matéria orgânica (sobra de alimentos, alimentos deteriorados, lixo de banheiro, folhas de árvore e grama, madeira)	57,41%
Plástico (garrafas, embalagens, sacos e sacolas)	16,49%
Papel e papelão	13,16%
Vidro (garrafas, cristais, bulbos de lâmpada, vidros coloridos)	2,34%
Material ferroso	1,56%
Alumínio	0,51%
Materiais inertes (resíduos de construção, areia)	0,46%
Outros materiais (tecidos, couro, borracha, multi-laminados)	8,1%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados de IPEA (2017)

Apesar da Lei 12.305/2010 definir a implantação da coleta seletiva, por meio de associações ou cooperativas, como uma das condições para que o Distrito Federal e os Municípios tenham acesso a recursos destinados a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos ou outros benefícios para tais fins (BRASIL, 2010), percebe-se que em 2016, apenas 69,6% dos municípios brasileiros atendem essa condição, sendo na região Sul o melhor índice (89,8% ou seja, um total de 1454 municípios) e na região Centro-Oeste (43,3% o que corresponde a 202 municípios) o pior índice (ABRELPE, 2017). A Tabela 2 apresenta os números de acordo com as regiões brasileiras.

Tabela 2 - Quantidade de municípios com iniciativas de coleta seletiva

Região		Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
Possui coleta seletiva	Sim	263 (58,4%)	889 (49,6%)	202 (43,3%)	1.454 (87,2%)	1.070 (89,8%)	3.878 (69,6%)
	Não	187 (41,6%)	905 (50,45)	265 (56,7%)	214 (12,8%)	121 (10,2%)	1.692 (30,4%)
Total		450	1.794	467	1.668	1.191	5.570

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de ABRELPE (2017)

Na região sudeste do país foram geradas 104.790 toneladas/dia de RSU, um decréscimo de 2,4% ao total gerado em 2015. Sendo assim, a quantidade gerada por habitante diariamente equivale a 1,213Kg (1,213Kg/hab/dia). Mesmo assim, esse montante

teve um decréscimo de 3,1% em relação ao ano anterior, quando o valor havia sido de 1,252Kg/hab/dia.

De acordo com o estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil vão para reciclagem. A quantidade destinada à reciclagem ou reaproveitamento está aquém dos 30 a 40% que são esperados (IPEA, 2017).

2.5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Com o objetivo de reunir os trabalhos que foram desenvolvidos em Gestão Municipal de Resíduos Sólidos (GMRS) utilizando a abordagem de *System Dynamics* foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática. Com isso, foi possível avaliar o estado da arte e encontrar lacunas para as quais essa dissertação pode contribuir ao tentar preenchê-las.

Para a coleta dos artigos foram utilizadas as bases de dados *Engineering Village*, *Science Direct*, *Scopus*, *Scielo* e *Web of Science*, e para a busca de artigos alinhados com o tema desta pesquisa foram adotadas as seguintes palavras-chave: “*solid waste management*” AND “*System Dynamics*”. Para encontrar trabalhos em português utilizou-se a palavra-chave “Gestão de resíduos sólidos”, mas não foram encontrados resultados em base alguma. Entretanto, existia um conhecimento prévio de trabalhos em português que tratavam do tema, mas só foram listados quando se utilizou as palavras-chave em inglês. Uma hipótese para essa ocorrência é que os artigos da base de dados do Scielo são indexados com palavras chave em inglês, mesmo que o idioma do artigo da referida base seja o português.

Omitiram-se as palavras “*municipal*” ou “*urban*” com o objetivo de verificar trabalhos que não eram restritos a uma cidade, mas sim a uma região, como metrópoles, ou até mesmo estado ou países, se assim fosse possível, além de outras unidades regionais, como se percebeu após análise dos trabalhos. Os artigos pesquisados deveriam possuir no título, no resumo ou no decorrer do texto as palavras chaves mencionadas.

Os filtros adotados para a revisão sistemática foram idioma (português, inglês e espanhol) e ano de publicação (artigos publicados no período de 2005 a 2017). O período foi adotado, pois se pretendeu estabelecer o estado da arte antes

da promulgação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, em 2010. Com isso, foram analisados os trabalhos de 13 anos.

Após verificação dos resultados, filtraram-se também apenas aqueles que estavam disponíveis em texto completo. Os artigos foram gerenciados por meio do *software* StArt (*State of the Art through Systematic Review*), versão 3.0.3 BETA, desenvolvido na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* do Departamento de Computação (LaPES/DC).

Foram obtidos 634 artigos, sendo 73 (11% do total) duplicados. Do restante, após a leitura do título, do resumo e das palavras-chave, 501 (79%) foram rejeitados, restando 60 artigos que necessitaram de uma leitura mais completa para verificar se realmente não tratavam de *System Dynamics* ou de gestão de resíduos sólidos, já que apenas com a leitura do título ou do resumo não era possível inferir. Dos 60 artigos, apenas 22 foram aceitos e, portanto, um total de 539 artigos rejeitados.

Os motivos de rejeição dos documentos, tanto na primeira quanto na segunda fase, foram os seguintes:

- a) Não era artigo ou capítulo de livro: documentos tais como abstracts ou resumo estendido de conferência, sem muitas informações para analisar o conteúdo;
- b) Não tratava de resíduos sólidos;
- c) Não tratava de *System Dynamics* em sua essência: trabalhos que utilizavam outras abordagens, inclusive de geração de cenários;
- d) Tratava de outros tipos de resíduos, sendo os seguintes:
 - I. Demolição e construção;
 - II. Líquidos, tais como óleo, combustíveis, ou efluentes (tratamento de esgoto);
 - III. Industriais, tais como indústria química, por exemplo;
 - IV. Hospitalares e similares ou de cuidados de saúde “*healthcare*”;
 - V. Elétricos e eletrônicos (WEEE), tais como bateria, computadores e outros;
 - VI. Agricultura, tais como embalagens de fertilizantes ou aqueles oriundos da atividade;
- e) Apresentavam como tema principal a gestão ambiental ou sustentabilidade: a gestão de resíduos é um pilar, mas que não era tratado com afinco, inclusive tratando de logística reversa e ciclo de vida;

- f) Tratavam da geração de energia a partir de resíduos sólidos, mas cujo foco era na geração e não no tratamento do resíduo em si.
- g) Estavam escritos em idioma diferente do inglês, português ou espanhol. Foram encontrados artigos em chinês e em árabe.

Os 22 artigos foram analisados e extraiu-se o ano de publicação, a revista ou periódico em que foi publicado e a cidade ou região na qual se desenvolveu e aplicou um modelo de *System Dynamics*, de modo a auxiliar na tomada de decisão daquele espaço. Um dos trabalhos analisados era capítulo de livro e foi escrito por um dos autores de um dos artigos que também foi selecionado nesta revisão sistemática. Pelo seu conteúdo mais amplo, e por ter acrescentado outras informações, devido ao espaço de tempo que houve entre as duas publicações, manteve-se o capítulo. Um dos artigos não foi publicado em periódico científico, mas em uma conferência internacional e, considerando a quantidade de trabalhos disponíveis sobre o tema, este também foi mantido.

O Quadro 1 apresenta as regiões adotadas pelos autores que desenvolveram modelos de *System Dynamics*. Também apresenta a dimensão da região no que se refere à cidade, metrópole, estado ou país.

Quadro 1 - Regiões abordadas nos trabalhos

Região	País	Dimensão
Acaia	Grécia Ocidental	Unidade regional
Baltimore/Maryland	EUA	Cidade
Bandung	Indonésia	Cidade
Bangkok	Tailândia	Cidade (capital)
Cingapura	-	País
Dar es Salaam	Tanzânia	Cidade
Delhi	Índia	Cidade
Dhaka	Bangladesh	Cidade (capital)
Flandres	Bélgica	Unidade regional
Kampala	Uganda	Capital
Kinshasa	Congo	Capital
Kisumu	Quênia	Cidade
Malásia	-	País
Medellín	Colômbia	Cidade
Município do Rio Grande do Sul	Brasil	Cidade (não citada pelo autor)
Nablus	Cisjordânia	Cidade
Newark/Nova Jérsei	EUA	Cidade
Ohio	EUA	Estado
San Antonio/Texas	EUA	Cidade
Suíça	-	País

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da análise sistemática

A Tabela 3 apresenta os periódicos que publicaram sobre a modelagem por *System Dynamics* na Gestão de Resíduos Sólidos.

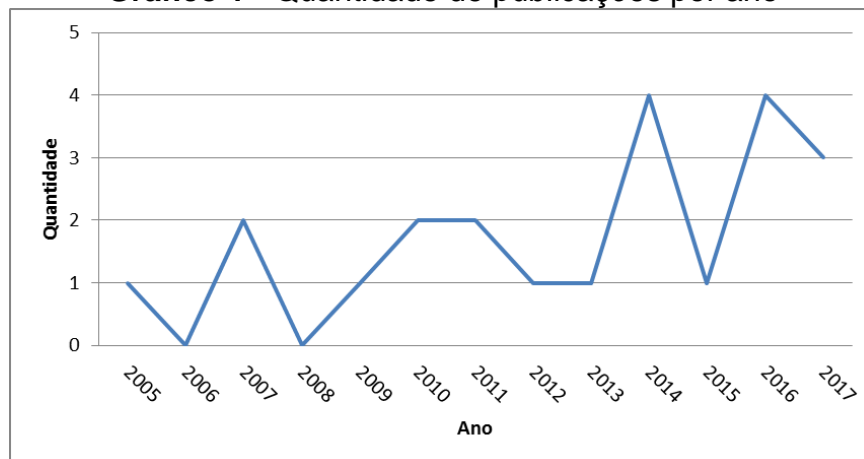
Tabela 3 - Quantidade de publicações por periódico

Periódico, Conferência ou Livro	Publicações	Fator de Impacto (2016)
<i>AIP Conference Proceedings</i> (Conferência)	1	-
<i>Ecological Economics</i>	1	2,965
<i>Energy, Environment and Sustainable Development</i> (Livro)	1	-
GEINTEC - Gestão, Inovação e Tecnologias	1	-
<i>International Journal of Environment and Sustainable Development</i>	1	-
<i>International Journal of Environment and Waste Management</i>	2	-
<i>International Journal of Environmental Research</i>	1	3,835
<i>Journal of Environment & Development</i>	1	0,939
<i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i>	1	1,604
<i>Journal of Solid Waste Technology and Management</i>	1	-
<i>Journal of the Operational Research Society</i>	1	1,077
<i>Local Environment</i>	1	-
<i>Production</i>	1	-
<i>Sustainability</i>	1	1,789
<i>Waste Management</i>	5	4,030
<i>Waste Management & Research</i>	1	1,803
<i>WIT Transactions on Ecology and The Environment</i>	1	-

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da análise sistemática

A partir da Tabela 3 percebe-se que o periódico que mais publicou trabalhos referentes a gestão de resíduos sólidos utilizando a abordagem de *System Dynamics* foi a revista *Waste Management*, que possui um fator de impacto de 4,030 considerando os trabalhos publicados pela revista nos dois anos anteriores a 2016.

O Gráfico 1 apresenta a quantidade de trabalhos publicados ao longo dos 13 anos considerados na revisão de literatura.

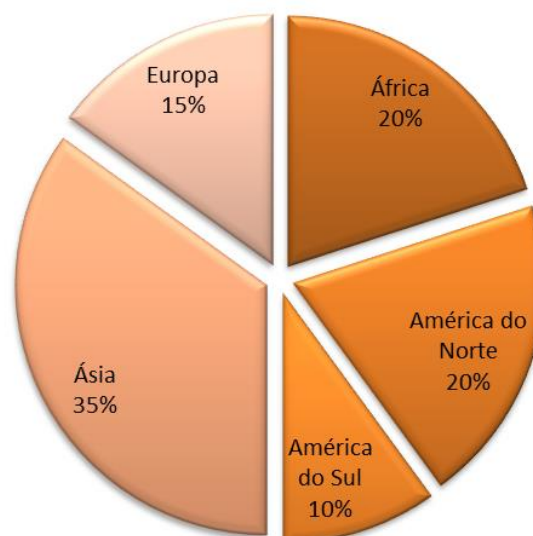
Gráfico 1 - Quantidade de publicações por ano

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da análise sistemática

Percebe-se que nos anos de 2014 e 2016 foram publicados 4 (quatro) trabalhos referentes a gestão de resíduos sólidos utilizando a abordagem de *System Dynamics*. Além disso, no ano de 2014, dos quatro trabalhos publicados, três são do mesmo autor (SIMONETTO et al., 2014, SIMONETTO, 2014, SIMONETTO; LÖBLER, 2014), único autor brasileiro a tratar do tema em consonância com esta dissertação.

Já em 2006 e 2008 não houve publicação de trabalhos acerca de gestão de resíduos sólidos utilizando a abordagem de SD.

O Gráfico 2 apresenta os trabalhos aceitos na RBS com base no continente onde foram desenvolvidos os modelos de *System Dynamics*.

Gráfico 2 - Trabalhos desenvolvidos por continente

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos artigos que desenvolveram e simularam o modelo, observou-se também qual foi o *software* utilizado para tal. Dos trabalhos selecionados, 21 apresentaram o modelo de *System Dynamics* e o *software* mais utilizado para realização da modelagem foi o Vensim, utilizado em 10 trabalhos, seguido pelo STELLA® utilizado em 6 trabalhos. Dois trabalhos não definiram o *software* utilizado e pela visualização do modelo não é possível determinar se foi utilizado o ithink ou o Stella®. Outros *softwares* utilizados foram o Simile e o T21 (Threshold 21) adaptado para a região em questão (Ohio).

Na Tabela 4 são apresentadas as palavras-chave que apareceram com mais frequência dentre os 22 artigos, no campo de palavras-chave propriamente dito. Aquelas que apareceram em apenas um dos artigos do conjunto foram omitidas da referida tabela.

Tabela 4 - Palavras-chave mais encontradas

<i>Keyword</i>	Percentual	<i>Keyword</i>	Percentual
<i>System Dynamics</i>	36,36%	<i>Household Waste</i>	9,09%
<i>Solid Waste Management</i>	22,73%	<i>Modeling</i>	9,09%
<i>Recycling</i>	13,64%	<i>Municipal Solid Waste</i>	9,09%
<i>Solid Waste</i>	13,64%	<i>Planning</i>	9,09%
<i>Waste Management</i>	13,64%	Simulação Computacional	9,09%
<i>Forecasting</i>	9,09%	<i>System Dynamics Model</i>	9,09%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da análise sistemática

Como já era de se esperar, o termo que mais apareceu no campo de palavra-chave nos trabalhos foi *System Dynamics*, em 36,36% dos trabalhos, ou seja, 8 trabalhos, seguido por “*Solid Waste Management*” em 5 dos 22 trabalhos. A tabela também demonstra que a escolha de omitir os termos “*municipal*” e “*urban*” das palavras-chave para realização da pesquisa foi correta, pois “*municipal*” apareceu em apenas um trabalho.

Por fim, o Quadro 2 apresenta os 22 artigos selecionados depois de aplicados todos os filtros da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), e ordenados pelo ano de publicação.

Quadro 2 - Trabalhos selecionados na RBS

ID	Título do Trabalho	Autor/Ano de publicação
1	<i>Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with System Dynamics modeling</i>	DYSON; CHANG, 2005
2	<i>Financing a competitive recycling initiative in Switzerland</i>	ULLI-BEER et al., 2007
3	<i>Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city</i>	SUFIAN; BALA, 2007
4	<i>A multi-methodological approach to the development of a regional solid waste management system</i>	ADAMIDES et al., 2009
5	<i>A system dynamic modeling approach for evaluating municipal solid waste generation, landfill capacity and related cost management issues</i>	KOLLIKATHARA et al., 2010
6	<i>T21-Ohio, a System Dynamics approach to policy assessment for sustainable development: A waste to profit case study</i>	CIMREN et al., 2010
7	<i>An analysis of household waste management policy using System Dynamics modeling</i>	INGHELIS; DULLAERT, 2011
8	<i>Future projections of urban waste flows and their impacts in African metropolises cities</i>	OYOO et al., 2011
9	<i>Modeling of Solid Waste Management Systems</i>	BALA, 2012
10	<i>System Dynamics models for planning long-term integrated municipal solid waste management in Bandung city</i>	RAHAYU et al., 2013
11	<i>Forecasting of solid waste quantity and composition: a multilinear regression and System Dynamics approach</i>	VIVEKANANDA; NEMA, 2014
12	<i>O uso da dinâmica de sistemas para avaliação de cenários da reciclagem de resíduos sólidos urbanos</i>	SIMONETTO et al., 2014
13	<i>Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste - An approach using systems dynamics</i>	SIMONETTO, 2014
14	<i>Simulação baseada em System Dynamics para avaliação de cenários sobre geração e disposição de resíduos sólidos urbanos</i>	SIMONETTO; LÖBLER, 2014
15	<i>A System Dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas</i>	AL-KHATIB et al., 2015
16	<i>A System Dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand</i>	SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016
17	<i>Stock Flow Diagram Analysis on Solid Waste Management in Malaysia</i>	ZULKIPLI et al., 2016
18	<i>System Dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia</i>	VÉLEZ; MORA, 2016
19	<i>System Dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study</i>	GUO et al., 2016
20	<i>Application of System Dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore</i>	GIANNIS et al., 2017
21	<i>Bridging Weak Links of Solid Waste Management in Informal Settlements</i>	GUTBERLET et al., 2017
22	<i>Sustainable solid waste management in sub-Saharan African cities: application of system thinking and system dynamic as methodological imperatives in Kinshasa, the Democratic Republic of Congo</i>	KUBANZA; SIMATELE, 2017

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da análise sistemática

Artigos como Beigl et al. (2008), Bardi e Lavacchi (2008) e Kolekar et al. (2016), não foram aceitos na revisão sistemática, por se tratarem de artigos de

revisão, ou levantamento histórico sobre o tema de gestão de resíduos. Esses trabalhos não se aprofundavam nos modelos de previsão de geração e/ou tratamento de resíduos, mas foram lidos pelo autor, devido ao fato de ter se notado que eram referenciados em outros trabalhos aceitos.

2.5.1. UTILIZAÇÃO DE *SYSTEM DYNAMICS* PARA GESTÃO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O desenvolvimento de um modelo de *System Dynamics* para prever a geração dos resíduos sólidos de uma região é um importante passo para realizar a gestão desses resíduos. É uma abordagem que permite ao gestor trabalhar com as variáveis e obter cenários a partir das estratégias definidas, e observar a mudança de comportamento do sistema, que pode influenciar positivamente ou frustrar a implantação dessas intervenções (Rahayu et al., 2013; GUO et al., 2016).

A modelagem de SD é possível de ser realizada para tratar de gestão de resíduos sólidos devido ao fato de esse ser considerado um sistema complexo, tendo em vista que as variáveis envolvidas estão inter-relacionadas e seus valores sofrem variação em um período de tempo (INGHELIS, DULLAERT, 2011; AL-KHATIB et al., 2015). Um modelo de SD auxilia a conceituar e analisar racionalmente a estrutura, as interações e o comportamento de sistemas e subsistemas complexos, permitindo a exploração e avaliação dos impactos das variáveis presentes no modelo de maneira mais compreensiva e sofisticada (KOLLIKATHARA et al., 2010; AL-KHATIB et al., 2015).

Além disso, a modelagem de SD oferece ferramentas de suporte que são muito úteis para se compreender e modelar o comportamento do processo considerando todas as variáveis envolvidas, permitindo lidar com as respostas do sistema (*feedback*) com atrasos e interações lineares e não lineares das variáveis em todos os processos e com atores envolvidos de uma gestão de resíduos em um país ou uma região do mundo real (INGHELIS; DULLAERT, 2010; SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2015,). Esse sistema envolve interações sofisticadas e múltiplos *feedbacks* associados à população, efeitos no meio ambiente, padrões de desenvolvimento da economia e tecnologias para o tratamento do lixo (KOLLIKATHARA et al., 2010; GIANNIS et al., 2016).

Para Cimren et al. (2010), *System Dynamics* responde bem a necessidade de uma metodologia para avaliar políticas, pois integra dados empíricos, relacionamento causal, julgamentos subjetivos e modelos matemáticos detalhados. De acordo com Oyoo (2010), um modelo dinâmico é uma alternativa apropriada para explorar projeções futuras de produção de resíduos urbanos e para avaliar cenários plausíveis de gestão de resíduos para um sistema complexo.

Beigl et al. (2008) definem um conjunto de pontos que devem ser observados para se desenvolver um modelo para gestão de resíduos sólidos, de modo a informar ao gestor a quantidade de resíduos e suas características. Para isso, deve-se definir, a princípio, a região que servirá de base para o modelo, os tipos e/ou quais resíduos receberão maior atenção na elaboração do modelo, se for o caso, as variáveis independentes que formarão as hipóteses e a escolha do método e validação do modelo propriamente dito.

GUO et al. (2016) acrescentam que ações de outros atores, como por exemplo a “atitude do vizinho”, bem como benefícios monetários podem influenciar na decisão e no perfil do indivíduo em como lidar com o lixo gerado, além de fatores contextuais, como existência de locais adequados para descarte, políticas regionais etc.

Em conjunto com o crescimento da população, também devem ser considerados fatores tais como desenvolvimento da economia, tamanho das famílias, mudanças de emprego e políticas de reciclagem (DYSON; CHANG, 2005). Ainda de acordo com os autores, um modelo que estime corretamente ou se aproxime da realidade da região considerada pode ser útil para se avançar na prática da gestão de resíduos sólidos.

A previsão da quantidade de resíduos sólidos é menos complexa do que aquela referente à previsão da composição do lixo (VIVEKANANDA; NEMA, 2014). Por conta disso, é comum se utilizar a modelagem com SD em conjunto com outra ferramenta, tais como modelagens estatísticas, para auxiliar nessa previsão.

Também de acordo com os autores, a técnica de modelagem de SD para gestão de resíduos sólidos não é custosa para os cofres públicos e utiliza valores genéricos para as taxas de geração e de outras variáveis do sistema, de modo a proporcionar uma visão geral do problema, considerando o volume gerado pela população, bem como os tipos de resíduos que compõem o lixo.

Conforme apresentam Sufian e Bala (2007), as formas de se validar um modelo de SD são baseadas na comparação dos resultados do modelo com os dados históricos, na verificação do comportamento do modelo próximo ao da realidade e a avaliação da qualidade dos parâmetros adotados. Estes últimos podem ser obtidos a partir de outras ferramentas, tais como métodos estatísticos, para gerar os dados, ou relatórios de órgãos especializados.

No Anexo I são apresentados os artigos selecionados pela RBS e nele estão apresentadas de maneira sucinta algumas informações comuns aos artigos, tais como o objetivo do(s) autor(es) na elaboração do modelo de SD, a quantidade de cenários desenvolvidos e as características desses cenários, informações sobre métodos adicionais utilizados, tais como uma ferramenta estatística para complementar o resultado do modelo, a existência ou não de análise financeira no artigo e a forma como foi realizada, a contribuição para o desenvolvimento desse trabalho e, por fim, os resultados obtidos pelos autores.

A seguir são apresentados os trabalhos selecionados de maneira mais abrangente, de modo a explorar os objetivos e resultados obtidos pelos autores. A apresentação é feita de maneira cronológica, ou seja, dos artigos mais antigos para os mais recentes. Na seção seguinte serão detalhados os artigos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e, portanto, não constam nessa seção.

Com o objetivo de lidar com os problemas que se tem ao se adotar amostras de dados limitados, Dyson e Chang (2005) utilizaram *System Dynamics* para realizar a previsão de geração de resíduos sólidos com precisão razoável na região de San Antonio, Texas (EUA), uma região que apresentava um rápido desenvolvimento proporcionado pelo Acordo de Livre Comércio da América do Norte (*North American Free Trade Agreement - NAFTA*). O modelo dos autores é baseado no crescimento populacional, na renda doméstica, no número de pessoas por residência e na atividade econômica, e separa a região em 4 sub-regiões, onde ocorre a coleta e envio para as áreas de serviço específicas de cada sub região. O modelo considera, inclusive, as mudanças socioeconômicas proporcionadas pelo NAFTA como um elemento significativo para a geração de resíduos sólidos da região. Entretanto, o modelo não prevê políticas para redução de geração de resíduos ou mudanças no seu tratamento, mas tão somente opera na previsão de quantidade gerada ao longo do tempo. Com isso, os autores concluem que os

modelos podem ser utilizados para, a partir deles, construírem-se políticas para lidar com a problemática do aumento da geração de resíduos na região.

O modelo abordado por Ulli-Beer et al. (2007) é baseado no comportamento humano e nas políticas públicas e enfatiza que a ação do homem é um resultado de constante interação entre ele próprio e o contexto em que vive. Assim, o objetivo dos autores é mostrar que ao se propor mudanças no comportamento das pessoas podem ser obtidas melhorias na gestão de resíduos sólidos. Algumas ações consideradas são aquelas as quais se referem a proposição de políticas de descarte, aquelas relacionadas aos fatores econômicos, de serviços e de infraestrutura, acordos internos e comunicação e difusão de propostas. Em outras palavras, os autores consideram que a população é a peça chave para melhorar a separação dos resíduos e promover a sua gestão, evitando o descarte inadequado. Sendo assim, uma forma de promover a separação dos resíduos seria a de promover incentivos para que a população tivesse o desejo de realizar tal separação, sejam incentivos financeiros ou oferecendo meios para sua realização, como postos de coleta. Com isso, a incineração de resíduos tenderia a diminuir e a reciclagem aumentar. Entretanto, observou-se que apenas o desejo de separar os resíduos não era suficiente, era necessário orientar quais resíduos deveriam ser separados. Por fim, os autores concluem que impor taxas pelo descarte de resíduos poderia ser uma forma de incentivar a reciclagem competitiva e financiar atividades de gerenciamento de resíduos sólidos.

O trabalho de Adamides et al. (2008) teve por objetivo apresentar o problema da gestão de resíduos sólidos da região de Achaia, na Grécia e a sua solução de uma maneira holística. Para isso, utilizaram não apenas *System Dynamics*, mas também outros métodos tais como *Soft System Methodology (SSM)* e otimização multiobjetiva em um projeto de pesquisa-ação. Com a união desses diferentes métodos, os autores puderam mapear as necessidades do sistema de modo a obter uma solução factível e sustentável baseada na noção de modernidade ecológica, além de apontar regiões onde poderiam ser instalados pontos para coleta e tratamento de resíduos sólidos.

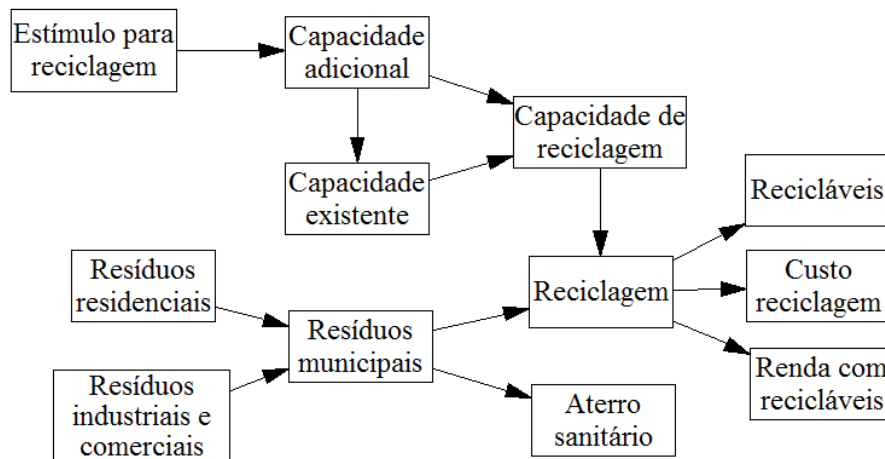
Kollikkathara et al. (2010) desenvolveram um modelo de gestão de resíduos sólidos com base em dados demográficos e socioeconômicos oriundos de um trabalho integrado a um projeto de gestão de resíduos financiado pela União Europeia realizado por J. den Boer, E. den Boer e J. Jager (2007). O modelo

proposto tinha por objetivo auxiliar na avaliação das alternativas de decisão que seriam propostas por gestores municipais da cidade de Nova Jérsei, EUA, num período de 10 anos. As propostas referem-se a ações para tratar do uso de aterro sanitário, bem como avaliar os custos e benefícios envolvidos na exploração de diferentes abordagens de processamento dos resíduos coletados. O sistema considerou resíduos recicláveis, orgânicos e aqueles grupos os quais não é possível a separação. Também foram considerados parâmetros que podem determinar padrões de consumo e, conseqüentemente, de geração de resíduo, tais como densidade populacional, PIB, expectativa de vida e de nascimento, mortalidade infantil e força de trabalho. Os autores perceberam que *System Dynamics* é uma abordagem que permite uma simulação mais compreensiva e sofisticada para avaliar o processo de gestão de resíduos sólidos. O modelo demonstrou que a geração de resíduos sólidos sofreria crescimento nos próximos anos influenciado pelas variáveis socioeconômicas e populacionais.

Cimren et al. (2010) desenvolveram o T21-Ohio, um modelo para auxiliar os gestores e permitir o planejamento da gestão de resíduos sólidos no estado. Tal modelo promoveu percepções acerca dos impactos da implantação de políticas ambientais e de geração de energia nos diversos setores da economia, da sociedade e do meio-ambiente. Também revelou as interações das diferentes estratégias adotadas para se alcançar metas e objetivos. T21-Ohio foi capaz de apresentar resultados no que se referia a impactos sociais, econômicos e ambientais a respeito de atividades cujo objetivo era gerar lucro a partir do lixo. Algumas dessas atividades seriam a reciclagem, a geração de energia elétrica e a produção de biocombustível.

A Figura 5 apresenta a destinação possível para os resíduos da região além de ressaltar o momento que o estímulo dado por meio de políticas e outras ações afeta a capacidade de reciclagem.

Figura 5 - Atividades de reciclagem no setor de uso de resíduos



Fonte: Adaptado de Cimren et al. (2010)

A equação (8) apresenta o cálculo para a nova capacidade de reciclagem da região no instante (t)

$$NCR(t) = ISP(t) \times EIR + EG(t) \times ECR, \quad (8)$$

em que

$NCR(t)$ = Nova capacidade de reciclagem;

$ISP(t)$ = Investimentos do setor privado no instante (t)

EIR = Efeito do investimento na reciclagem;

$EG(t)$ = Estímulo governamental no instante (t)

ECR = Efeito do estímulo em reciclagem

A soma da nova capacidade de reciclagem e da capacidade existente resulta na capacidade total para reciclagem (equação (9)).

$$CR(t) = NCR(t) + CER(t), \quad (9)$$

sendo

$CR(t)$ = Capacidade total de reciclagem;

$NCR(t)$ = Nova capacidade de reciclagem; e

$CER(t)$ = Capacidade existente de reciclagem.

Os autores simularam três cenários para avaliar o impacto da combustão da biomassa, do estímulo governamental para apoiar a reciclagem e a reutilização de materiais derivados do lixo. Primeiramente foi simulado como seria a situação da região se nenhuma atitude fosse tomada, ou seja, sem a proposição de quaisquer alterações e realizar as projeções de 2008 a 2025. Esse seria o cenário de referência. O primeiro cenário teria a implantação da combustão de biomassa. O segundo contaria com o estímulo governamental para a reciclagem. Por fim, o terceiro cenário teriam os efeitos da reutilização de materiais, chamada pelos autores de sinergia, ao invés da extração de matéria prima da natureza.

A conclusão, a partir da simulação dos três cenários, foi que existe um potencial para o desenvolvimento econômico e a possibilidade de criação de empregos, além da redução de emissões e geração de lixo. Entretanto, não é realizada uma comparação de qual cenário seria mais vantajoso para o estado, já que cada cenário atacou em um ponto específico na gestão de resíduos sólidos.

Inghels e Dullaert (2011) utilizaram *System Dynamics* para desenvolver um modelo conceitual baseado em dados históricos e analisar as políticas de gestão de resíduos sólidos. Os autores estabeleceram as relações entre o PIB, a população e o seu comportamento frente à coleta seletiva da cidade belga de Flanders, bem como a reutilização e a reciclagem. A região é considerada uma das melhores no assunto de gestão do lixo.

O modelo construído pelos autores considera desde a extração de matéria prima na natureza, a produção de bens, o consumo, o descarte dos resíduos, a utilização do lixo para geração de energia renovável até a destinação final. Como diferentes destinações para o lixo descartável, os autores consideram a compostagem, reutilização, reciclagem, utilização para geração de energia, incineração ou descarte no aterro. Tal modelo conceitual foi concebido com o objetivo de representar o fluxo do resíduo desde sua extração até sua destinação final.

Oyoo et al. (2011) utilizaram um modelo dinâmico como uma forma alternativa para explorar projeções futuras de produção de resíduos urbanos, seus impactos no meio ambiente e também para avaliar cenários em um sistema complexo. A região adotada foram as cidades africanas Kampala e Dar es Salaam. Os autores consideram como variáveis no processo de gestão de resíduos sólidos a execução de políticas, campanhas de conscientização e tecnologias existentes e

outras que podem surgir no espaço de tempo até 2052, prazo final da simulação. Neste modelo, o fluxo de resíduos sólidos é calculado pela equação (10):

$$UW_{t+1} = (FE, FA, FT)UW_t, \quad (10)$$

em que:

UW_{t+1} é o fluxo do resíduo no instante t ;

FE, FA e FT são as variáveis que representam a execução das políticas (*enhancement*), a conscientização (*awareness*) e as tecnologias (*technologies*); e

UW_t é o estado atual da região, ou seja, o cenário atual. Essas variáveis são modeladas realizando-se a multiplicação dos fatores, cujos valores variam de 1 a 5, sendo 1 a representação da situação atual e 5 representa a eficiência máxima.

As políticas estão relacionadas com a mudança de comportamento no que se refere a lidar com o lixo, ou seja, a realização da separação já a conscientização é no sentido de reduzir atitudes negativas na gestão do lixo doméstico, bem como a educação quanto à reutilização. As tecnologias relacionam-se com os processos de coleta, transporte e tratamento do lixo. A alteração dessas variáveis resulta nos cenários simulados pelos autores.

Um diferencial deste modelo é a separação da população conforme sua classe social. Essa separação, segundo os autores, é importante para identificar a concentração de indivíduos e, portanto, as medidas que devem ser adotadas nessas diferentes regiões ocupadas, de modo a implantar as políticas e as ações de conscientização para o correto descarte de resíduos nas áreas mais concentradas, diminuindo o impacto ambiental devido ao manejo incorreto do lixo.

Foram simulados quatro cenários: o primeiro, sem mudanças em relação à situação atual, resultou em deterioração do ambiente ao final da simulação; no segundo e no terceiro foram implementadas medidas para melhorar as políticas e a coleta, respectivamente. Observou-se que haveria menos danos no meio ambiente, ao reduzir a quantidade de lixo enviado aos aterros, mas a recuperação de recursos também seria baixa. O último cenário combinou melhorias em todos os âmbitos, tais como políticos, sociais e tecnológicos. Os resultados foram satisfatórios, com o mínimo de danos no meio ambiente e recuperação de uma grande quantidade de recursos.

É possível fazer a previsão de geração e composição dos resíduos domiciliares combinando a abordagem de *System Dynamics* com regressão linear múltipla, como realizado por Vivekananda e Nema (2014) ao simularem um modelo de gestão para Nova Deli, capital da Índia.

A regressão linear múltipla foi utilizada para prever a quantidade total de resíduos sólidos gerados na cidade. O modelo geral de uma regressão linear múltipla está representada em (11), sendo y_i a variável dependente, x_i as variáveis independentes, b_i os coeficientes de regressão e E_i é o termo residual.

$$y_i = b_{0i} + b_{1i}x_1 + b_{2i}x_2 + \dots + b_{ni}x_{n1} + E_i \quad (11)$$

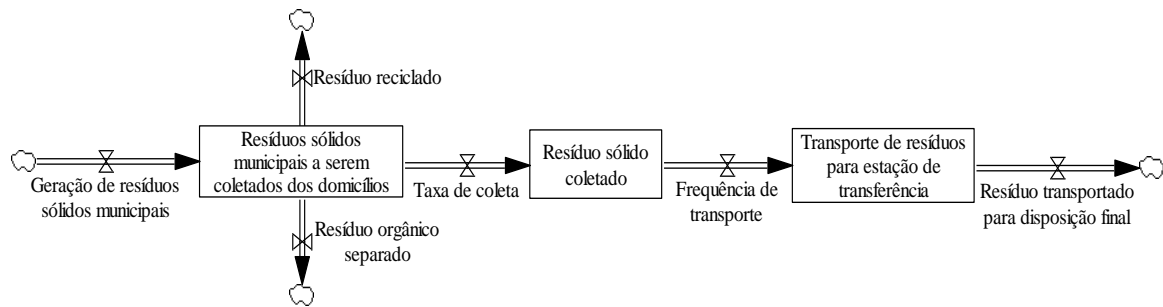
Para obter a quantidade de resíduo gerado, os autores consideraram como variáveis independentes o tamanho da população, o tamanho das famílias, o PIB e a renda anual per capita.

A abordagem de *System Dynamics* foi utilizada pelos autores para fazer a previsão da quantidade de resíduos gerados e para desenvolver um plano integrado de gestão municipal de resíduos sólidos.

Os autores concluem que utilizar regressão linear múltipla integrada à abordagem de SD é efetivo para prever a quantidade e a composição dos resíduos sólidos de Nova Deli. Também concluem que o modelo que relaciona a despesa total relativa e o percentual dos componentes do lixo (modelo 2) é o mais adequado para prever a composição dos resíduos gerados no município. Os modelos também indicam que a geração de resíduos não depende apenas da população, mas também de fatores socioeconômicos tais como PIB, renda per capita anual e tamanho da família.

System Dynamics foi utilizado por Sukholthaman e Sharp (2016) para avaliar o impacto da separação e coleta de resíduos na cidade de Bancoque, capital da Tailândia.

Os autores reproduzem seis cenários para avaliar o mais adequado para o estudo de caso específico. Primeiramente foi construído um modelo que limitava as fronteiras do sistema. Tal modelo está representado na Figura 6. Nele, parte-se da geração do resíduo sólido municipal e se finaliza com a disposição final, apresentando os estoques e fluxos básicos do sistema.

Figura 6 - Limites do sistema

Fonte: Adaptado de Sukholthaman e Sharp (2016) - Reproduzido em Vensim PLE

As simulações foram realizadas considerando um espaço de tempo de 120 meses, sendo $t = 0$ o mês de janeiro de 2013 e $t = 120$ o mês de dezembro de 2023. A cidade possui 14 distritos e cada um foi simulado separadamente de modo a identificar a eficiência no serviço em cada distrito. Para cada um dos seis cenários adotados foi estabelecido um perfil de práticas, sendo os seis cenários apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Cenários para a GMRS de Bancoque

Cenário	Perfil	Taxa de separação (%)
1	Situação atual	8
2	Resíduos recicláveis	População disposta a agir
3		População obrigada a agir
4	Resíduos recicláveis e orgânicos	Situação atual
5		População disposta a agir
6		População obrigada a agir

Fonte: Adaptado de Sukholthaman e Sharp (2016)

Essa previsão inicial de taxa de separação (8%) é considerada com base em fatores tais como incentivo que a população tem em fazer a separação de seus resíduos e informações que são divulgadas sobre a importância em adotar essa prática. Os aumentos nas taxas estão relacionados com a conscientização da população sobre o tema.

Os autores também simularam os custos da operação, considerando quatro grupos de variáveis que refletem o esforço humano, o combustível, os equipamentos e a manutenção dos caminhões utilizados para realizar a coleta de resíduos, dentre outras relacionadas.

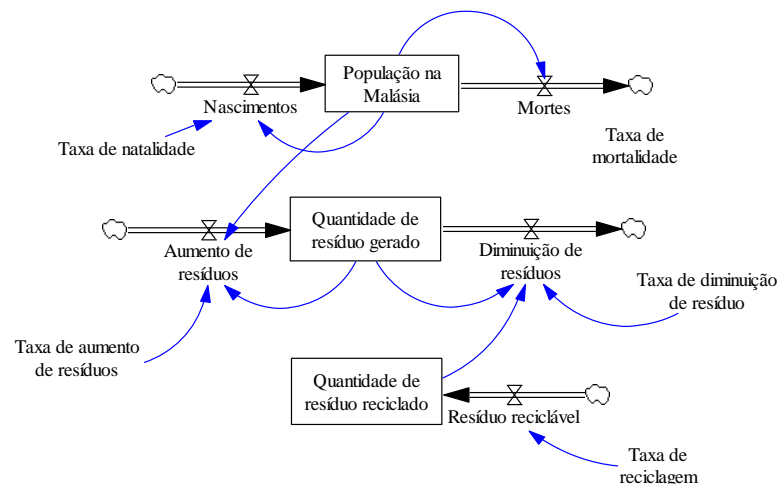
Em termos de eficiência na coleta de resíduos sólidos, o primeiro apresentou o pior resultado e o sexto o melhor, conforme o esperado. Entretanto, ao se levar em conta a possibilidade da implantação, o cenário quinto foi considerado o que apresentava oportunidades mais plausíveis para a Administração Metropolitana de Bancoque. Para isso, é sugerido que sejam adotadas práticas de premiação ou punição, além de campanhas, para estimular a colaboração da população.

Zulkipli et al. (2016) realizam a simulação do sistema de gestão de resíduos sólidos da Malásia com base no estímulo governamental da prática do 3R (redução, reuso e reciclagem) por parte da população. O objetivo dos gestores é que até 2020 o país esteja próximo da noção de “resíduo zero”, ou seja, que o mínimo de resíduo que pode ser reutilizado ou reciclável seja disposto em aterros, enriquecendo, de certa maneira, as atividades de reciclagem.

Além da prática do 3R, é proposto que sejam adotadas outras, tais como incineração e compostagem, para contribuir com a meta de “resíduo zero”.

Apesar da complexidade do tema e do sistema, o modelo apresentado pelos autores é, de certa forma, simples e com poucas variáveis, estabelecendo poucas relações e não considerando diversos fatores ou metas, mas tão somente é utilizado para calcular os resultados que podem ser obtidos ao final da simulação considerando a ideia original, ou seja, a prática do 3R estimulada pelo governo e iniciada pela população em 2015. A Figura 7 representa o modelo de SD que os autores adotaram para simular a gestão de resíduos sólidos da Malásia considerando o espaço de tempo de 2010 a 2020.

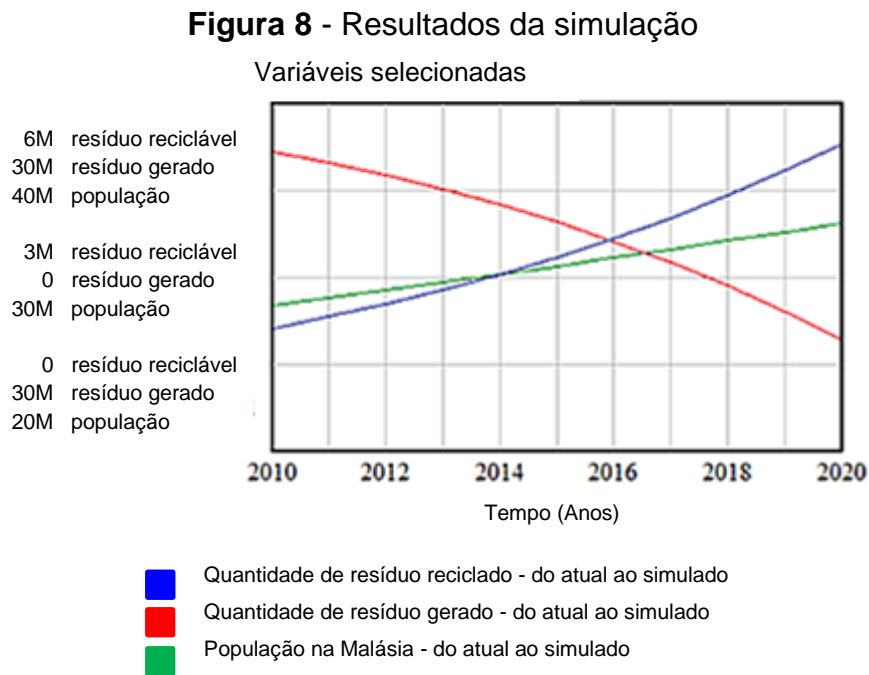
Figura 7 - Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos da Malásia



Fonte: Adaptado de Zulkipli et al. (2016) (reproduzido em Vensim PLE)

Os autores concluem que, mesmo com o crescimento da população, ao se considerar que a geração de resíduos pode diminuir com tais práticas, haverá uma curva descendente na geração de resíduos e uma ascendente na quantidade de resíduos reciclados, conforme apresentado na

Figura 8.



Fonte: Adaptado de Zulkipli et al. (2016)

O modelo de Palacio Vélez e Escalante Mora (2016) trata, em suma, da geração de resíduos sólidos, do sistema de coleta, do fluxo de materiais, da disposição final e dos setores formais e informais da região metropolitana de Medellín, Colômbia. O setor informal diz respeito àquela parcela da população que faz uso do trabalho em aterros e lixões sem estarem associados a cooperativas destinadas para tal fim.

Diferentemente de outros modelos já vistos, este não tem como objetivo a previsão da geração de resíduos sólidos pela população, mas sim a formalização do trabalho informal que é desenvolvido na região, de modo a regulamentar e melhorar as condições de vida dessas pessoas. De acordo com os autores, essa parcela da população é mais vulnerável às variações e não possui poder significativo para negociação do material separado. Destacam também o

esforço dispendido tanto no trabalho de separação, quanto no transporte, que é feito, em sua maioria de forma manual, penosa e degradante.

Dessa forma, a abordagem de *System Dynamics* apresenta resultados tais como número de indivíduos que passam a integrar o setor formal de gestão de resíduos, gerando um decréscimo no número de catadores informais e um aumento da taxa de reciclagem da região, devido ao fato de o trabalho desenvolvido por esses indivíduos integrados somar-se aos resultados municipais. Como resultado, percebe-se que é possível diminuir a população de catadores informais dos atuais 4.474 para em torno de 3.000 ao final do período simulado (vigésimo ano), uma redução de 33% aproximadamente do trabalho informal.

Além do apelo social, percebe-se que também há impacto no setor econômico, devido à geração de empregos e redução de custos na coleta, no transporte e na disposição final, já que um aumento na população formal do setor está relacionado com maior distribuição do trabalho dentre a equipe, sem sobrecarregar o indivíduo.

A simulação realizada por Guo et al. (2016) apresentou os efeitos das intervenções e as interações que eram positivas a partir das intervenções realizadas em uma região de baixa renda de Baltimore (EUA), bem como as limitações que o sistema retornava. Além de SD, os autores também utilizaram lógica *fuzzy* para quantificar variáveis qualitativas, tais como normas sociais e quantidade de informação ou conhecimento da população sobre o tema. Os autores tinham conhecimento que a disposição incorreta dos resíduos domésticos possuía relacionamento com a população de ratos que assolava a região e, portanto, simularam um modelo que considerava, inclusive, a população do animal na região.

A partir da definição das variáveis e do sistema, foi possível estabelecer a relação entre o comportamento da população quanto à disposição de seus resíduos e as normas necessárias para motivar essa população a realizá-lo. O modelo concentrou cinco ênfases: normas sociais, incentivos financeiros, fatores contextuais, conhecimento e limpeza física. Cada ênfase possuía uma série de intervenções que poderiam ser aplicadas, num total de 12 intervenções, conforme apresentadas no Quadro 3. Cada política foi realizada ajustando as intervenções e cada uma gerava um cenário. Considerando o número de intervenções, era sabido que as combinações geraria um grande número de práticas, então os autores

escolheram cinco, reunindo em cada um, um grupo de ações, com base nos constructos (ênfases) definidos, apresentados no Quadro 4.

Quadro 3 - Intervenções propostas pelos autores

	Descrição da Intervenção	Ênfase
1	Fornecer informações para melhorar as normas sociais e desencorajar despejo incorreto	Norma social
2	Fornecer informações para melhorar as normas sociais e desencorajar sujeiras	
3	Fornecer informações para melhorar as normas sociais referentes a reciclagem	
4	Fornecer incentivos financeiros para desencorajar o despejo incorreto	Incentivos financeiros
5	Fornecer incentivos financeiros para desencorajar sujeiras	
6	Fornecer incentivos financeiros para promover reciclagem nas residências	
7	Aumentar o número de lixeiras nas ruas	Fatores contextuais
8	Impor regras para obtenção de cestos de lixo nas residências	
9	Informar a população sobre quais materiais podem ser reciclados	Conhecimento
10	Informar a população sobre o dia de coleta	
11	Aumentar a eficiência da coleta de lixo	Limpeza física
12	Aumentar a eficiência da limpeza de rua	

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016)

Quadro 4 - Pacotes de intervenções

Pacote	Intervenções
1	1, 2, 3, 4, 5, 6
2	1, 2, 3, 7, 8
3	4, 5, 6, 9, 10
4	4, 5, 6, 11
5	1, 2, 3, 9, 10, 11

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016)

Os autores observaram que o cenário que focava no estabelecimento de normas de melhoria social e incentivos financeiros teve o melhor desempenho frente os demais. Outro resultado positivo com a modelagem foi o que apresentava a influência dos fatores adotados em relação ao outro, ou seja, a interação (de reforço e de balanço, inerentes à *System Dynamics*) entre as práticas que poderiam ser adotadas na gestão dos resíduos da região considerada.

Giannis et al. (2017) associam a complexidade da gestão de resíduos sólidos à influência de fatores socioeconômicos tais como população e o rápido crescimento econômico, além da mudança no consumo e padrões de vivência da população. Sendo assim, os autores utilizaram *System Dynamics* para avaliar estratégias alternativas para a gestão de resíduos sólidos em Cingapura, relacionando capacidade de aterro sanitário e eficiência na reciclagem.

Simularam nove cenários para investigar qual seria a abordagem mais sustentável, sem que se inibisse o crescimento populacional. Cada cenário é a combinação de variáveis como padrões socioeconômicos, compostagem e taxas de reciclagem. Vale ressaltar que atualmente essa taxa está em torno de 59%, enquanto a de compostagem beira os 10%, com uma meta, para 2030, de aumentar para 100%.

Para limitar o sistema, separaram-no em quatro subsistemas, a saber: população, fatores econômicos, reciclagem e disposição de resíduos.

Além disso, Cingapura conta com a implantação do programa “3R” (redução, reuso e reciclagem) e algumas metas tais como aumentar a taxa de reciclagem para 70% até 2030, aumentar a vida útil do aterro e, se possível aproximar-se do objetivo de zero resíduos encaminhados ao aterro para reduzir a necessidade de instalar nova planta de incineração de resíduos.

A conclusão dos autores é que aquele cenário com altos padrões econômicos e altas taxas de reciclagem, em conjunto com práticas de compostagem, é o mais indicado para possibilitar um ambiente sustentável e ampliar a vida útil do aterro. Além disso, concluíram que a abordagem de SD demonstrou uma avaliação abrangente da gestão de resíduos em Cingapura, simulando valores possivelmente factíveis para os anos seguintes da região.

A simulação realizada por Gutberlet et al. (2017) reúne pensamento sistêmico e teoria de rede de ação para apresentar a gestão de resíduos da região de Kisumu, no Quênia. Para isso, envolveram na simulação desde atores relacionados a uma perspectiva global, como autoridades governamentais e legisladores, até o pequeno gerador doméstico. Dessa forma, atribuíram responsabilidades e objetivos para diminuir as falhas existentes no sistema e propuseram práticas para melhorar o meio ambiente, tornando-o sustentável. Algumas dessas práticas foram baseadas naquelas praticadas em outras partes do

mundo, inclusive no Brasil, como a implantação de cooperativas de coleta de resíduos recicláveis.

Apesar de utilizar a ideia contida na abordagem de *System Dynamics*, os autores não elaboraram um modelo, mas sim utilizaram o conceito de ciclo causal para simular as práticas que poderiam ser adotadas e suas influências no sistema. Com isso puderam definir se uma determinada prática era de reforço ou de balanço, indicando um possível resultado para o futuro, no caso de uma possível implantação.

Uma abordagem similar à de Gutberlet et al. (2017) também foi apresentada por Kubanza e Simatele (2017), como maneira de entender a complexidade da gestão de resíduos sólidos de uma região. Com isso, puderam definir que existe a necessidade das autoridades locais reverem suas práticas de modo a alinhar as prioridades de desenvolvimento com a redução da pobreza local, já que a gestão eficiente dos resíduos sólidos poderia ser uma forma de geração de renda.

2.6. DETALHAMENTO DE ALGUNS MODELOS DE *SYSTEM DYNAMICS* PARA GESTÃO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Nesta seção serão detalhados os modelos desenvolvidos por Simonetto e Löbler (2014), Al-Khatib et al. (2015), Rahayu et al. (2013) e Sufian e Bala (2007).

O primeiro modelo a ser detalhado foi aquele proposto por Simonetto e Löbler (2014). Os autores identificaram variáveis com base em trabalhos acadêmicos anteriores e de profissionais na área de gestão de resíduos sólidos. Ele foi escolhido porque foi desenvolvido a partir da realidade brasileira, considerando um município do Rio Grande do Sul, região que serviu de base para a elaboração do modelo.

O segundo modelo, de Al-Khatib et al. (2015), foi selecionado por ter considerado a geração dos diferentes tipos de resíduos e por apresentar resultados individuais, para cada resíduo, o que pode ser interessante se os gestores pretenderem focar esforços em determinado resíduo, como o mais rentável ou o mais abundante, ou aquele que tem maior procura e impacto, além de maior retorno em caso de comercialização, ou que ocupe maior volume.

Os modelos de Sufian e Bala (2007) e Rahayu et al. (2013) apresentam uma breve análise financeira que pode auxiliar o autor e os gestores na proposição de ações na tomada de decisão. Como é de interesse deste trabalho abordar a análise financeira, estes modelos também serão expostos de forma mais detalhada.

Para melhorar a visualização dos modelos propostos pelos autores, eles foram reformulados em Vensim PLE, além de possibilitar que o autor desenvolvesse prática com o *software* e pudesse traduzir os elementos componentes dos modelos bem como suas relações.

Para o modelo desenvolvido por Simonetto e Löbler (2014) foram utilizadas as seguintes variáveis de nível, relacionadas ao tempo (t):

- a) *População(t)*
- b) *Geração(RSU)(t)*
- c) *Compostagem(t)*
- d) *Incineração(t)*
- e) *Reciclagem(t)*
- f) *TratInadequado(t)*
- g) *AterroSanitário(t)*

A contabilização da população do município foi feita utilizando-se a taxa de crescimento natural, ou seja, subtraiu-se o número de mortes do número de nascimentos. Em outras palavras, a variável de nível “População” foi formada pelas variáveis taxa de nascimento e a taxa de mortalidade, bem como as de emigração e imigração no tempo t. Para isso utilizam-se as seguintes equações:

$$\text{População}(t + 1) = \text{AcrescPop}(t) - \text{DecrPop}(t) \quad (12)$$

$$\text{AcrescPop}(t) = (\text{ImigTaxa} \times \text{Populaçao}(t)) + (\text{NascTaxa} \times \text{População}(t)) \quad (13)$$

$$\text{DecrPop}(t) = (\text{EmigTaxa} \times \text{Populaçao}(t)) + (\text{MortTaxa} \times \text{População}(t)), \quad (14)$$

em que *AcrescPop(t)* indica o aumento da população no período t, *ImigTaxa* é a taxa de imigração, *NascTaxa* é a taxa de nascimento, *DecrPop(t)* indica a diminuição da população no período t, *EmigTaxa* é a taxa de emigração e *MortTaxa* é a taxa de mortes.

A população utilizada para iniciar a simulação foi de aproximadamente 270 mil habitantes, e o horizonte de tempo foi de 30 anos. Entretanto, os autores explicam que utilizaram o crescimento populacional médio dos municípios do Rio Grande do Sul que, de acordo com o IBGE (2010) foi de 0,7%.

O total de resíduos gerados pela população é o resultado da multiplicação da população no período (t) pela quantidade média de resíduos gerados por pessoa (RSU), descrito na equação (15):

$$GeraçãoRSU(t) = População(t) \times RSUPerCapita \quad (15)$$

O valor utilizado na simulação para RSUPerCapita foi de 1,213kg/pessoa. Em 2016, na região Sul do Brasil, a quantidade gerada foi de 0,713kg/pessoa (ABRELPE, 2017).

A destinação final do resíduo (aterro sanitário, reciclagem, compostagem, incineração e tratamento inadequado, caso ocorra) possui uma taxa própria de absorção para cada tipo, sendo que a quantidade de resíduo que recebe tratamento inadequado é dependente do valor das demais taxas, pois apenas ocorrerá se os resíduos não forem encaminhados corretamente para o destino a que pertencem ou se forem encaminhados para aterros controlados ou lixões, o que não é permitido pela legislação. As equações que tratam da destinação final são as seguintes:

$$Compostagem(t) = EnvioCompost(t) = GeraçãoRSU(t) \times CompostTaxa \quad (16)$$

$$Incineração(t) = EnvioIncin(t) = GeraçãoRSU(t) \times IncinTaxa \quad (17)$$

$$AterroSanitario(t) = EnvioAterro(t) = GeraçãoRSU(t) \times AterroTaxa \quad (18)$$

$$Reciclagem(t) = EnvioRecicl(t) = GeraçãoRSU(t) \times RecicTaxa \quad (19)$$

$$TratInadequado(t) = EnvioInadequado(t) = GeraçãoRSU(t) \times InadeqTaxa, \quad (20)$$

onde:

GeraçãoRSU(t) é a quantidade de resíduos gerados no instante t

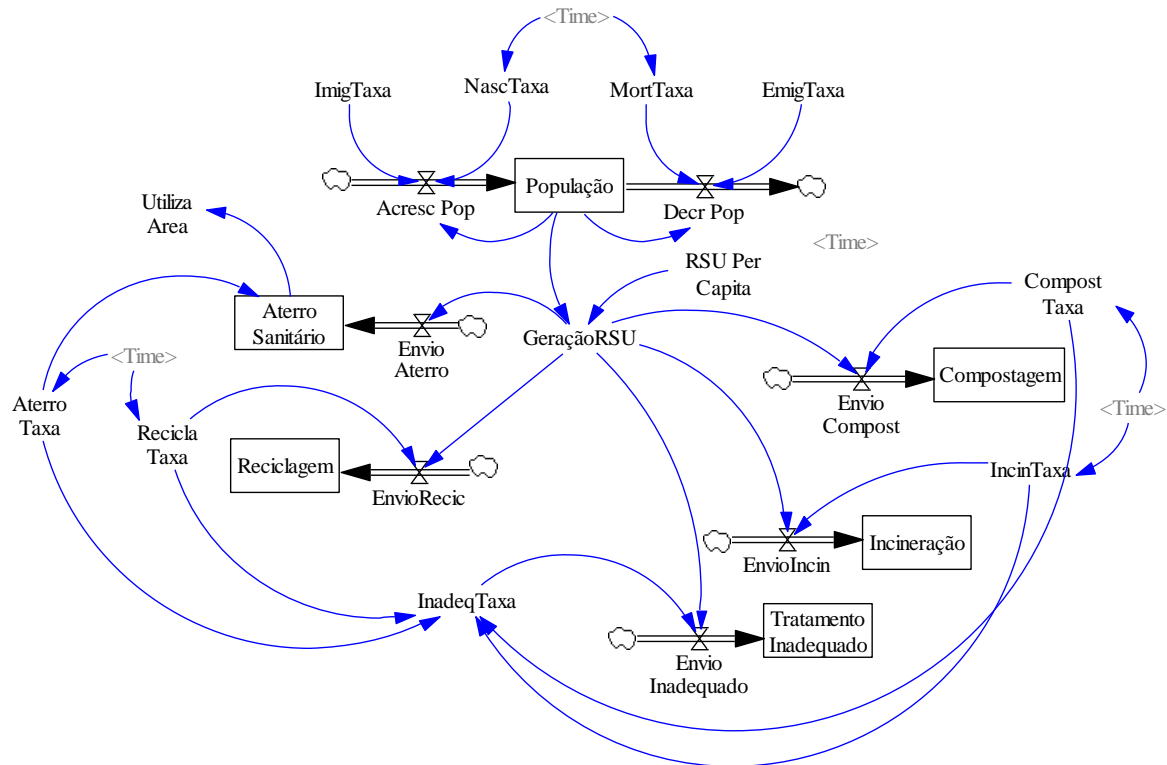
CompostTaxa, IncinTaxa, AterroTaxa, RecicTaxa e InadeqTaxa são as variáveis referentes à quantidade de resíduos que são enviados para compostagem, incineração, aterro sanitário, reciclagem e tratamento inadequado, respectivamente.

A variável que trata do resíduo enviado para tratamento inadequado, por sua vez, é calculada pela equação (21):

$$InadeqTaxa = 1 - (CompostTaxa + IncinTaxa + RecicTaxa + AterroTaxa) \quad (21)$$

A Figura 9 apresenta o modelo desenvolvido por Simonetto e Löbler para representar a geração e disposição de resíduos sólidos de um município do Rio Grande do Sul.

Figura 9 - Modelo de Simulação para análise de geração e disposição de RSU



Fonte: Adaptado de Simonetto e Löbler (2014)

Qualitativamente, como se pode observar no modelo, todas as taxas de envio aos diferentes destinos são influenciadas diretamente pela geração de resíduos (“GeraçãoRSU”), que é uma variável auxiliar derivada da variável de nível “População”. Além disso, essas taxas de envio, exibidas nas “válvulas” do modelo, dependem de variáveis auxiliares que representam a porcentagem média de cada tipo de resíduo que é encaminhado ao seu destino específico (por exemplo, “IncinTaxa” é a porcentagem média encaminhada para incineração). Essas variáveis auxiliares são parâmetros variantes no tempo, conforme se apresenta a seguir.

Os percentuais utilizados pelos autores para simular o cenário atual, ou seja, aquele sem proposição de novas políticas de gestão de resíduos sólidos, foram aqueles apresentados pelo IBGE em 2010:

- aterro sanitário: aproximadamente 53%, com variação de 1% ao ano;
- reciclagem: 4,3% com variação anual positiva de 3%;

- c) compostagem: menos de 1% e sem variação na simulação;
- d) incineração: 0%, pois que no país não é utilizado esse tipo de destinação;
- e) tratamento inadequado: 42,4% do total de resíduos, com redução de aproximadamente 1%.

A área ocupada pelo resíduo encaminhado para o aterro é calculada pela equação (22), e é a razão entre a quantidade de resíduo encaminhado para o aterro e a quantidade de resíduo sólido que ocupa 1m³. Os autores assumem que em 1m³ são depositados 700kg de RSU compactados.

$$UtilizaÁrea(t) = AterroSanitario(t)/RSUm^3 \quad (22)$$

Apesar da variável auxiliar “UtilizaÁrea” remeter à área, o que resulta no seu cálculo é o volume ocupado pela quantidade de resíduo enviada ao aterro.

Foram simulados os cenários considerando as variações anuais, conforme dados do IBGE de 2010, e cenários sem variação, desconsiderando esses dados, mantendo-se constantes as taxas. Para fins de análise e comparação dos cenários tomou-se como referência para a simulação taxas praticadas na Holanda, considerada uma região de referência em relação à gestão de resíduos sólidos. Tais valores seriam alcançados a partir do 15º ano de simulação. As taxas utilizadas, portanto, foram as seguintes:

- a) crescimento populacional: manteve-se 0,7% de crescimento ao ano;
- b) geração de resíduos: avançou até alcançar a taxa de geração na Holanda no valor de 1,466kg/pessoa, resultado obtido no 15º ano de simulação. A partir desse ano a taxa de crescimento foi constante;
- c) aterro sanitário: novamente utilizou a taxa da Holanda que é de 1% ao ano. O decréscimo foi constante e a taxa foi alcançada no 15º ano;
- d) reciclagem: iniciou a simulação com 4% e evoluiu até 32%, taxa média de reciclagem na Holanda, obtida no 15º ano e mantido constante até o final da simulação;
- e) compostagem: iniciou a simulação com 1% e evoluiu até 28%, taxa média de compostagem na Holanda, obtido no 15º ano e mantido constante até o final da simulação;

- f) incineração: iniciou a simulação com 0, já que no Brasil não se utiliza essa destinação e evoluiu até 39%, taxa média de incineração na Holanda, obtido no 15º ano e mantido constante até o final da simulação;
- g) tratamento inadequado: na Holanda não existe esse tipo de disposição, então o modelo, a partir do 15º ano desprezou essa destinação, pois as demais destinações supriam a quantidade de RSU gerada.

Com os três cenários simulados e após análise dos gráficos apresentados, chegou-se, obviamente, à conclusão de que, aquele com perspectivas futuras similares às da Holanda são mais benéficas para a administração pública no que tange gestão de resíduos sólidos, pois mesmo com a crescente evolução na geração de resíduos, frente ao crescimento da população, perceber-se-ia aumento na quantidade de resíduos reciclados e enviados para compostagem, o que diminuiria a quantidade de resíduo enviado para o aterro e, portanto, prolongando a vida útil desse local.

Entretanto, os autores não fazem menção a respeito dos resíduos gerados na incineração, como as cinzas, que deveriam ter uma disposição final adequada, como o aterro sanitário.

O modelo de Simonetto e Löbler (2014) apenas apresenta a disposição final dos resíduos, encaminhando-os para uma destinação específica, seja envio direto ao aterro, reciclagem, compostagem, incineração ou tratamento inadequado. O ponto que chama a atenção é que os resíduos que vão para reciclagem são agrupados no mesmo conjunto, não se considerando especificidades de cada elemento que compõe os materiais recicláveis, tais como papel, papelão, plástico, vidro, metal, materiais inertes etc, bem como seu volume específico, como é tratado no modelo de Al-Khatib et al. (2015).

O modelo desses autores considera a taxa de geração de cada tipo de resíduo e faz a separação da quantidade gerada, retornando uma variável de nível para cada tipo de resíduo. As equações propostas são as seguintes:

$$(Quantidade\ de)\ Papel\ \tilde{a}\ o(t) = (Quantidade\ de)\ Papel\ \tilde{a}\ o(t - dt) + M\ e\ d\ i\ a\ de\ g\ e\ r\ a\ c\ \tilde{a}\ o\ de\ papel\ \tilde{a}\ o \times dt, \quad (23)$$

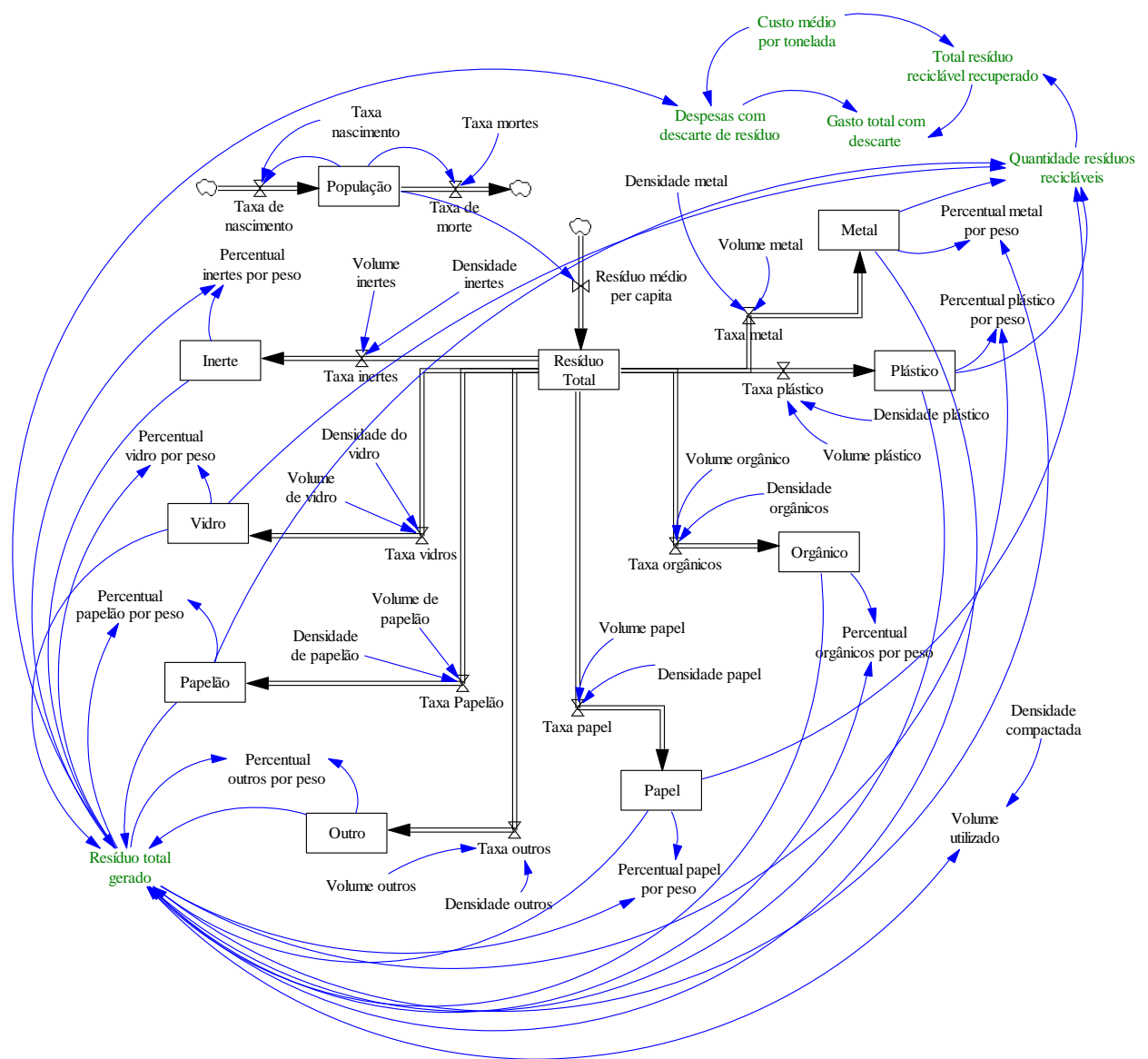
sendo que

$$M\ e\ d\ i\ a\ de\ g\ e\ r\ a\ c\ \tilde{a}\ o\ de\ papel\ \tilde{a}\ o = D\ e\ n\ s\ i\ d\ a\ d\ e\ o\ papel\ \tilde{a}\ o \times V\ o\ l\ u\ m\ e\ d\ e\ papel\ \tilde{a}\ o. \quad (24)$$

As demais variáveis de nível (vidro, papel, metal, orgânico, materiais inertes e “outros”) seguem a mesma formulação, ou seja, a quantidade gerada é o resultado da quantidade gerada no instante anterior ($t - dt$) somada ao produto da média de geração do resíduo em um intervalo t pela variação do tempo dt .

A Figura 10 apresenta o modelo de gestão de resíduos sólidos desenvolvido pelos autores supracitados. Pelo modelo é possível verificar as ramificações com os diferentes tipos de resíduos que compõem o montante gerado.

Figura 10 - Modelo de Gestão de resíduos sólidos desenvolvido



Fonte: Adaptado de Al-Khatib et al. (2015).

De acordo com o modelo dos autores, representado na Figura 10, o aumento da população implicaria num aumento da quantidade de resíduo total e isso teria consequência positiva na proporção de cada classe de resíduo desse montante, ou seja, haveria aumento de resíduos inertes, vidro, papelão, papel, orgânico, plástico, metal e aqueles denominados “outros”. Esse aumento também provocaria um aumento nas despesas com descarte de resíduo, aumentando os gastos do município com essa pasta.

Mais especificamente, no que se refere aos gastos envolvidos no processo (destacados em verde no diagrama), o “gasto total com descarte de resíduos” é influenciado pelas variáveis auxiliares “Resíduo total gerado” e “Total resíduo reciclável recuperado”. A primeira é a soma de todos os resíduos gerados no sistema e representa a despesa. Já a segunda é a receita obtida com os resíduos recicláveis. Ambas são normalizadas pelo “Custo médio por tonelada”.

No modelo proposto por esses autores, é calculada a quantidade de cada tipo de resíduo e, por esse motivo, dada a importância da abordagem, pretende-se utilizar a ideia dos autores para desenvolvimento dessa dissertação.

Sufian e Bala (2007) construíram um modelo para prever a geração de resíduos sólidos, a capacidade de coleta e a geração de energia elétrica a partir desses resíduos coletados, bem como para avaliar as necessidades de uma gestão de resíduos da cidade de Daca, em Bangladesh.

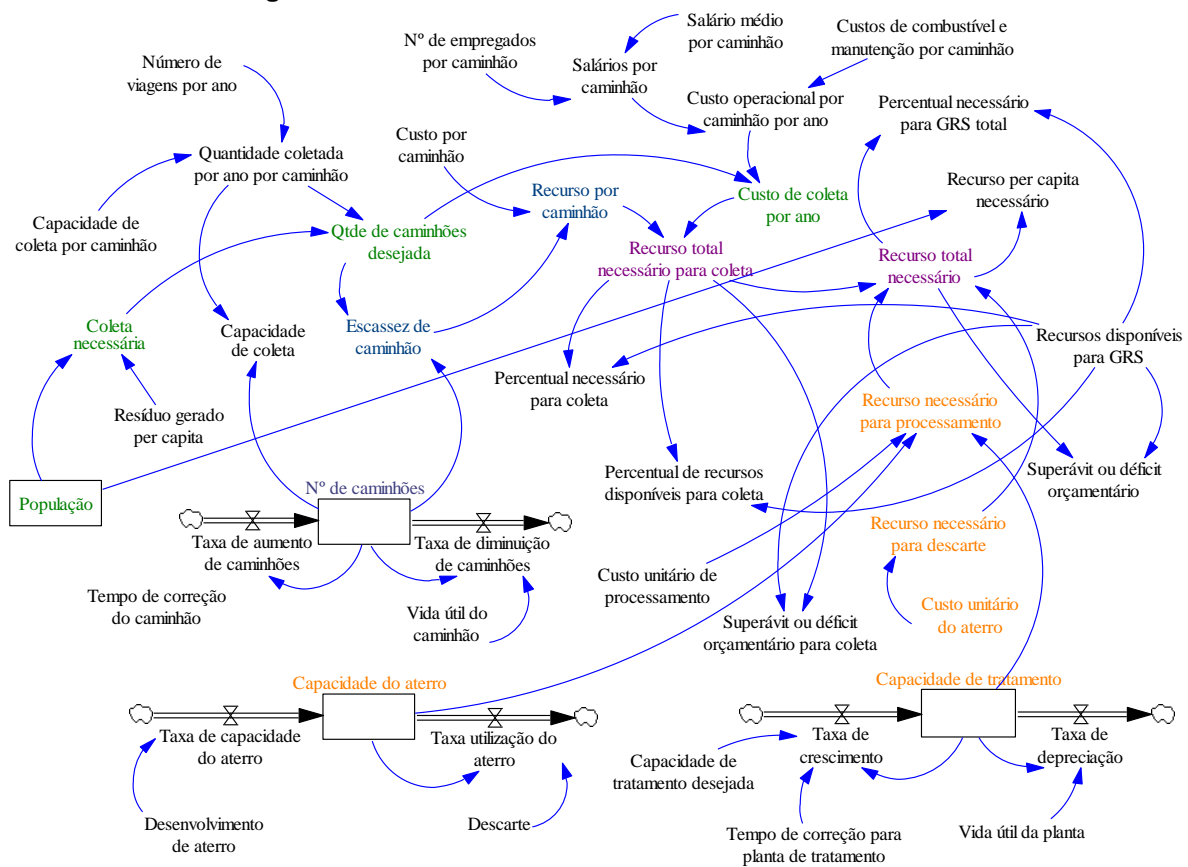
Os autores explicam que o lixo em todo o mundo possui os mesmos componentes, ou seja, papel, papelão, vidro, metal, dentre outros, o que varia de um país ou de uma região para a outra é sua quantidade gerada e sua densidade, dependendo estritamente do nível de desenvolvimento econômico, localização geográfica, clima e condições sociais. Outro ponto levantado é que conforme a renda familiar aumenta, os resíduos de cozinha diminuem. Entretanto, outros tipos tais como papel, metal e vidro aumentam. Em outras palavras, a quantidade gerada aumenta, mas a densidade diminui.

No modelo desenvolvido pelos autores são abordados alguns componentes que influenciam nos gastos com a gestão dos resíduos em Daca, Bangladesh, tais como aqueles relacionados ao transporte dos resíduos coletados, ou seja, os gastos com os caminhões e toda a forma de operacionalização. Alguns desses componentes, que influenciam nos custos da gestão dos resíduos no que se refere a operacionalização, segundo os autores, são os seguintes:

- a) Combustível;
- b) Pessoal;
- c) Manutenção;
- d) Número de viagens realizadas num período de tempo (ano); e
- e) Capacidade dos caminhões que realizam a coleta.

A Figura 11 apresenta o modelo desenvolvido por Sufian e Bala (2007) no que se refere à gestão de resíduos sólidos da cidade de Dacca.

Figura 11- Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos de Dacca.



Fonte: Adaptado de Sufian e Bala (2007) e reproduzido em Vensim PLE

De acordo com o modelo de Sufian e Bala (2007), os resíduos gerados pela população seriam coletado por uma quantidade de caminhões que depende da quantidade de resíduos da região disponível para tal fim. Sendo assim, o aumento da população e, conseqüentemente, da quantidade de resíduos gerados implicaria na necessidade de se aumentar o número de caminhões, cuja influência nos custos é instantânea, daí a importância de se contar com recursos financeiros para atender essa obrigação.

Pode-se dizer que o recurso total necessário do sistema é a soma: 1. dos recursos necessários para descarte (relacionados aos custos de aterro); 2. dos recursos necessários para processamento (que por sua vez dependem da capacidade de processamento e de tratamento necessários aos resíduos - representados em laranja no diagrama); e 3. dos recursos necessários para coleta (referentes aos custos com o número de caminhões necessários para essa etapa do processo - cujas cores no diagrama são azul (caminhões), verde (população e geração de resíduo) e roxo (união dos dois ramos)). Dessa forma, o custo de transporte está diretamente relacionado ao número de habitantes, já que a quantidade gerada e, portanto a ser coletada, é influenciada diretamente pelo crescimento da população.

Por esse motivo, quanto mais ou menos recursos forem necessários para realizar a coleta dos resíduos, o município terá um déficit ou superávit no orçamento.

Cabe ressaltar que em Daca não havia, na época, instalações para geração de energia elétrica a partir do lixo, mas foi algo inovador no modelo dos autores. Tal instalação poderia ser implantada, tendo em vista que a população em 1995 era de 4,375 milhões de habitantes, com uma previsão de 12,082 milhões em 2025, ou seja, quase triplicando a população num espaço de tempo de 30 anos, com a quantidade de resíduo gerada beirando as 4.300 toneladas no ano. Com isso estaria justificada tal implantação, já que essa quantidade de resíduo coletada possibilitaria a geração de boa parte da eletricidade que seria demandada no ano fim da simulação, estimada em 2 milhões de MWh ao ano.

Apesar do detalhamento do modelo, os autores não apresentam alguns dados importantes para possibilitar a reprodução do trabalho, tais como os referentes a salários, combustível, manutenção (realização e periodicidade), capacidade dos caminhões para transporte dos resíduos e número de funcionários necessários para a realização do trabalho.

No que se refere ao aterro sanitário, os autores consideram este um recurso limitado e finito, como realmente o é, e, com isso, simulam a vida útil, ou seja, em que momento a instalação atinge seu limite.

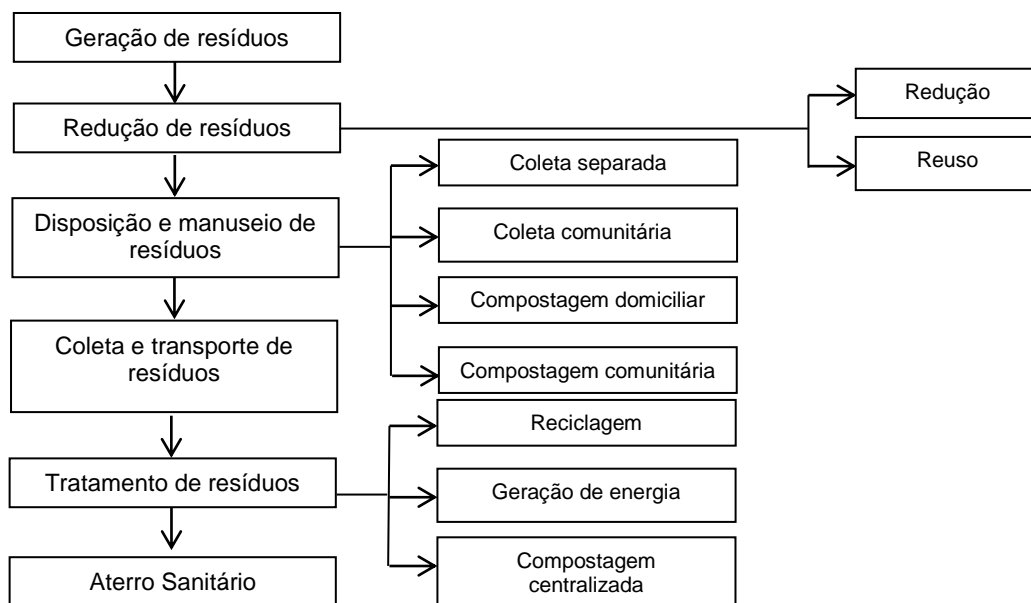
Após as simulações os autores concluíram que apenas aumentar o orçamento para a realização de coleta de lixo não proporcionaria qualidade ao

serviço. O investimento deveria ser realizado conjuntamente na coleta e no tratamento desses resíduos.

Rahayu et al. (2013) desenvolveram um modelo para auxiliar os tomadores de decisão da cidade de Bandung (Indonésia) na criação de um Plano Integrado de Gestão Municipal de Resíduos Sólidos (PIMGRS). Integraram *System Dynamics* e uma análise retrospectiva (*back casting*) para a geração do modelo e proposição de políticas de gestão no período de 2010 a 2035, descrevendo o modelo futuro desejável e as ações necessárias para alcançá-lo por meio da previsão de valores das variáveis independentes no período simulado.

A Figura 12 representa o modelo do PIMGRS de Bandung elaborado pelos autores.

Figura 12 - Modelo proposto para o PIMGRS de Bandung



Fonte: Adaptado de Rahayu et al. (2013)

Como se pode perceber, o modelo dos autores está em consonância com o estipulado pela legislação brasileira, ao traçar as opções para destinação do resíduo antes de chegar ao aterro.

Foram simulados três cenários para a gestão de resíduos sólidos: o primeiro refere-se à situação atual, sem modificações nem adoção de práticas de gestão. O segundo estima que até o final do período de simulação (2035), nenhum resíduo sólido seria enviado para o aterro. Por fim, o terceiro cenário simula que

haverá uma redução de 80% dos resíduos que serão enviados ao aterro, ou seja, apenas 20% dos resíduos gerados teriam tal destinação.

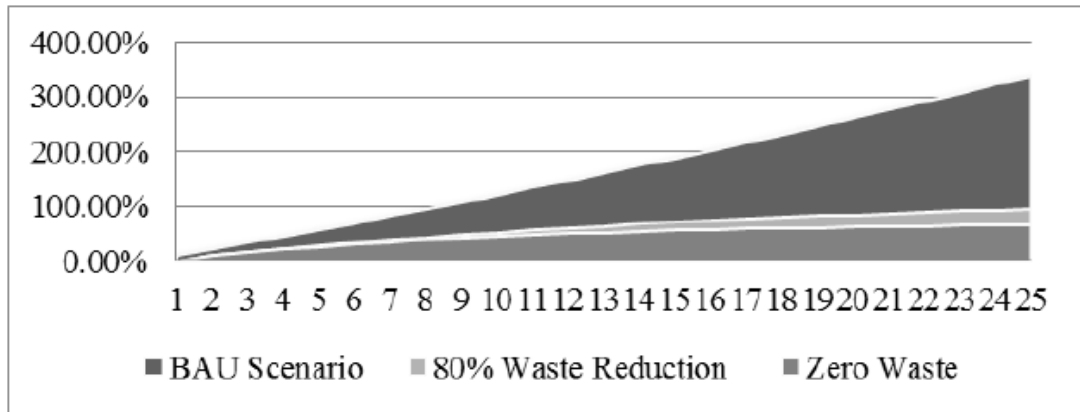
Considerando o ano de 2035, estima-se que, sem mudanças na atual gestão de resíduos, mais de 800 mil toneladas de resíduos seriam enviadas para o aterro, enquanto no segundo cenário apenas 7% dessa quantidade seria destinada ao aterro. Já no terceiro cenário, é estimado que 17,8% dos resíduos teriam tal destinação. Em outras palavras, entende-se que seja impossível implantar uma política de “destinação zero” ao aterro, mas que com a adoção de políticas de gestão do resíduo é possível alcançar taxas consideráveis de sucesso.

Também foi simulada a geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos coletados. Nos cenários 2 e 3 estima-se a geração de mais de 50 mil e de 45 mil MWh por ano, respectivamente.

Com todos os dados e sabendo-se a capacidade do aterro da cidade, estima-se que, no cenário 1, já em 2019 o aterro terá atingido sua capacidade máxima, enquanto nos cenários 2 e 3 estima-se que o aterro ultrapassará o prazo final de simulação ainda apto a receber resíduos (nível atingido igual a 66,28% e 95,18% respectivamente).

No que tange o aspecto econômico, também tratado no trabalho, com a implementação das práticas dos cenários 2 e 3, é estimado que a cidade terá um acréscimo em suas despesas, no que se refere ao tratamento de resíduos sólidos, mas também é esperado um retorno desse investimento, ainda que inferior ao despendido para realizar o tratamento necessário. Entretanto, tais resultados são apresentados apenas por meio de gráficos, não sendo possível a reprodução. Além disso, não foi tratada, para o ano de 2019, a necessidade da construção de um novo aterro, já que, como dito anteriormente, nessa data o atual aterro terá atingido seu limite máximo. Acredita-se que tal valor e tema não foram tratados por falta de dados para estimar o custo dessa construção.

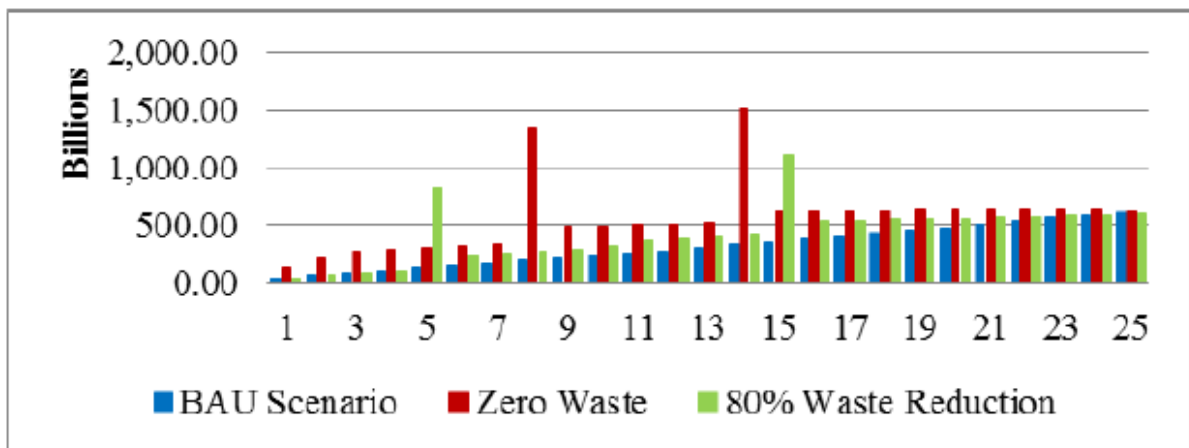
A Figura 13 apresenta o modelo simulado pelos autores para tratar do subsistema referente à destinação de resíduos para o aterro sanitário.

Figura 14 - Projeção de utilização de aterro

Fonte: Rahayu et al. (2013)

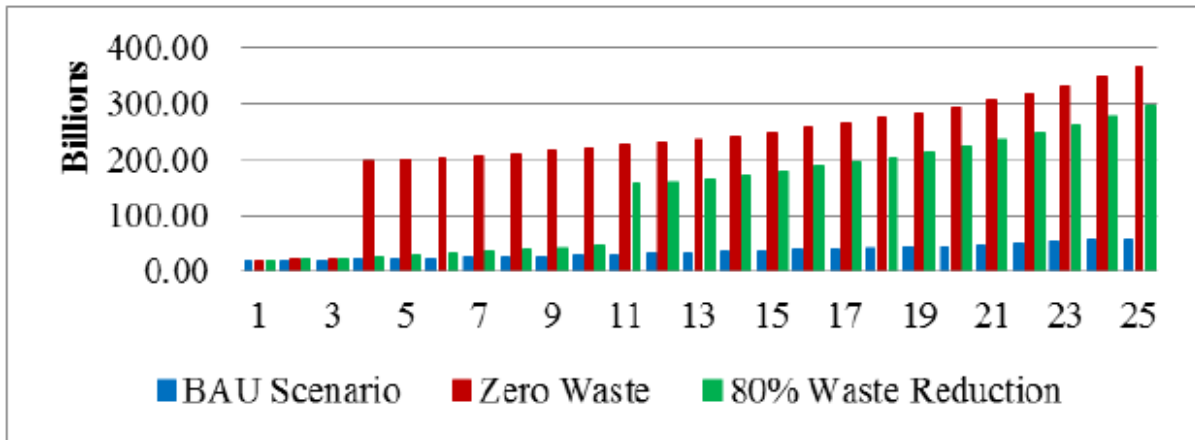
Como é possível de se ver na figura, no 8º ano a cidade atinge o limite do primeiro aterro, aproximadamente no 16º atinge o limite do segundo e no 22º ano o do 3º aterro.

Além disso, Rahayu et al. (2013) apresentam os resultados simulados no que se refere aos custos e receitas da gestão de resíduos. As Figuras 15 e 16 apresentam os resultados dos autores.

Figura 15 - Custos simulados para a gestão de resíduos de Bandung

Fonte: Rahayu et al. (2013)

Figura 16 - Receitas provenientes do tratamento dos resíduos de Bandung



Fonte: Rahayu et al. (2013)

Entretanto, os autores não explicam os motivos que nos anos 5, 8, 14 e 15 da simulação ocorre um “pico” de investimento nos cenários de Zero Resíduo e o de Redução de 80% de resíduos. Além disso, como visto na Figura 14, será necessária a construção de outras instalações para envio dos resíduos nos anos 8, 16 e 22 do cenário atual, o que também não está apresentado no gráfico de custos do referido cenário, tampouco explicitado no decorrer do trabalho dos autores.

3. METODOLOGIA

O método que se utiliza nesta pesquisa é o de modelagem e simulação devido ao fato de que a utilização de um modelo de gestão de resíduos sólidos do município é uma abstração da realidade, útil para os propósitos deste trabalho.

Banks et al. (2009) definem que simulação é a imitação das operações de um processo ou sistema do mundo real e que envolve a geração da história de um sistema, bem como a observação e elaboração de inferências a respeito do sistema real. Para isso deve-se elaborar um modelo a partir de um conjunto de hipóteses expressas matematicamente, logicamente ou simbolicamente, as quais serão relacionadas com as entradas ou objetos do sistema. Esse modelo pode ser usado para se investigar um conjunto de questões do tipo “o que acontece se” a respeito do mundo real. Alterações podem ser realizadas nas suas variáveis com a finalidade de prever o impacto no desempenho do sistema como um todo. Além disso, com o uso da simulação, pode-se analisar o sistema em determinado momento e não apenas no final do tempo transcorrido, ou seja, se o modelo for construído para fazer previsões para um intervalo de 10 anos e o pesquisador quiser saber a situação do sistema na metade do tempo, isso é possível.

As variáveis para construção do modelo foram obtidas principalmente a partir da pesquisa na literatura disponível sobre o tema, da entrevista com as gestoras da Cooperativa e do DAAE. Os valores utilizados nas variáveis puderam ser obtidos por meio de documentos recebidos pelos gestores, além de consulta a *websites*. Segundo Martins (2012), em uma abordagem quantitativa “o pesquisador não interfere ou pouco interfere nas variáveis de pesquisa”. Sendo assim, uma vez definidas, elas não devem ser alteradas, suprimidas, nem outras deverão ser incluídas, a menos que, por falha do pesquisador, alguma tenha sido omitida.

Um exemplo de variável utilizada é a que indica o crescimento da população nos últimos anos e, para isso, foram úteis os dados fornecidos pelo IBGE, de modo que foi possível obter um padrão de crescimento, ou seja, uma taxa de crescimento anual. Outro exemplo é aquela que diz respeito à taxa de resíduo coletado a qual foi obtida a partir de entrevista com os integrantes da Cooperativa Acácia e também com os responsáveis pelo recolhimento de resíduos domiciliares.

Para Bryman (1989, apud MARTINS, 2012), na abordagem quantitativa deve se preocupar com a mensurabilidade, a causalidade, a generalização e a replicação.

Para esse trabalho, as variáveis que fazem parte do modelo precisaram ser mensuráveis para que fossem modificados seus valores e, com isso, houvesse a possibilidade de analisar seus efeitos no resultado final, ou seja, no final da simulação (um período de tempo de 10 anos). Além disso, as variáveis têm um relacionamento de causa e efeito, já que compõem ciclos no modelo, ou seja, a retroalimentação que *System Dynamics* proporciona aos modelos.

A proposição de um modelo e sua análise pode auxiliar os gestores no aperfeiçoamento do Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PMGIRS) devido ao fato de ser uma importante ajuda na tomada de decisão.

No que diz respeito a esse método, pode-se dizer que o presente projeto é uma pesquisa empírica normativa. O motivo é que “a preocupação principal do pesquisador é assegurar que exista adesão entre observações e ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade” (MORABITO NETO; PUREZA, 2012, p.181), ou seja, o modelo de *System Dynamics* que se utiliza no desenvolvimento do trabalho foi aquele que melhor representou a realidade do município de Araraquara no que tange a sua gestão de resíduos sólidos e não um modelo do que seria o ideal, ou o que aponta a literatura. Normativo diz respeito ao fato de se pretender que o modelo, na elaboração de cenários, permitisse a análise e proposição de normas, políticas e estratégias de gestão que, se implantadas, podem obter os resultados apresentados pela simulação.

Não é considerado um modelo axiomático, pois, como já descrito, o propósito do trabalho foi utilizar um modelo que mais se aproximasse da realidade da gestão municipal para que seus resultados possam ser analisados e generalizados para a cidade, o que pode não ser possível ao se utilizar um modelo axiomático devido a uma possível falta de adesão entre o modelo e a realidade.

Também não está se considerando que a pesquisa empírica seja do tipo descritivo, pois não se pretendeu utilizar um modelo que “descreva de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, o que leva a uma compreensão dos processos reais” (MORABITO NETO; PUREZA, 2012, p.182). Em outras palavras, esse tipo de pesquisa não seria adequado ao objetivo do trabalho por não se pretender tão somente descrever os efeitos e impactos da gestão

municipal ou conhecer os processos e suas relações, mas sim propor alterações e simular seus efeitos.

A validação interna do modelo poderia ser realizada apresentando-o aos gestores municipais e debatendo com eles os cenários obtidos para que, com suas experiências, deem um parecer ao pesquisador no que se refere à efetividade das previsões e na veracidade dos efeitos analisados, e auxiliassem-no na interpretação dos cenários, corrigindo possíveis erros. Além disso, calibrou-se o modelo para que ele apresentasse os resultados que mais se aproximassem da realidade do município.

Uma das maneiras de se fazer a validade externa foi comparando com os resultados obtidos pelo município no período de 2010 a 2017 com base nos dados passados pelos gestores entrevistados, além de análise dos erros gerados, conforme aponta a literatura.

O modelo foi construído na versão 7.1 do *software* Vensim PLE, executado em um computador Dell®, Modelo Latitude E6440, processador Intel® Core™ i5-4310M CPU @2.70GHz e 4GB de memória RAM e Sistema Operacional Windows® 7, de 64 Bits.

Para a construção desse modelo foi considerado como um ponto de entrada do sistema a população e a taxa anual de crescimento populacional. Essa variável tem relação estreita com a quantidade de resíduos gerados, pois foi adotada uma quantidade média produzida por pessoa. A partir da geração foi realizada a separação dos resíduos quanto a sua destinação, ou seja, Coleta Seletiva - composto em sua maioria por materiais recicláveis -, Compostagem - cuja composição é de material orgânico - e Aterro Sanitário - o restante dos resíduos.

Um dos desafios deste trabalho foi o de buscar estimativas acuradas para os parâmetros do modelo, fossem eles fixos ou variáveis no tempo, como custos, percentuais de geração, de reciclagem, de compostagem, além das receitas obtidas no processo.

3.1. ETAPAS DA PESQUISA

Primeiramente foi necessário realizar a Revisão Bibliográfica Sistemática que, como visto no capítulo 2, gerou um grande número de resultados, cujos trabalhos foram lidos e analisados para se selecionar aqueles que seriam utilizados nesta pesquisa. Para fazer uma análise mais detalhada foram construídos tabelas, gráficos e realizadas consultas a outros materiais de modo a justificar e enriquecer a escrita do texto da dissertação e contribuir para a literatura.

Com os modelos disponíveis foram feitas reproduções no *software* Vensim PLE, de modo a garantir uma visualização mais adequada e compreender as conexões entre as variáveis utilizadas pelos autores, buscando familiarizar-se com a utilização do referido *software*.

Também foi necessário estudar o método de *System Dynamics* proposto por Forrester (1961) de modo a compreender os componentes do modelo e suas características, bem como formular suas equações, ponto pouco abordado nos diversos trabalhos analisados previamente.

Para o desenvolvimento e simulação do modelo, foi necessário:

1. reunir-se com os responsáveis da Cooperativa Acácia para conhecer a rotina de trabalho, regiões atendidas, verificar os problemas vividos para coleta dos resíduos bem como o nível de colaboração da população para que o trabalho seja bem feito;
2. coletar dados e parâmetros, em diversas fontes (entrevista e documental) para estimar os valores que devem fazer parte do modelo, tais como taxas de geração, proporção dos resíduos componentes (orgânicos, recicláveis), valores praticados no mercado tanto para venda dos recicláveis como os custos envolvidos;
3. aprimorar o aprendizado na utilização do *software* Vensim PLE para iniciar as simulações;
4. gerar o modelo final, construindo as equações e valores iniciais, com base nas seguintes informações obtidas pelos gestores:
 - a. quantidade de resíduos gerados no município;
 - b. quantidade de resíduos coletados pela Cooperativa e quantidade encaminhada para aterro sanitário;
 - c. valores praticados com a comercialização dos resíduos recicláveis;

- d. receitas e despesas da cooperativa;
 - e. calcular a média dos valores referentes a geração de resíduos;
 - f. analisar as variáveis referentes aos resultados financeiros (despesas e receitas) e decidir os valores que seriam utilizados, bem como sua atualização/incremento;
5. realizar a validação e a verificação do modelo quanto à sua viabilidade para o fim a que se propunha;
 6. elaborar os cenários para posterior simulação;
 7. analisar os resultados gerados pelos cenários e fazer a comparação entre eles, por meio de gráficos e tabelas;
 8. realizar a análise financeira, tanto da operação rotineira no período analisado quanto dos valores de investimento;
 9. finalizar a escrita da dissertação.

4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feita a descrição do estudo de caso, a apresentação do desenvolvimento do modelo de gestão de resíduos sólidos, sua validação e o teste de verificação da viabilidade de sua utilização, bem como os valores e parâmetros utilizados.

4.1. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

No dia 27 de julho de 2018 foi feita a primeira reunião na Cooperativa Acácia a fim de conhecer a dinâmica de trabalho e entender como é realizada a gestão da coleta seletiva no município de Araraquara.

A história da Cooperativa inicia com um grupo de pessoas que tiravam seu sustento a partir da separação de materiais recicláveis em meio ao lixo doméstico. Com isso estavam diariamente expostos às condições insalubres do aterro para garantirem a sobrevivência.

Com a criação da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico e da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano, foi organizado, a partir de outubro de 2001, um grupo com 35 catadores independentes que sobreviveram nessa atividade nos últimos 10 anos. Este grupo criou primeiramente a Associação Acácia dos Trabalhadores de Materiais Reaproveitáveis de Araraquara, juridicamente constituída no ano de 2002.

No final de 2005, a Associação passou por um processo de transformação tornando-se Cooperativa Acácia de Catadores, Coleta, Triagem e Beneficiamento de Materiais Recicláveis de Araraquara, constituída juridicamente em fevereiro de 2006.

A Coleta Seletiva de Araraquara foi lançada em 2006 numa parceria entre o DAAE – autarquia responsável pela política de resíduos sólidos do município – e a Cooperativa Acácia, após aprovação da Lei Municipal 6.496 autorizando a celebrar convênio com a Cooperativa Acácia, cujo objetivo era o desenvolvimento de projetos e ações relacionadas à coleta, triagem e beneficiamento dos materiais recicláveis.

Em 21 de agosto de 2008 foi assinado o Contrato Administrativo entre o DAAE e a Cooperativa Acácia visando a execução de coleta de materiais

recicláveis porta a porta em toda a área urbana do município de Araraquara e execução de triagem do material coletado e sua preparação para comercialização. Dessa forma, tornou-se oficial o papel da Cooperativa na prestação dos serviços de coleta seletiva e o município passou a realizar o pagamento por esses serviços, em forma de subsídio, o que possibilitou melhorias nas condições de trabalho e recursos financeiros aos cooperados.

A Coleta Seletiva acontece no sistema porta a porta, oferecendo a 100% da população a oportunidade de destinar de maneira correta os resíduos sólidos recicláveis resultantes do seu consumo. Esta é operada por 5 (cinco) equipes de 14 mulheres cada, sendo uma líder, num total de 70 catadoras.

Cada rua tem uma cooperada que é responsável por recolher os resíduos da rua e dos “braços” da rua, ou seja, até metade das travessas que interceptam a rua. As cooperadas devem passar pelas casas e gritar “coleta” para que os moradores que não deixaram seus resíduos para fora possam entregar-lhes o material. O não atendimento dessa exigência pode acarretar em reclamação à cooperativa. A líder deve garantir que o trabalho esteja sendo feito.

Para que a atividade seja bem sucedida, a população precisa separar o resíduo seco do molhado. Consideram-se resíduos secos: papel, papelão, vidro, plástico e metal.

Também é realizada a Coleta em pontos fixos, os bolsões de entulho, também chamados Pontos de Entrega Voluntária (PEV). Atualmente são oito bolsões.

Os bolsões são áreas adaptadas para receber o descarte de pequenos volumes de entulhos ou materiais volumosos, até 1m³, ou seja, o equivalente ao que pode ser transportado por uma carroça ou um veículo utilitário tipo caminhonete de pequeno porte. Com os bolsões, o descarte desses materiais pode ser feito sem agredir o meio ambiente e nem por risco a saúde das pessoas.

Em cada bolsão fica um cooperado, que recebe o material da população. O caminhão recolhe os resíduos dos bolsões diariamente. Há também um ecoponto, que atende os bairros não atendidos pela coleta porta a porta: Empresas situadas no setor E, dentre elas Chácara Flora. Esse ecoponto não é um local fixo, ou seja, não é uma instalação. Ele é, na verdade, um caminhão que se dirige ao local em datas estabelecidas e estaciona em determinado ponto de modo a

receber dos moradores locais os resíduos. Nos bolsões e no ecoponto chega a serem recolhidas de 5 a 10 toneladas/mês de material.

Até 2012, a receita do município para a Cooperativa era por meio de subsídio, atualizado anualmente por índices tais como o IPCA. A partir do contrato de 2013, foram inclusas metas mensais, cujo cumprimento gera um bônus à Cooperativa. Os valores são atualizados com base no histórico e na expectativa de crescimento da coleta no período seguinte. De acordo com o contrato firmado com o DAAE, a Cooperativa precisa bater mensalmente 3 metas:

- 1ª. coletar, no mínimo, 486 toneladas de resíduos;
- 2ª. vender, no mínimo, 283 toneladas de resíduos;
- 3ª. receber, no máximo, 27 reclamações por parte da população.

O atingimento de todas as metas garante 100% do bônus. Cada uma das 3 metas representa 33,33% do valor do bônus e este é proporcional, ou seja, diminui gradativamente conforme a meta não é atingida. Como exemplo, pode se citar o registro de reclamações: até 27 reclamações no mês retorna 100% do valor a que se refere (33,33% do total do bônus). Conforme recebe mais reclamações do que o estabelecido, o percentual diminui. Até 2017, o não atingimento da meta implicava em não receber o bônus em sua totalidade.

Os valores pagos pelo contrato são:

- R\$182.282,34/mês (valor fixo)
- R\$15.000,00/mês (bônus por atingir as metas);
- R\$25.000,00 (valor fixo para gestão do Bolsão - PEV)

No início, a Cooperativa repassava uma parte da venda dos resíduos ao DAAE, numa proporção de 20% do total vendido. Esse percentual diminuía proporcionalmente em relação à quantidade coletada, ou seja, quanto maior a quantidade de resíduo coletada, menor era o repasse à autarquia. Por outro lado, o custo de manutenção dos bolsões era assumido pelo DAAE. Quando essa responsabilidade passou a ser da Cooperativa, em 2018, extinguiu-se a necessidade do repasse.

Cada contrato tem prazo máximo de 5 anos; todo ano é firmado um aditivo em que os valores de repasse são atualizados, com base no IPCA, e também as metas, quando é o caso. Como a Cooperativa não está conseguindo superar as metas, tais valores não estão sendo atualizados.

Desde abril de 2012, a Cooperativa mantém um contrato de comodato com a Meiwa Indústria e Comércio Ltda. (fábrica de embalagens de isopor – EPS), localizada em Arujá-SP. O contrato prevê uma máquina que fica em uma área adaptada na Usina. Com isso, as catadoras também passaram a recolher isopor. Após processado, em que se retira o ar (80% ar, 20% EPS), o material resultante pode ser comercializado.

Conforme as catadoras recolhem os resíduos, eles são colocados em uma *bag* que é carregada até determinado ponto da rua, geralmente nas esquinas, até que esteja cheia ou impossível de ser carregada adiante. Apesar de essa atividade parecer um trabalho massacrante, elas afirmam que outros meios de transporte, como um carrinho, poderiam dificultar o trabalho, principalmente se estiverem em uma rua muito movimentada ou com muitas subidas/descidas. Entretanto, elas são orientadas a não carregarem a *bag* se não estiverem com forças para tal, no caso de a *bag* estiver muito cheia e/ou pesada devido ao recolhimento dos resíduos. Nesse caso podem deixar no ponto até o qual conseguiram carregar para que o caminhão que as acompanha faça o recolhimento.

Em alguns bairros as catadoras sofrem com o roubo de suas *bags* ou de seus materiais recolhidos.

A cooperativa conta com nove caminhões no total, sendo quatro de propriedade própria e cinco cedidos pelo DAAE por meio de contrato específico. O contrato desses cinco caminhões que auxiliam a coleta seletiva é feito anualmente e tem custo mensal de R\$70.000,00 à autarquia. Os custos de manutenção e funcionários (5 motoristas e 1 encarregado) são de responsabilidade da empresa que controla esses caminhões. Os quatro caminhões da cooperativa são manuseados por cooperados.

Nos condomínios e prédios, em que não é possível fazer a coleta por unidade individual, a cooperativa possui o chamado LEV (Local de Entrega Voluntária). É uma estrutura com a *bag* na qual o morador pode descartar seus resíduos para coleta seletiva. Eles são recolhidos durante a coleta porta a porta, caso esteja no caminho da catadora, ou quando são informados que a *bag* está

cheia, ou, ainda, periodicamente, quando entram na programação para recolhimento.

A coleta porta a porta ocorre de segunda a sexta-feira, mas o trabalho na sede da cooperativa é de segunda a sábado.

O material oriundo da coleta seletiva passa por triagem e beneficiamento. Essa atividade é realizada na Usina de Triagem, localizada em espaço cedido pela Prefeitura Municipal desde 2008, por comodato, num prazo de 20 anos. Depois de realizada a separação, os materiais são prensados e vendidos.

Os materiais são separados da seguinte forma, conforme nomenclatura dada pelos cooperados:

- Papelão marrom - caixa comum de transporte de mercadoria;
- Papelão colorido - as mesmas caixas de transporte de mercadoria, mas mais coloridas;
- Papelão “esquisito” - um tipo de papelão mais fino, como embalagem de sabão em pó;
- Plástico fino colorido - saco e sacolinha de supermercado;
- Plástico fino branco - embalagem plástica mais grossa, como, por exemplo, o plástico que cobre colchão;
- Sopro colorido - embalagem de xampu, água sanitária (Varek);
- Sopro branco - embalagem de alvejante (cloro);
- PET branco - embalagem de refrigerante transparente;
- PET verde - embalagem de refrigerante verde;
- PET leite - embalagem de leite que tem difícil saída;
- PET óleo e maionese;
- PET água;
- PP - embalagem plástica que quando se dá toque (batidas) o som produzido é mais “fofo” - como exemplo é citada a embalagem de Toddy, de manteiga e de sorvete;
- PS - plástico que quando se bate o som é “seco”, como carcaça de televisão e monitor de computador;
- Papel branco - todos os papeis (livro, jornal)
- Revista - papel mais colorido ou com acabamento mais brilhante;
- Materiais finos - lata de alumínio, fio de cobre, peças desses metais;

- Motorzinho - um tipo de sucata de ferro, com preço diferenciado;
- Sucata - materiais que não se enquadram nos acima descritos, mas que podem ser comercializados.

A Cooperativa também recolhe óleo de cozinha usado. A única exigência é que este esteja acondicionado em embalagem PET para evitar vazamento. Esse resíduo é encaminhado para reciclagem e pode tornar-se sabão, detergente, tinta ou biodiesel.

Um dos resíduos que a Cooperativa não consegue trabalhar é um tipo de embalagem de plástico de leite, pois a empresa que o produz não o recolhe e também não há mercado para esse resíduo. Cabe ressaltar que essa embalagem é diferente das embalagens Tetrapack que são caixas de papelão com revestimento interno de alumínio e que são possíveis de reciclar. Apesar dessa problemática, a coleta é feita e às vezes conseguem revender, mas a procura é muito baixa.

O horário de trabalho da cooperativa é de segunda a sexta-feira das 7 às 16:30h com 1h de almoço e aos sábados das 7 às 11h.

Os recursos que mantêm as operações da cooperativa advêm da receita auferida pela venda de material reciclável e pela prestação de serviço de coleta seletiva no município. Para investimentos, contam com aporte financeiro do governo e de outras instituições.

Os gastos mensais ficam em torno de R\$240.000,00. Dentre as despesas estão o rateio entre os cooperados, despesas de escritório, manutenção, materiais, combustível, tributos e taxas e outras despesas.

O rateio mensal entre os cooperados é em torno de um salário mínimo. Como os cooperados não são funcionários, então não há recolhimento de INSS, mas a cooperativa também faz o pagamento desse imposto normalmente como se fosse o pagamento realizado pelo cooperado. Com essa atitude, garante-se que eles terão direito à aposentadoria quando lhes for de direito.

Os cooperados que desempenham papel de destaque, de liderança ou coordenação recebem um adicional em torno de R\$200,00. Atualmente 20 pessoas recebem esse adicional; são coordenadores, líderes dos grupos de coleta, membros do conselho e cooperados que fazem trabalhos de destaque e, por isso, recebem tal adicional como “merecimento”, segundo a própria linguagem dos envolvidos.

Atualmente, está ocorrendo uma diminuição na quantidade coletada pela Cooperativa. Acredita-se que um dos motivos dessa diminuição seja o surgimento de grupos que recolhem os resíduos antes das cooperadas e também o fato de alguns dos grandes geradores terem passado a comercializar seus resíduos diretamente com indústrias de reciclagem.

Ainda de acordo com o gerente, algumas soluções para aumentar a coleta e reciclagem são melhorar a triagem, a operacionalização e educação da população quanto aos resíduos que devem ser descartados.

O pagamento pela população do serviço de coleta seletiva é feito por meio de uma taxa, cujo valor é proporcional e referente ao consumo de água em determinado mês.

Atualmente o município não tem serviço de compostagem, mas está sendo estudado um projeto piloto para começar a tratar de resíduos orgânicos.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Após reunião com o gestor do DAAE e a gestora da Cooperativa e compreendido o cenário do município de Araraquara, foi iniciada a etapa de desenvolvimento do modelo de simulação da gestão de resíduos sólidos.

Primeiramente foi estabelecida a hipótese dinâmica, cujo objetivo é trabalhar a teoria do problema, de modo a analisar o comportamento e observar quais as variáveis devem compor o sistema e a influência que elas irão exercer entre si (Sterman, 2000).

Dessa forma, pode-se definir a hipótese dinâmica deste trabalho como sendo a seguinte: o crescimento na geração da quantidade de resíduos em dado período, bem como seus custos e receitas, está diretamente ligado ao crescimento populacional. Dessa forma, conforme aumenta a população, também aumenta a geração de resíduos e, portanto, o envio para coleta seletiva e para aterro sanitário. Sendo assim, ao se instituir políticas que possibilitem uma melhor destinação dos resíduos (reciclagem e compostagem), menor será a quantidade enviada inadequadamente para o aterro sanitário. Essa mudança trará impactos financeiros tanto para o município quanto para a Cooperativa.

Após a formulação da hipótese dinâmica, é possível concluir o desenvolvimento do modelo que servirá de base para as simulações a serem realizadas no presente trabalho.

Para o desenvolvimento deste modelo foram inseridas algumas variáveis básicas, tomando-se como prerrogativa o conteúdo já consolidado na literatura e informações obtidas com os gestores. As variáveis que fazem parte do modelo são aquelas referentes ao crescimento populacional, à quantidade de resíduos gerada por habitante, à quantidade recebida pela coleta seletiva, à quantidade enviada para aterro sanitário e ao percentual de geração de resíduo separado por tipo. Além disso, também foram incluídas variáveis financeiras de despesas e receitas do processo.

Para uma melhor visualização do modelo, foi feita a divisão em quatro módulos apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Descrição dos módulos do modelo

Módulo	Nome	Descrição	Resultados esperados
1	Geração de resíduos	Neste módulo são calculados população e quantidade de resíduos coletada, bem como a destinação dada aos resíduos após a coleta - Figura 18	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade total de resíduos reciclados; • Quantidade de resíduos enviados para Aterro Sanitário;
2	Quantidade de resíduos por tipo e receita individual	É feito o cálculo da quantidade de resíduo, separado por tipo, conforme dados históricos da Cooperativa Acácia e a receita obtida com a comercialização desses resíduos. Devido à quantidade de resíduos, foi dividido em submódulos: Papel e PET, PEAD, PP e PS, Metais, Outros - Figuras 19 a 23.	<ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de resíduos reciclados no período, separados por tipo; • Receita obtida com a comercialização dos resíduos
3	Receitas	Apresenta a soma de todas as receitas da Cooperativa a partir da comercialização de recicláveis e dos valores repassados pelo DAAE - Figura 24.	<ul style="list-style-type: none"> • Receita total da Cooperativa no período; • Lucro percebido em conjunto com as despesas (módulo 4)
4	Despesas	Representa todas as despesas da Cooperativa com pessoal e para manutenção da Usina - Figura 25.	<ul style="list-style-type: none"> • Valor monetário gasto pela Cooperativa.

Fonte: Elaborado pelo autor

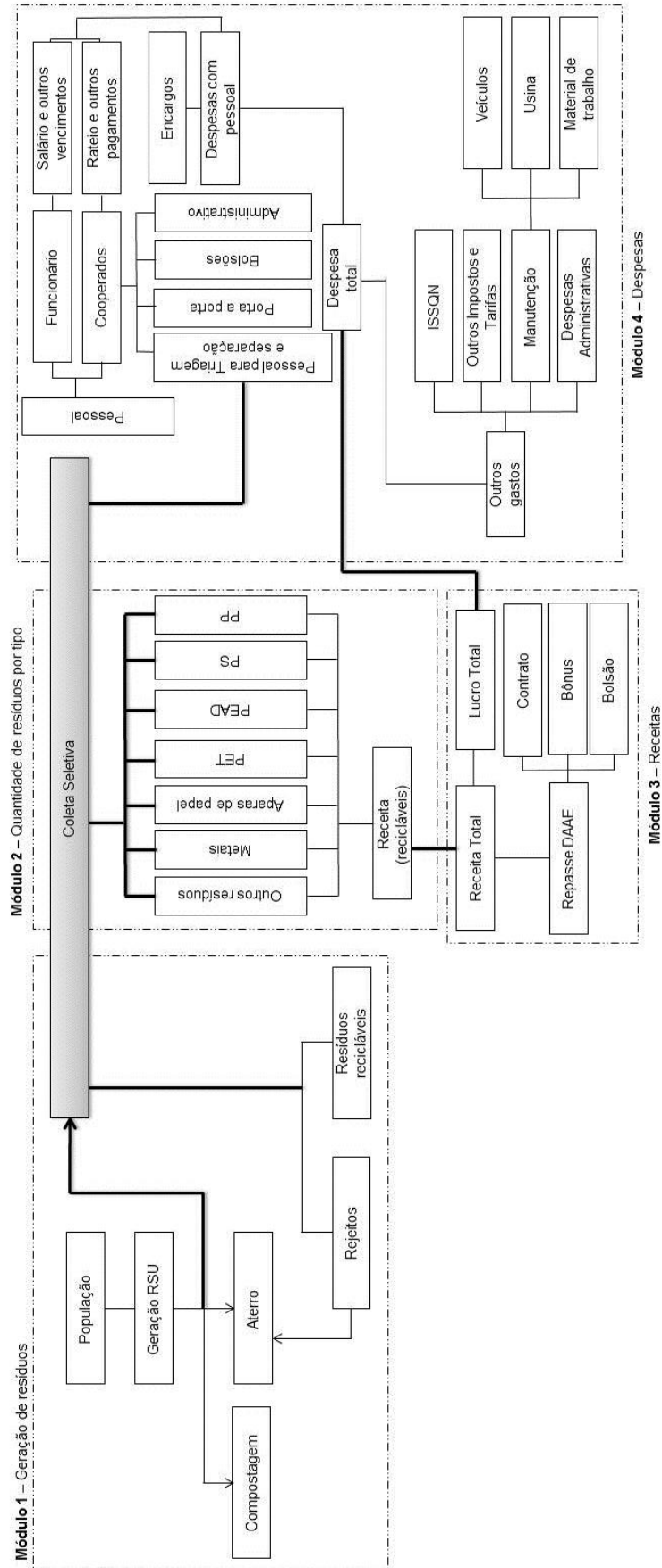
A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa a relação entre os quatro módulos e é um escopo do modelo que será detalhado a seguir. Nela consta, de forma resumida, as variáveis principais e, em destaque, aquelas que são elos entre os módulos, bem como a linha que relaciona essas variáveis.

A variável “Coleta Seletiva” está presente em 3 dos 4 módulos. Primeiramente seu valor é calculado a partir da quantidade de resíduos gerados pela população (módulo 1). A partir do seu cálculo, é feita a triagem e separação dos diversos tipos de resíduos, como metais, aparas, PET etc. (módulo 2). Por fim, tal variável relaciona-se também com a variável “Pessoal para triagem e separação dos resíduos” (módulo 4), pois é necessária para o cálculo da força de trabalho. A variável “Receita (recicláveis)” (módulo 2) está relacionada com a variável “Receita Total” (módulo 3), pois seu valor complementa a receita da Cooperativa, juntamente com o repasse recebido pelo DAAE. A “Receita Total”, em conjunto com a “Despesa Total” formam o lucro percebido pela Cooperativa no período. Com isso, percebe-se que todos os módulos estão relacionados.

Assim como os demais modelos da literatura, o modelo construído para esse trabalho inicia com o percentual do crescimento populacional. A partir da população, calcula-se a quantidade total de resíduos que será coletada no município e estima-se: 1) a proporção coletada pela Cooperativa, por meio da coleta porta a porta e pela quantidade entregue nos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), e 2) a quantidade que será coletada pela empresa que faz a coleta regular no município, cujo resíduo é encaminhado para o Aterro Sanitário.

Entretanto, uma parte dos resíduos coletados pela Cooperativa é imprópria para comercialização, seja pela característica do material, que não é comprado por nenhuma das empresas que realizam reciclagem, seja por conta da separação feita de forma incorreta pela população. Essa quantidade que não é comercializada para reciclagem é denominada rejeito e é encaminhada para o aterro sanitário.

Figura 17 - Relação entre os módulos

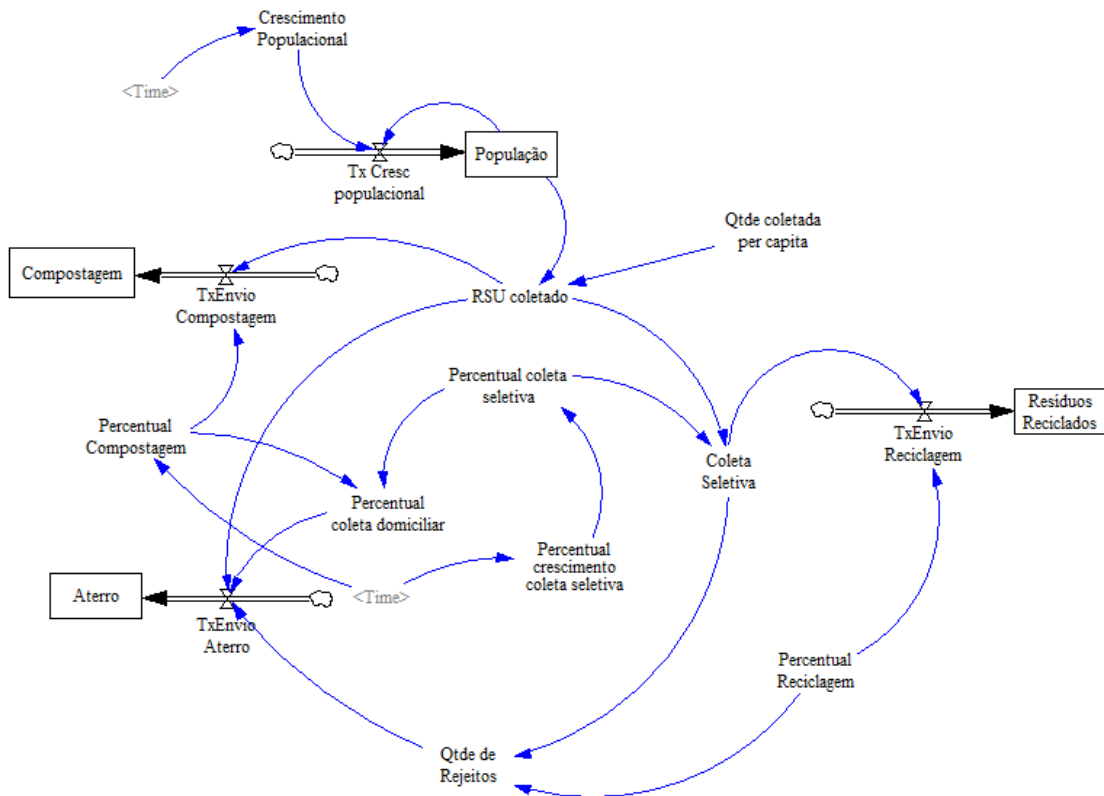


Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da proposta de políticas públicas, com o objetivo de aumentar a quantidade coletada e de conscientizar e educar a população quanto à correta separação dos seus resíduos, a quantidade de resíduos recicláveis pode aumentar e, conseqüentemente, a quantidade de rejeitos pode diminuir, melhorando a eficiência do sistema. Assim, a variável percentual de crescimento da coleta seletiva foi criada para se introduzir o efeito de um investimento realizado em campanha de conscientização e educação da população.

A Figura 18 representa o primeiro módulo e o início da simulação. Nele é calculado o número de habitantes no município com base em um percentual de crescimento populacional estimado pelo IBGE e também a quantidade de resíduos que possui cada uma das destinações (aterro sanitário, reciclagem e compostagem, quando é o caso).

Figura 18 - Início da simulação (módulo 1)



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse módulo, o número de habitantes está relacionado à taxa de crescimento populacional, que é positiva mas está decrescendo, conforme dados do

IBGE (2018). Além disso, a quantidade de pessoas influencia na quantidade de resíduos gerados, ou seja, quanto mais pessoas, mais resíduos são gerados. Isso é próprio da natureza humana. O que se pode modificar é a destinação desses resíduos. Sendo assim, do total gerado, tem-se as opções de ir diretamente para o aterro sanitário ou ir para a coleta seletiva. Uma terceira opção é o envio para compostagem.

Quanto maior a quantidade de resíduos separada corretamente, tanto para coleta quanto para compostagem, menor a quantidade que é encaminhada para o aterro. O inverso também é verdadeiro: quanto pior é a separação, maior é a quantidade de resíduo que tem a destinação incorreta. A quantidade de rejeitos provenientes da coleta também está atrelada à correta separação dos resíduos pela população. Quanto melhor essa separação, menos rejeitos sairiam dessa fonte e melhor seria o aproveitamento da força de trabalho da cooperativa.

Entretanto, alguns resíduos não são recicláveis ou comercializáveis, como tecidos e madeira, mas são separados para a coleta por se enquadrarem no grupo “resíduo seco”. A menos que os responsáveis pela triagem e separação encontrem um fim para aquele resíduo (roupas usadas podem ser doadas entre os cooperados, por exemplo), ele se transforma em rejeito e seguirá para o aterro.

O Quadro 6 apresenta as variáveis presentes no primeiro módulo, bem como o tipo e uma breve descrição de cada variável, além das equações envolvidas.

Quadro 6 - Variáveis do Módulo 1: Geração de resíduos

Tipo	Nome	Descrição
Auxiliar	Time	Essa variável representa a unidade de tempo e é acrescida de uma unidade a cada iteração.
Auxiliar	Crescimento populacional	Valor que representa o percentual de crescimento da população com base na estimativa do IBGE para os próximos anos.
Fluxo	Tx Cresc Populacional	Resultado da multiplicação do valor da variável População pelo percentual de Crescimento Populacional $Tx \text{ Cresc Populacional}(t) = \text{Crescimento Populacional} \times \text{População}(t - 1)$

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 6 - Variáveis do Módulo 1: Geração de resíduos (continuação)

Nível	População	Calcula a população em cada iteração a partir de equação diferencial e da variável "Tx Cresc Populacional" $População(t) = População(t - 1) + Tx\ Cresc\ Populacional_t$
Auxiliar	Qtde coletada per capita	Resultado da média da quantidade gerada por habitante no período anterior considerado
Auxiliar	RSU coletado	Representa a quantidade total de RSU coletada no período. $RSU\ coletado(t) = População(t) \times Qtde\ coletada\ per\ capita$
Auxiliar	Percentual coleta seletiva	Valor que representa, dentre a quantidade coletada total, a porcentagem destinada à coleta seletiva, calculada com base em média histórica.
Auxiliar	Coleta Seletiva	Representa a quantidade de resíduo coletada pela Cooperativa $Coleta\ seletiva(t) = RSU\ coletado(t) \times Percentual\ coleta\ seletiva$
Auxiliar	Percentual crescimento coleta seletiva	A partir dos investimentos realizados pelos órgãos competentes, pode assumir valores positivos (em porcentagem), indicando o efeito dessas políticas em termos de aumento da quantidade de resíduo reciclável coletada. Valor inicial é 0.
Auxiliar	Percentual Reciclagem	Valor percentual que representa a quantidade de resíduos coletados pela cooperativa que de fato são recicláveis ou comercializáveis.
Auxiliar	Rejeitos	Representa a quantidade de resíduos que foram coletados pela Cooperativa, mas que não são materiais comercializáveis/recicláveis $Rejeitos(t) = Coleta\ Seletiva(t) \times (1 - Percentual\ Reciclagem)$
Auxiliar	Percentual Compostagem	Percentual que representa a quantidade de resíduo que é destinada para compostagem.
Fluxo	Tx envio Compostagem	É a quantidade de resíduos coletados enviados para a compostagem. $Tx\ envio\ Compostagem(t) = RSU\ coletado(t) \times Percentual\ Compostagem$

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 6 - Variáveis do Módulo 1: Geração de resíduos (continuação)

Nível	Compostagem	Quantidade acumulada de resíduos enviada para compostagem $Compostagem(t) = Compostagem(t - 1) + Tx\ envio\ Compostagem$
Auxiliar	Percentual coleta domiciliar	Percentual que representa o valor coletado pelo caminhão de coleta domiciliar. Influenciado pelo percentual da coleta seletiva $Percentual\ coleta\ domiciliar(t) = 1 - Percentual\ coleta\ seletiva - PercentualCompostagem$
Fluxo	Tx envio aterro	É a taxa de envio de resíduos ao aterro, com base na coleta domiciliar e na quantidade de material rejeitado na triagem de reciclagem $Tx\ envio\ aterro(t) = RSU\ coletado(t) \times Percentual\ coleta\ domiciliar + Qtde\ de\ Rejeitos(t)$
Nível	Aterro	Quantidade de resíduos enviados ao aterro $Aterro(t) = Aterro(t - 1) + Tx\ envio\ aterro(t)$
Fluxo	Tx Envio Reciclagem	É a quantidade de resíduos coletados enviados para reciclagem. $Tx\ Envio\ Reciclagem(t) = Coleta\ seletiva(t) \times Percentual\ Reciclagem$
Nível	Resíduos reciclados	Quantidade acumulada de material reciclado. $Resíduos\ reciclados(t) = Resíduos\ reciclados(t - 1) + Tx\ Envio\ Reciclagem$

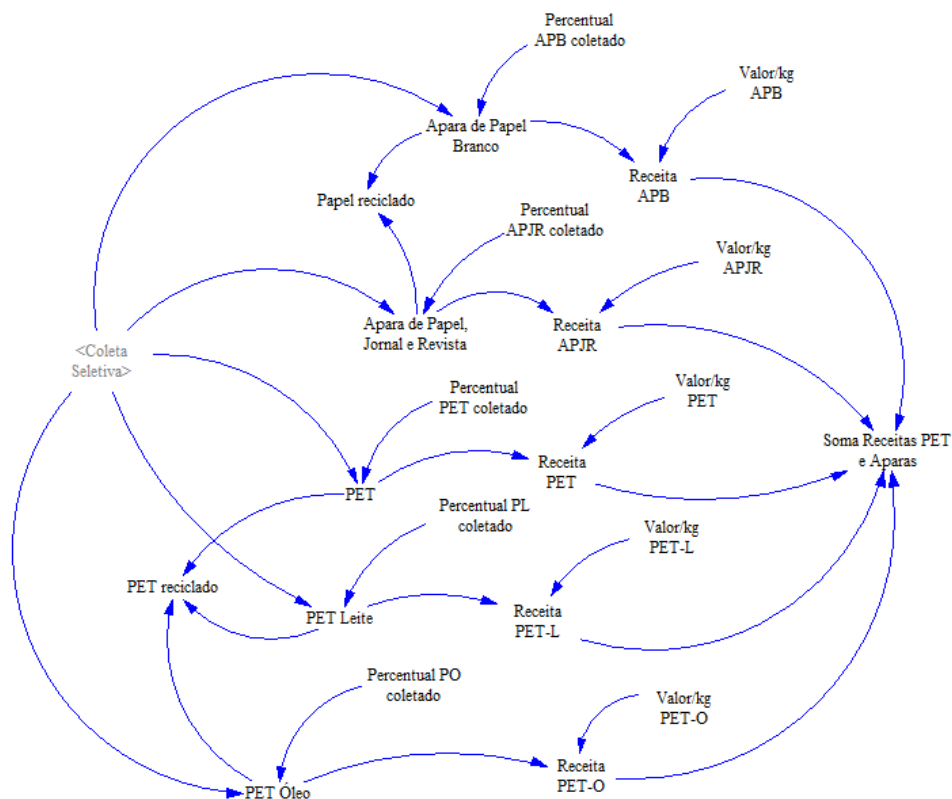
Fonte: Elaborado pelo autor

O segundo módulo corresponde à quantidade de resíduos triados disponíveis para comercialização. Os submódulos do módulo 2 foram criados com o objetivo de reunir os materiais de características semelhantes em grupos, como, por exemplo, o grupo de plásticos, aparas de papel, metais etc. No submódulo “outros” ficaram os resíduos que não se enquadravam nos demais grupos (EPS, vidro, óleo etc). Devido ao tamanho do grupo, as aparas de papéis ficaram no mesmo submódulo das embalagens PET.

As etapas realizadas pelo modelo a cada iteração e que correspondem às quantidades comercializadas são:

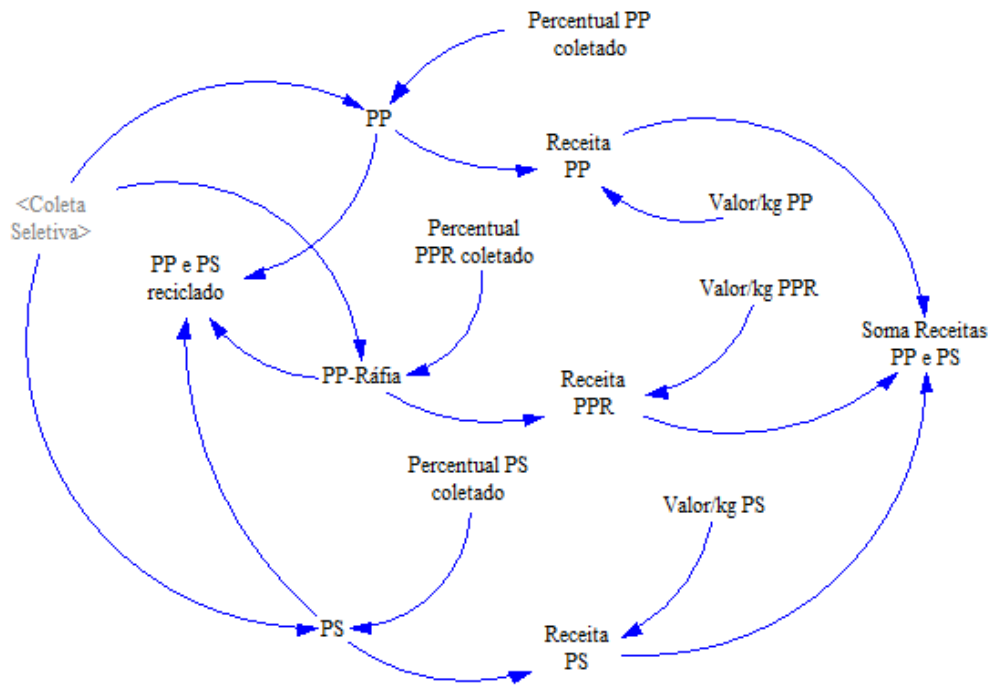
- Após o cálculo da quantidade gerada e coletada, é feita a triagem e venda desses resíduos, e calcula-se a variável “Receita (resíduo)”. O resultado é acumulado na variável “Soma Receitas (grupo de resíduo)”.
- Nas figuras 19, 20, 21, 22 e 23 são apresentados os módulos utilizados para calcular a quantidade de cada tipo de resíduo coletado no período e a receita obtida com a comercialização.
- A variável “Percentual (resíduo) coletado” foi obtida a partir dos dados históricos de 2010 a 2017 fornecidos pela Cooperativa Acácia. Para calcular seu valor foi feita a média aritmética dos percentuais obtidos para cada tipo de resíduo.
- A variável “(grupo de resíduo) reciclado” é a soma dos resíduos reciclados no período.
- Na variável “Soma Receitas(grupo de resíduos)” é feita a soma das receitas obtidas com a comercialização no período de simulação. Com ela será possível obter a receita total obtida pela Cooperativa com a comercialização de todos os resíduos recicláveis coletados.

Figura 19 - Cálculo de coleta de PET e Aparas de papel (módulo 2)



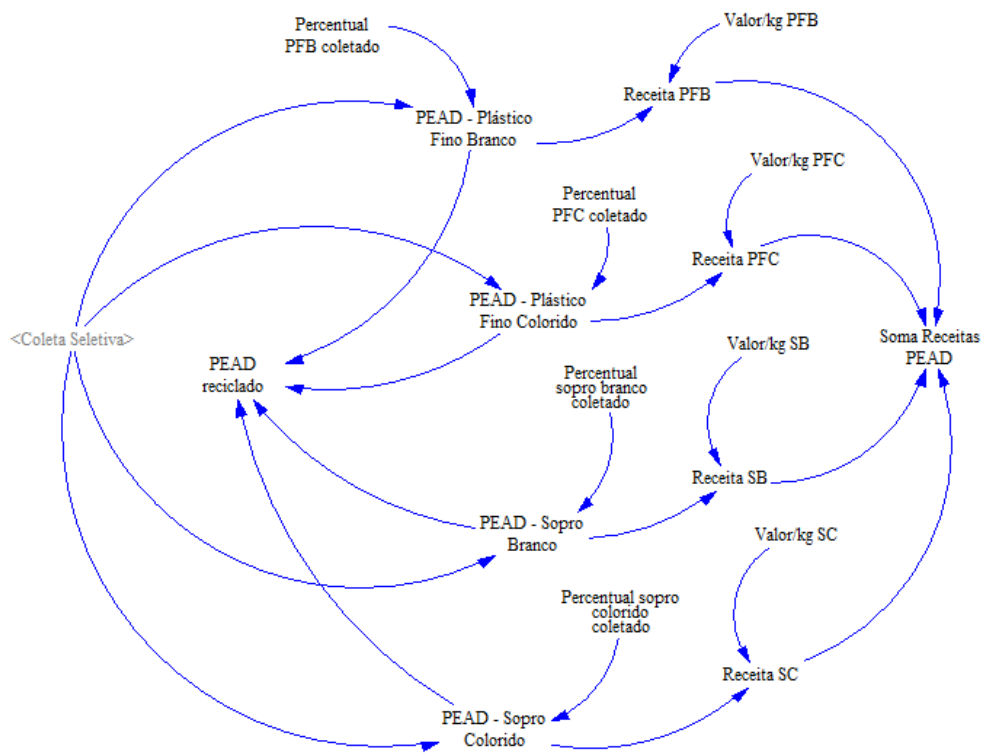
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 - Cálculo de coleta de PP e PS (módulo 2)



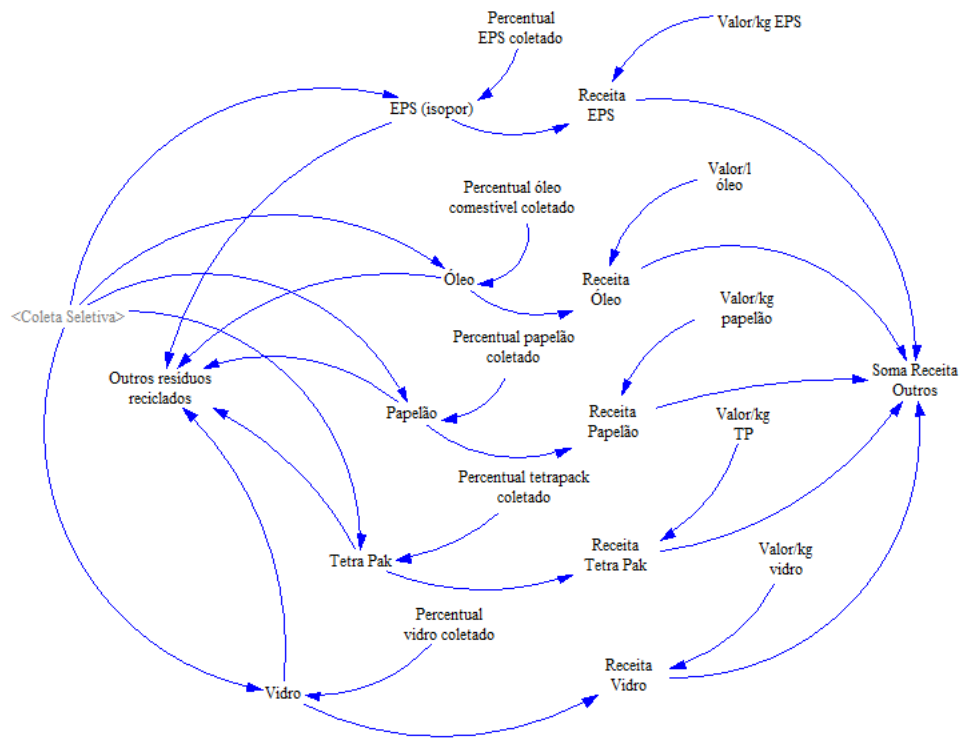
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21- Cálculo de coleta de PEAD (módulo 2)



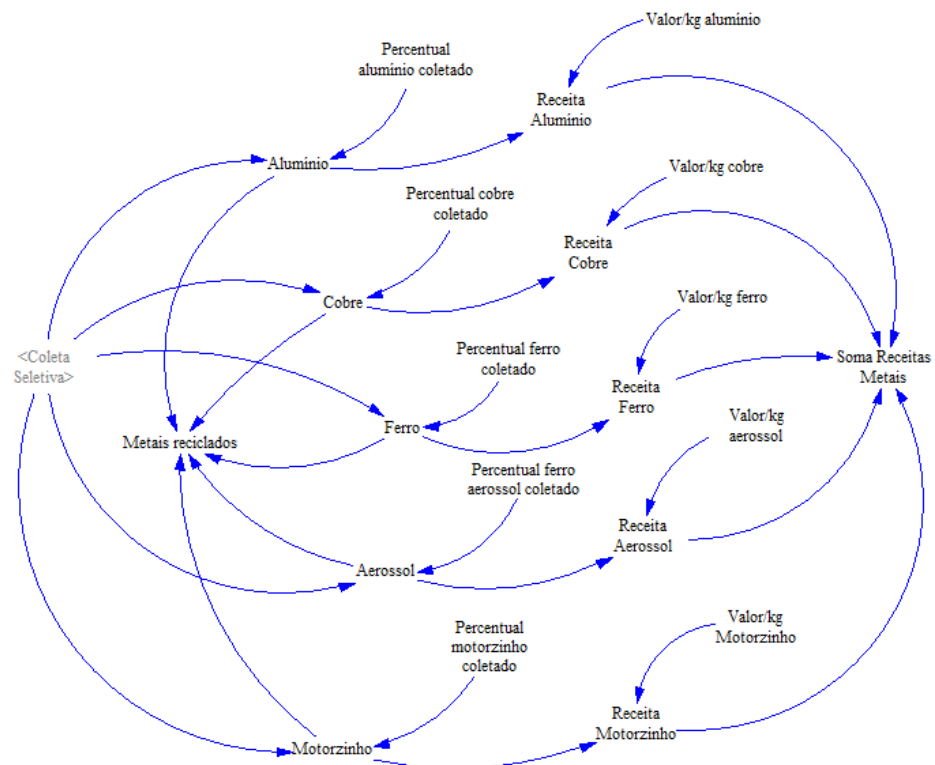
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 - Cálculo de coleta de outros tipos de resíduos (módulo 2)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 - Cálculo de coleta de metais (módulo 2)



Fonte: Elaborado pelo autor

Nesse segundo módulo, sabe-se que quanto maior a quantidade de resíduo recebido pela Coleta Seletiva, maior é a quantidade de resíduos recicláveis que podem ser triados e comercializados. Dessa forma, obviamente, o aumento nessa quantidade também influencia na receita obtida após a venda.

O Quadro 7 apresenta algumas variáveis presentes no módulo 2, bem como o tipo e uma breve descrição, além das equações envolvidas. Nele são apresentadas as variáveis relacionadas à apara de Papel Branco. As definições para os demais resíduos são análogas.

Quadro 7 - Variáveis do Módulo 2: Quantidade de resíduos por tipo e receita

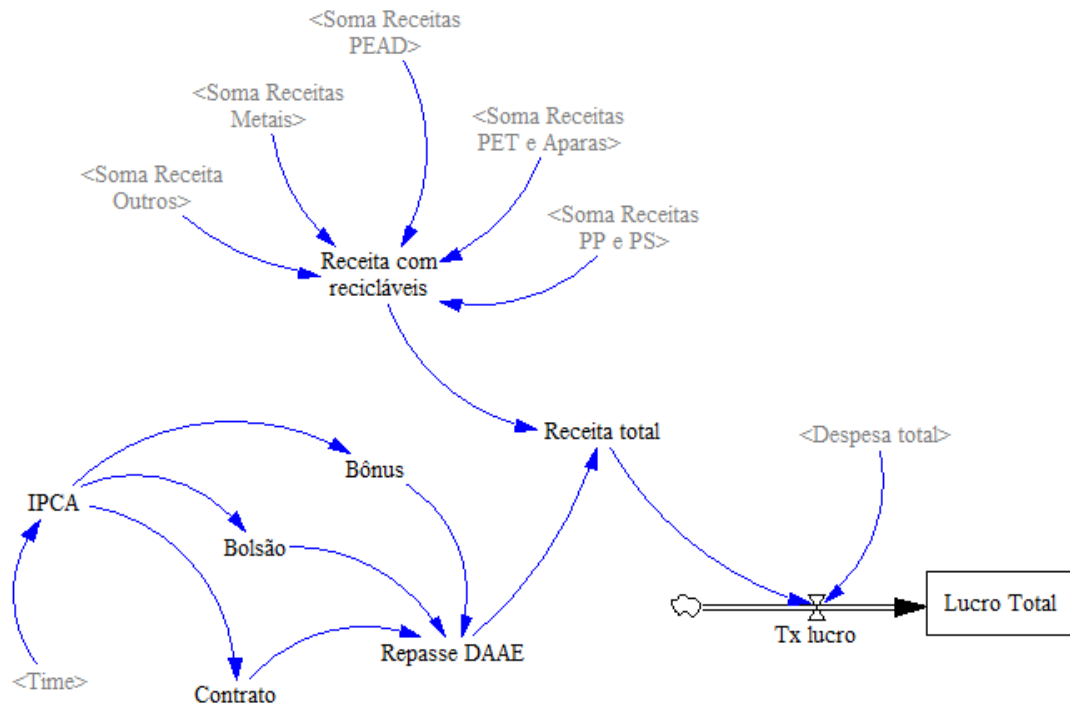
Tipo	Nome	Descrição
Auxiliar	Apara de Papel Branco	Representa a quantidade de Apara de papel branco coletado e enviado para reciclagem no período. <i>Apara de Papel Branco</i> = <i>Coleta Seletiva</i> × <i>Percentual geração APB</i>
Auxiliar	Percentual APB coletado	Resultado do cálculo da média aritmética dos percentuais do resíduo em relação ao total coletado em cada período.
Auxiliar	Receita APB	Valor monetário obtido com a comercialização do resíduo APB <i>Receita APB = Apara de Papel Branco</i> × <i>Valor/kg APB</i>
Auxiliar	Valor/kg APB	Valor de comercialização para o kg do resíduo APB. O valor inicial é aquele praticado no último período analisado. O valor é atualizado pelo IPCA.
Auxiliar	Soma Receitas PET e Aparas	Representa a soma de todos os valores obtidos com a comercialização dos resíduos no período

Fonte: Elaborado pelo autor

No terceiro módulo, após todos os cálculos relacionados à geração de resíduos e receitas com a comercialização, somam-se esses valores na variável “Receita com recicláveis” e, em conjunto com a variável “Repasse DAAE”, que compreende o bônus, o valor recebido pelo bolsão e o valor recebido pelo contrato, chega-se à receita da cooperativa, conforme pode se visualizar na Figura 24. Os valores repassados pela prestação do serviço são atualizados anualmente pelo IPCA.

Os valores obtidos com a receita compõem a variável “Tx lucro” e, posteriormente a variável de nível “Lucro Total”, em conjunto com os valores obtidos no módulo 4 - Despesas.

Figura 24 - Receitas da Cooperativa (módulo 3)



Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 8 apresenta as variáveis do módulo de receita e uma descrição com os valores utilizados inicialmente e as equações existentes nessa etapa do processo.

Quadro 8 - Variáveis do Módulo 3: Receitas

Tipo	Nome	Descrição
Auxiliar	Bônus	Bônus recebido por atingir as metas (quantidade coletada, quantidade vendida e número de reclamações no mês)
Auxiliar	Bolsão	Valor fixo para gestão do Bolsão - PEV
Auxiliar	Contrato	Valor fixo mensal repassado pelo DAAE como contraprestação pelo serviço realizado
Auxiliar	Repasse DAAE	Soma de todos os valores repassados pelo DAAE $\text{Repasse DAAE} = \text{Bônus} + \text{Bolsão} + \text{Contrato}$

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 8 - Variáveis do Módulo 3: Receitas (continuação)

Auxiliar	Receita com recicláveis	Soma de todas as receitas obtidas com a venda dos materiais recicláveis
Auxiliar	Receita total	Soma das receitas obtidas pela Cooperativa <i>Receita total = Repasse DAAE + Receita com recicláveis</i>
Fluxo	Tx lucro	Representa o lucro obtido pela Cooperativa no período <i>Tx lucro = Receita Total – Despesa Total</i>
Nível	Lucro Total	Soma acumulada do lucro obtido

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 25 representa o sistema para fins de simulação das despesas (módulo 4). Ele está dividido em dois tipos de despesas: despesas com pessoal e outras despesas.

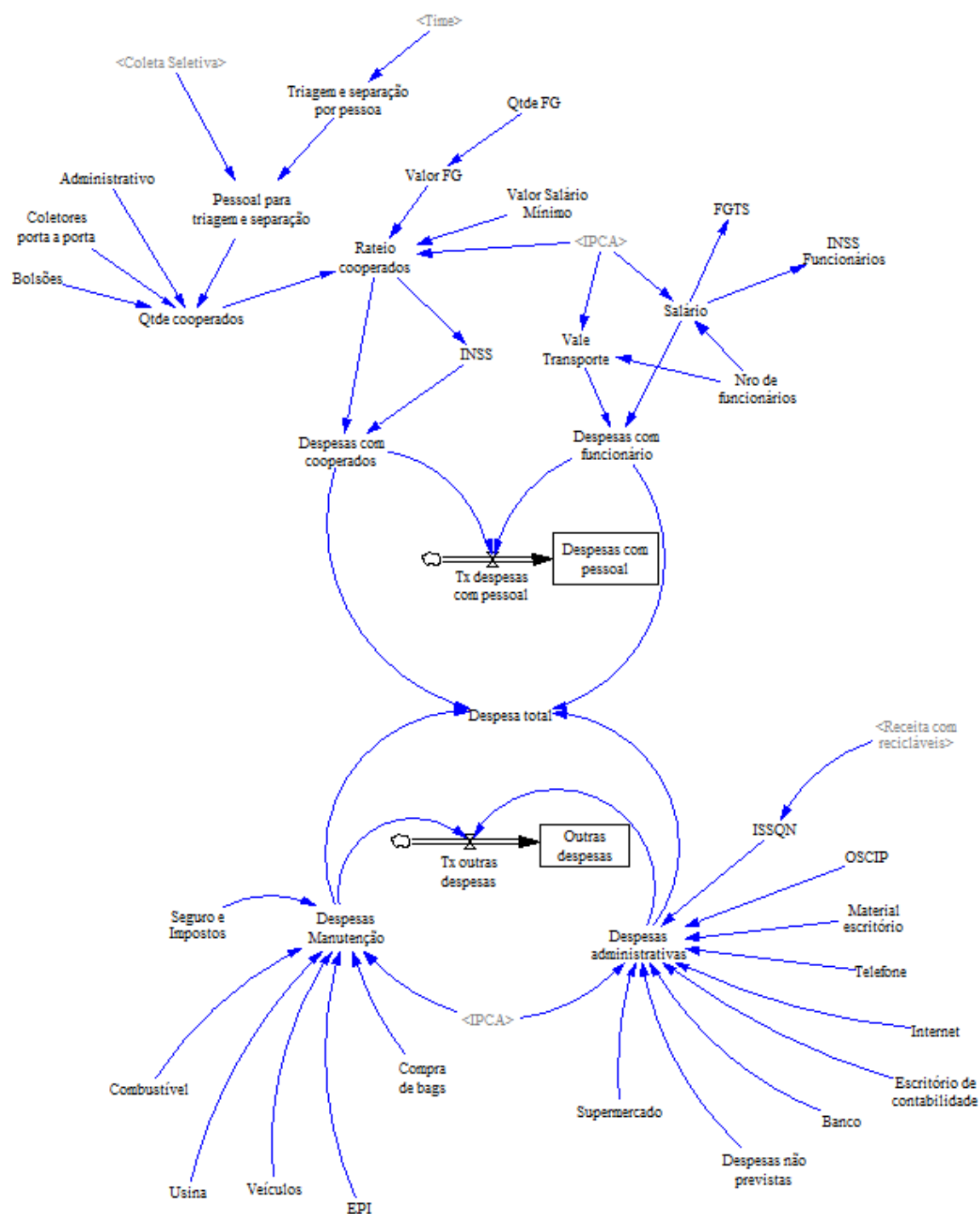
O ramo que simula os gastos com pessoal está subdividido em despesas com cooperados e despesas com funcionário. A quantidade de cooperados necessária para realização da tarefa de triagem e separação é obtida com base na média de materiais triados individualmente e na quantidade total de material coletado pela Cooperativa. Dessa forma, o sistema apresenta a necessidade de se obter mais mão de obra para a atividade. É possível simular, por meio da variável “Triagem e separação por pessoa” uma melhoria no processo de triagem e aumento de produtividade. Nesse caso a quantidade de cooperados pode diminuir.

FG é abreviação de Função Gratificada, um valor recebido por aqueles cooperados que desempenham atividades diferenciadas de liderança e administrativa na cooperativa.

A cooperativa possui um funcionário e os valores com a folha de pagamento estão simulados no sistema no outro ramo do módulo.

A previsão das demais despesas da cooperativa foi realizada com base nas planilhas apresentadas pela Cooperativa. Foram pontuadas aquelas comuns e periódicas (mensais). Despesas menos frequentes foram reunidas na variável “Despesas não previstas”. Um exemplo desse tipo de despesa é gasto com táxi, como consta em um dos balanços apresentados.

Figura 25 - Despesas (módulo 4)



Fonte: Elaborado pelo autor

O Quadro 9 apresenta as variáveis pertencentes ao módulo 4, suas descrições e equações existentes nessa etapa do processo de simulação.

Quadro 9 - Variáveis do Módulo 4: Despesas

Tipo	Nome	Descrição
Auxiliar	Triagem e Separação por pessoa	Representa a quantidade média triada/separada por cooperado. Valor inicial 30 mil kg/pessoa/semestre.
Auxiliar	Pessoal para a triagem e Separação	Quantidade de pessoas necessárias para realizar a operação de triagem e separação $Triagem\ e\ separação = \frac{Coleta\ Seletiva(t)}{Triagem\ e\ separação\ por\ pessoa}$
Auxiliar	Administrativo	Número de pessoas que trabalha no administrativo da cooperativa.
Auxiliar	Coletores porta a porta	Número de pessoas que trabalha na coleta dos resíduos porta a porta.
Auxiliar	Bolsões	Número de pessoas que trabalha nos bolsões e no ecoponto.
Auxiliar	Valor FG	Valor pago aos cooperados que desempenham atividades diferenciadas. $Valor\ FG = 200 \times Qtde\ FG$
Auxiliar	Qtde FG	Número de pessoas que desempenham atividades diferenciadas na cooperativa.
Auxiliar	Qtde cooperados	Quantidade de pessoas que trabalham na cooperativa $Qtde\ cooperados = Bolsões + Coletores\ porta\ a\ porta + Administrativo + Triagem\ e\ Separação$
Auxiliar	Rateio cooperados	Valor pago aos cooperados no período de 6 meses $Rateio\ cooperados = (Qtde\ cooperados \times Valor\ Salário\ Mínimo + Valor\ FG) \times 6 \times IPCA$
Auxiliar	INSS	Valor pago pela cooperativa sobre o valor rateado (20%) $INSS = Rateio\ cooperados \times 0,2$
Auxiliar	Valor Salário Mínimo	Valor do salário mínimo do Estado de São Paulo pago ao cooperado. Desse valor desconta-se 8% de INSS. $Valor\ salário\ mínimo = 1076 \times 0,92$
Auxiliar	Despesas com cooperados	Valor gasto pela cooperativa com os cooperados $Despesas\ com\ cooperados = Rateio\ cooperados + INSS$

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 10 - Variáveis do Módulo 4: Despesas (continuação)

Auxiliar	Vale transporte	Valor pago de VT ao funcionário, corrigido pelo IPCA <i>Vale Transporte</i> $= (200 \times Nro\ de\ funcionários \times 6) \times IPCA$
Auxiliar	Salário	Valor pago de salário ao funcionário da cooperativa. <i>Salário</i> $= (1780 \times Nro\ e\ funcionários \times 6) \times IPCA$
Auxiliar	Nro de funcionários	Quantidade de funcionários contratados pela cooperativa.
Auxiliar	FGTS	Valor pago pela cooperativa referente ao Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS) <i>FGTS</i> $= Salário \times 0,08$
Auxiliar	INSS Funcionário	Valor pago pela cooperativa ao INSS referente ao funcionário (32% no total, não contabilizados os 8% que são descontados do funcionário) <i>INSS Funcionários</i> $= Salário \times 0,32$
Auxiliar	Despesas com funcionário	Valor pago de salários (descontados 8% de INSS) e benefícios ao funcionário <i>Despesas com funcionário</i> $= Vale\ Transporte + Salário \times 0,92$
Fluxo	Tx gastos com pessoal	Valor gasto pela Cooperativa com os cooperados e com o funcionário. <i>Tx gastos com pessoal</i> $= Despesas\ com\ cooperados + Despesas\ com\ funcionário$
Nível	Gastos com pessoal	Valor acumulado gasto pela cooperativa com pessoal <i>Gastos com pessoal(t)</i> $= Gastos\ com\ pessoal(t - 1) + Tx\ gastos\ com\ pessoal$
Auxiliar	EPI	Valor gasto com Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) aos cooperados.
Auxiliar	Combustível	Valor gasto com combustível.
Auxiliar	Caminhões	Número de caminhões necessários para auxiliar nas atividades
Auxiliar	Usina	Valor médio pago com manutenção dos equipamentos e da usina.
Auxiliar	Veículos	Valor médio com manutenção/reparos dos veículos da cooperativa

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 11 - Variáveis do Módulo 4: Despesas (continuação)

Tipo	Nome	Descrição
Auxiliar	Seguro	Valor médio pago com seguro da usina e dos veículos
Auxiliar	Compra de bags	Valor médio pago com a troca ou compra de novos bags para transporte da coleta
Auxiliar	Manutenção	Soma de todas as despesas mencionadas atualizada pelo IPCA $\text{Manutenção} = ((EPI + Combustível + Usina + Veículos + Seguro + Bags) \times 6) \times IPCA$
Auxiliar	Supermercado	Valor médio gasto com itens de supermercado
Auxiliar	ISSQN	Valor pago com o Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza (ISSQN).
Auxiliar	Escritório de contabilidade	Valor pago ao escritório que faz a contabilidade da cooperativa.
Auxiliar	OSCIP	Valor pago pela Cooperativa à Organização da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIP)
Auxiliar	Material de escritório	Valor médio gasto com materiais de escritório
Auxiliar	Telefone	Valor médio gasto com telefone corporativo e fixo
Auxiliar	Internet	Valor mensal pago de internet.
Auxiliar	Banco	Valor gasto com taxas bancárias
Auxiliar	Despesas não previstas	Valores extras pago no mês. Ex: taxi e multas de trânsito.
Auxiliar	Despesas Administrativas	Soma de todas as despesas administrativas $\text{Despesas Administrativas} = ((Banco + Despesas não previstas + Escritório de contabilidade + Internet + Material escritório + OSCIP + Supermercado + Telefone) * 6) * IPCA + ISSQN$
Fluxo	Tx outros gastos da usina	Soma das despesas administrativas e de manutenção $\text{Tx outros gastos da usina} = \text{Manutenção} + \text{Despesas administrativas}$
Nível	Outros gastos	Soma acumulada dos gastos da usina $\text{Outros gastos}(t) = \text{Outros gastos}(t - 1) + \text{Tx outros gastos da usina}$
Auxiliar	Despesa total	Soma de todas as despesas $\text{Despesa total} = \text{Despesas com cooperados} + \text{Despesas com funcionário} + \text{Despesas Manutenção} + \text{Despesas adinistrativas}$

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3. VALORES E PARÂMETROS DO MODELO DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA O ESTUDO DE CASO

A partir dos resultados dos anos anteriores, fornecidos pelo DAAE e pela Cooperativa Acácia, foi estabelecida a quantidade coletada de resíduos sólidos domiciliares (RSD, também chamados de “resíduos úmidos”) e de resíduos da Coleta Seletiva (chamados “resíduos secos”) por pessoa ao ano. A Tabela 6 apresenta os dados obtidos do DAAE e da Cooperativa no período de 2010 a 2017. A população anual foi obtida na página do IBGE.

A quantidade de resíduo coletado por pessoa ao ano é o resultado da divisão do total coletado (RSD + Coleta Seletiva) pelo número de habitantes no período analisado.

Tabela 6 - Quantidades coletadas por ano

Ano	RSD (ton)	Coleta Seletiva (ton)	Total (ton)	População	Qtde x hab (kg/ano)
2010	48.744,06	3.677,06	52.421,12	208.662	251,23
2011	52.334,94	4.280,66	56.615,60	210.672	268,74
2012	55.656,38	4.541,26	60.197,64	212.617	283,13
2013	53.034,23	5.479,00	58.513,23	222.036	263,53
2014	54.177,38	6.122,71	60.300,09	224.304	268,83
2015	54.675,69	6.194,13	60.869,82	226.508	268,73
2016	58.432,67	5.827,67	64.260,34	228.664	281,03
2017	60.785,25	5.009,51	65.794,76	230.770	285,11

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados do DAAE e da Cooperativa Acácia e IBGE

Contrariamente ao esperado, apesar do aumento da população nos anos verificados e do aumento da quantidade coletada de resíduos domiciliares (exceto no período 2012/2013 em que houve uma queda na quantidade de RSD) e consequente variação na quantidade anual gerada/coletada por habitante. Além disso, houve queda na quantidade de resíduos da coleta seletiva nos anos 2016 e 2017.

A partir do ano de 2016, houve uma diminuição da quantidade de resíduos coletados pela Cooperativa, o que pode significar que o padrão de

consumo da população mudou ou que a prática de separação e entrega voluntária dos grandes geradores mudou.

Considerando que a Cooperativa pode fornecer os dados quantitativos referentes à coleta de resíduos até junho de 2018, a modelagem utilizou, como unidade de tempo, o semestre. Dessa forma, as médias utilizadas referem-se ao período semestral desde 2010 até o primeiro semestre de 2018. Também se considerou a capacidade de trabalho e o espaço físico onde está localizada a Cooperativa.

Outro fator relevante que deve ser considerado é a quantidade coletada pela Cooperativa que é encaminhada ao aterro sanitário, o chamado rejeito. Atualmente, essa quantidade está em torno de 50,43%.

Esse rejeito pode ser oriundo de duas fontes: resíduos que foram separados incorretamente pela população, ou seja, itens que não são recicláveis, inclusive resíduos hospitalares e/ou remédios, ou resíduos que, apesar de recicláveis, não são comercializáveis.

São considerados resíduos não comercializáveis aqueles que não são comprados pelas empresas recicladoras, devido ao custo para o tratamento. Por volta de metade da quantidade coletada é considerada rejeito pelos separadores.

O modelo desenvolvido neste trabalho foi elaborado no Vensim PLE com as seguintes configurações:

- Tempo inicial - 1
- Tempo final - 20
- Passo de tempo - 1
- Unidade de tempo - Semestre

Com isso o modelo simulará 10 anos, sendo que o segundo semestre de 2018 será o 1º e o primeiro semestre de 2028 será o 20º.

Conforme mencionado, o crescimento da população foi calculado com base nas previsões do IBGE para os próximos anos, tomando por base as previsões do Instituto para o estado de São Paulo. O valor inicial considerado no modelo foi de 233.744 pessoas (IBGE, 2018).

A quantidade de resíduos coletada per capita foi calculada pela média da quantidade obtida no período de 2010 a 2017 e corresponde a

135,645kg/pessoa/semestre, ou seja, 271,29kg/pessoa/ano. Esses dados referem-se àqueles de Araraquara com base nos valores passados pelo DAAE e pela Cooperativa Acácia.

O valor da quantidade recolhida pela Coleta seletiva, no período de 2010 a 2017, foi, em média, 8,56% do total coletado pelo município. A quantidade restante dos resíduos é coletada por caminhões que o encaminham para a área de transbordo e deste para o aterro sanitário em Guatapar-SP.

Com um aumento na coleta seletiva, ou seja, caso sejam feitos investimentos para informar e conscientizar a populao no sentido de se realizar uma separao correta dos resíduos, esse percentual pode aumentar e, conseqüentemente, o percentual de coleta domiciliar poderá diminuir. Um resultado semelhante será obtido com o investimento em políticas e procedimentos para realizao de compostagem dos resíduos.

O valor por kg de cada resíduo reciclável  atualizado anualmente pelo IPCA, que no último ano foi de 4% aa, convertido para 1,98% ao semestre, já que o modelo está configurado para período semestral.

Os quadros 10 a 13 apresentam os valores utilizados no modelo. Esses valores foram obtidos a partir dos dados do período de 2010 a 2017 informados pelo DAAE e pela Cooperativa Acácia, conforme mencionado.

Quadro 12 - Valores utilizados no módulo 1 - gerao de resíduo

Variável Auxiliar	Valor
Crescimento populacional	No Tempo = 1 seu valor  de 0.7417%. No Time = 20 seu valor  0,4539% Os valores intermediários são calculados automaticamente na mesma proporo (escalonamento linear).
Populao	233.744 pessoas
Qtde coletada per capita	135,645kg/pessoa/semestre
Percentual coleta seletiva	8,56%
Percentual Reciclagem	49,4685%
Percentual Compostagem	0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 13 - Valores utilizados no módulo 2 - quantidade de resíduos e receita

Variável Auxiliar (Percentual de geração)	Valor (%) em relação ao total coletado	Preço por quilograma
Alumínio	0,00158785	R\$ 2,00
Apara de Papel Branco (APB)	0,02081865	R\$ 0,30
Apara de Papel, Jornal e Revista (APJR)	0,07505923	R\$ 0,06
Cobre	0,00012747	R\$ 1,50
EPS (isopor)	0,00146328	R\$ 0,80
Ferro	0,0601761	R\$ 0,20
Ferro (Aerossol)	0,074571	R\$ 0,55
Motorzinho	0,00055320	R\$ 0,50
Óleo Comestível Saturado	0,00165693	R\$ 1,00
Papelão	0,13946221	R\$ 0,25
PEAD (Plástico Fino Branco)	0,00293562	R\$ 0,50
PEAD (Plástico Fino Colorido)	0,01718511	R\$ 0,25
PEAD (Sopro Branco)	0,00422346	R\$ 1,00
PEAD (Sopro Colorido)	0,00744729	R\$ 0,90
PET	0,01693038	R\$ 1,50
PET (Leite)	0,00335950	R\$ 0,05
PET (Óleo)	0,00391185	R\$ 0,07
PP	0,00343363	R\$ 0,10
PP - Ráfia	0,01307676	R\$ 0,10
PS	0,02960210	R\$ 0,10
Tetra Pak	0,01794120	R\$ 0,20
Vidro	0,07630929	R\$ 0,07

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 14 - Valores utilizados no módulo 3 - receitas

Variável Auxiliar	Valor
Bônus	R\$15.000,00/mês
Bolsão	R\$25.000,00
Contrato	R\$182.282,34/mês

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 15 - Valores utilizados no módulo 4 - despesas

Variável Auxiliar	Valor
Administrativo	13 pessoas
Coletores porta a porta	70 pessoas
Triagem e Separação	77 pessoas
Bolsões	11 pessoas
Valor FG	R\$200,00 por pessoa
Qtde FG	20 pessoas.
Valor Salário Mínimo	R\$1076,20 (2018)
Vale transporte	R\$200,00/mês
Salário	R\$1.780,00/mês
Nro de funcionários	1 funcionário
EPI	R\$ 4.000,00/mês
Combustível	R\$ 10.000,00/mês
Usina	R\$ 3.000,00/mês
Veículos	R\$ 1.000,00/mês
Seguro	R\$ 4.000,00/mês
Compra de bags	R\$ 5.000,00/mês

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 13 - Valores utilizados no módulo 4 - despesas (continuação)

Supermercado	R\$ 2.000,00/mês
ISSQN	3% a.m. sobre a receita auferida
Escritório de contabilidade	R\$ 1.300,00/mês
OSCIP	R\$ 7.500,00/mês
Material de escritório	R\$ 600,00/mês
Telefone	R\$ 2.100,00/mês
Internet	R\$ 200,00
Banco	R\$ 700,00/mês
Despesas não previstas	R\$ 2.000,00/mês

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO.

Conforme explicado por Sterman (2000), todos os modelos, mentais ou formais, são limitados; consistem em uma representação simplificada do mundo real e, portanto, possuem erros. Nesse sentido, o autor acrescenta que não se pode falar em verificar ou validar um modelo, pois implicaria dizer que ele representa a verdade em sua totalidade. O que poderiam ser validadas são afirmações analíticas, ou seja, proposições derivadas de um sistema lógico fechado.

O exposto pelo autor está em conformidade com o apresentado por Forrester (1961) que afirma que “qualquer procedimento ‘objetivo’ de validação de um modelo baseia-se em algum baixo nível de julgamento ou crença em que tanto o procedimento quanto seus objetivos são aceitáveis sem provas objetivas”.

Em outras palavras, de acordo com o autor, na abordagem de *System Dynamics*, a validação dos modelos de simulação é feita tomando-se por base sua conveniência e utilidade. É preciso confiar em seu comportamento sob circunstâncias limitadas e de acordo com um objetivo específico. Dessa forma, o que

se pode considerar a respeito de um modelo é a sua utilidade em auxiliar o usuário para uma tomada de decisão.

Sterman (2000) defende que apesar de não ser possível de se realizar a validação de um modelo, o mesmo não se pode dizer do seu inverso, ou seja, é possível refutar um modelo se algumas premissas não forem atendidas ou se for possível encontrar uma teoria que negue o pretendido pelo modelo desenvolvido.

Sendo assim, pode-se dizer que os modelos representam uma verdade até que surja uma nova teoria ou um novo modelo, que descarte o seu anterior e ocupe seu lugar na literatura (STERMAN, 2000).

Ainda conforme argumentado pelo autor, o objetivo da modelagem e do esforço científico é construir um entendimento compartilhado que possibilite a percepção do mundo real e permita a resolução de problemas. Daí a necessidade de se desenvolver um modelo, ainda que limitado, que atenda as expectativas do usuário.

Por outro lado, percebe-se que há uma restrição de alguns autores, como os supracitados, quanto ao uso do termo “validação”. Porém, é frequente o uso do referido termo em diferentes partes do texto, inclusive quando Sterman (2000) afirma que a validação de um modelo inicia a partir da escrita da primeira equação. O termo será utilizado neste texto, portanto, no sentido de avaliação da utilidade do modelo para simular o problema proposto e a hipótese dinâmica.

Além disso, o autor defende que a validação é um processo contínuo de se realizar testes e construir confiança no modelo. Essa confiança é alcançada conforme se confrontam os resultados do modelo com aqueles alcançados no mundo real e também pode ser verificada por meio de opinião de especialistas. Por isso, é importante encontrar oportunidades para colocar o modelo à prova e replicar uma grande quantidade de experiências.

Quanto à utilidade do modelo, o autor sugere que sejam respondidas algumas questões a fim de se avaliar o seu propósito, a sua conformidade com princípios fundamentais, a sensibilidade com relação aos seus resultados e suposições e a integridade do processo de modelagem.

As questões que devem nortear a avaliação de um modelo, propostas pelo autor, são apresentadas no Quadro 16.

Com base nas questões apresentadas por Sterman (2000), foi realizada a avaliação do modelo quanto a seu objetivo, utilidade, limites; estrutura

física e de tomada de decisão; robustez e sensibilidade para hipóteses alternativas; e pragmatismo e políticas de uso do modelo.

Quadro 16 - Questões para avaliação de um modelo

<p>Objetivo, utilidade e limites:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Qual é o objetivo do modelo? • Qual é o limite do modelo? As questões importantes para o objetivo do modelo são tratadas internamente? Variáveis importantes foram excluídas por não ser possível quantificá-las? • Qual é o horizonte de tempo relevante para o problema? O modelo inclui fatores que podem ser mudados significativamente acima do horizonte de tempo como elementos internos? • O nível de agregação é consistente com o objetivo? <p>Estrutura física e de tomada de decisão:</p> <ul style="list-style-type: none"> • O modelo está de acordo com as leis básicas da física, tais como a conservação da matéria? Todas as equações são consistentes no que se refere a suas características dimensionais? • As estruturas de estoques e fluxos são explícitas e consistentes com o objetivo do modelo? • O sistema representa desequilíbrio dinâmico ou assume-se que a todo o tempo o sistema está em equilíbrio ou próximo a esse estado? • Foram considerados atrasos, restrições e possíveis estrangulamentos apropriados? • Assume-se que as pessoas agirão racionalmente e de forma a otimizar seu desempenho? O modelo considera limitações cognitivas, realidades organizacionais, motivos não econômicos e políticos? • As decisões simuladas são tomadas com base em informações que os tomadores de decisão atualmente tomam? O modelo considera atrasos, distorções e ruído nos fluxos de informações? <p>Robustez e sensibilidade para hipóteses alternativas</p> <ul style="list-style-type: none"> • O modelo é robusto em face de variações extremas de inserção de condições ou políticas? • A proposição de políticas é sensível a variações plausíveis nas hipóteses, incluindo hipóteses sobre parâmetros, agregação e limites do modelo? <p>Pragmatismo e políticas para uso do modelo</p> <ul style="list-style-type: none"> • O modelo está documentado? Está disponível publicamente essa documentação? É possível executar o modelo do próprio computador? • Que tipos de dados foram usados para desenvolver o teste do modelo? • Como é descrito o processo para testar e construir confiança no modelo? O modelo foi analisado por terceiros e críticos? • Os resultados do modelo são reproduzíveis? Os resultados foram acrescentados ou, salvo acordo, adulterados? • Quanto custa executar o modelo? O orçamento permite testes adequados de sensibilidade? • Quanto tempo é necessário para revisar e atualizar o modelo? • O modelo está sendo operado por seus idealizadores ou terceiros? • Quais são os vieses, ideologias e cultura política do responsável pelo desenvolvimento do modelo e seus usuários? Quanto esses vieses afetam os resultados, ambos deliberadamente e inadvertidamente?

Fonte: Adaptado de Sterman (2000, p. 852)

O objetivo do modelo é simular o crescimento populacional, a geração de resíduos, discriminando o tipo gerado, ou seja, resíduos orgânicos e recicláveis

(classificando-os em papeis, metais, plásticos, vidro e outros tipos de resíduos), a quantidade enviada para aterro, compostagem e reciclagem e dos custos e receitas envolvidos no processo ao longo do tempo.

O limite do modelo é o próprio processo de coleta de resíduos, sejam recicláveis ou orgânicos, sendo que estes podem ser encaminhados para aterro sanitário ou para tratamento adequado (compostagem). O modelo foi desenvolvido de modo que não fossem necessários sistemas adicionais para gerar os dados que alimentam o modelo. Não houve exclusão de variáveis relevantes, pois todas puderam ser quantificadas e inseridas.

Serão executadas simulações num espaço de tempo de 20 (vinte) semestres, ou seja, para os próximos 10 (dez) anos. O período de tempo foi escolhido devido ao fato de a Cooperativa Acácia ter fornecido resultados mensais até junho de 2018, o que permitiu enriquecer os dados de entrada. Caso seja necessário realizar a previsão de resultados em espaços maiores, será necessário apenas atualizar alguns índices de crescimento, tais como populacional e de inflação, cujos dados foram inseridos considerando o referido prazo de 10 anos.

A separação do modelo em módulos e os elementos que os compõem são consistentes e viáveis em relação ao objetivo do modelo, tendo em vista que cada módulo está interligado com o seguinte ou, em alguns casos, com mais de um módulo. Isso apresenta uma sequência lógica na simulação dos resultados e não prejudica os resultados obtidos.

O modelo não desrespeita as leis da física, sendo que as simulações adiante são proporcionais aos resultados obtidos anteriormente. Dessa forma, a quantidade de resíduos gerados é proporcional à população e as receitas com os resíduos recicláveis são proporcionais à quantidade de resíduos comercializada. Os custos da operação, em sua maioria, não estão atrelados à quantidade de resíduo coletada. Entretanto, em caso de queda na receita, caberá à Cooperativa redefinir o quadro de pessoal, por exemplo, na operação de triagem. Além disso, caso necessário, deverá cortar custos, ou ainda, solicitar apoio da gestão municipal. De todo modo, tal situação não está prevista no modelo e não é esperado que tal situação ocorra no espaço de tempo considerado.

Todas as variáveis, incluindo estoques e fluxos, são explícitas e refletem a dinâmica da gestão de resíduos sólidos praticada atualmente no município. O modelo pode ser replicado facilmente para outra cidade, sendo

necessárias apenas algumas atualizações, se for o caso, como crescimento populacional e quantidade de resíduos gerados e coletados, bem como custos e receitas específicos da região para a qual está sendo adaptado o modelo. Os resultados obtidos são pertinentes com o objetivo do modelo.

Nas simulações realizadas, não se percebeu desequilíbrio entre as variáveis. Isso se deve ao fato de o sistema ter sido desenvolvido seguindo uma sequência lógica de operações e de terem sido respeitadas as proporções de coleta, custos e receitas.

Para esse modelo não foram considerados atrasos, restrições ou estrangulamentos, mas poderia ser inserida uma restrição no que se refere a capacidade de processamento dos resíduos coletados por parte da Cooperativa ou de uma possível usina de compostagem, além de se incluir a vida útil do aterro sanitário.

Tendo em vista que tanto os gestores da Cooperativa quanto o gestor municipal demonstraram preocupação com o desempenho das atividades de coleta seletiva, foi inserida uma variável que considera aumento na capacidade dos cooperados de processar os resíduos coletados de modo a melhorar o desempenho da Cooperativa. Além da medição do desempenho dos cooperados na triagem dos resíduos, também se inseriu uma variável que trata da melhoria da coleta seletiva no município, por meio do incentivo aos moradores para realizar a separação de seu lixo (para aqueles que ainda não o fazem) e para fazê-lo de forma adequada.

Foi incluído o encaminhamento de resíduos para compostagem. Atualmente o município não possui esse tratamento aos resíduos. Essa inclusão está relacionada com políticas de gestão pública e possui relação direta com a economia, pois menos resíduos sendo enviados para o aterro implica em mudanças de aspectos econômicos, pois menos viagens serão realizadas de Araraquara até o aterro em Guatapará. Além disso, também traz implicações ambientais e sustentáveis, ao se dar um tratamento adequado para esse resíduo.

O modelo foi desenvolvido com base na operacionalização que existe atualmente no município, bem como com as quantidades praticadas, já que foram utilizados dados do período de janeiro de 2010 a junho de 2018 e foram realizadas reuniões com representantes da Cooperativa e gestão municipal para refletir, no modelo, o que ocorre no mundo real. Foram obtidos dados quantitativos e referem-se às quantidades e valores praticados no referido período.

Nos testes realizados com o modelo não foram percebidas variações extremas que fossem fruto de distorção nos resultados. A inserção de políticas públicas de gestão de resíduos apresentou resultados coerentes que foram comparados com os resultados obtidos sem a inserção de tais políticas.

A documentação do modelo está disponível nas seções 4.2, 4.3 e no Anexo II, e será de domínio público quando da inserção da dissertação no Repositório Institucional da UFSCar.

Para replicação do modelo, basta que sejam utilizados os mesmos dados utilizados pelo autor e seja construído um modelo que respeite a sequência dos processos conforme o modelo desenvolvido.

Os custos de se executar o modelo são baixos, já que o mesmo foi desenvolvido em no Vensim PLE, um *software* gratuito e disponível para *download* por meio da *internet*. Além disso, em caso de revisão ou atualização, basta que sejam editadas as variáveis que precisam ser atualizadas e executado o modelo para que os novos resultados estejam disponíveis. O tempo gasto, tanto para revisão quanto para atualização, não é longo, pois o *software* possui uma interface intuitiva e fácil de utilizar.

O modelo foi desenvolvido com base nas informações e dados históricos passados pelos responsáveis da Cooperativa Acácia e da gestão municipal, pode-se considerar que não houve viés, ideologia ou cultura política em sua construção. Além disso, também foram considerados os modelos obtidos na literatura nacional e internacional.

Com base nas respostas obtidas às questões propostas por Sterman (2000), pode se dizer que o modelo desenvolvido atende ao objetivo inicial deste trabalho que é o de simular a gestão pública dos resíduos sólidos, em especial a coleta seletiva.

Além disso, com as simulações e resultados obtidos, foi possível verificar que o município tem muito a ganhar, tanto em se tratando de fatores ambientais e de sustentabilidade, quanto econômicos, se investir em políticas para melhorar a coleta seletiva e implantar a compostagem dos resíduos orgânicos.

4.5. TESTE PARA VERIFICAÇÃO DO MODELO QUANTO À SUA VIABILIDADE

Muitas ferramentas estão disponíveis para se analisar a capacidade de um modelo de reproduzir o comportamento do sistema. O mais comum é o uso da estatística descritiva para avaliar a relação ponto a ponto. As métricas ponto a ponto computam medidas de erro entre a série histórica de dados x_d e o resultado gerado pelo modelo x_m em cada ponto, para cada dado; depois, faz-se a média para um espaço de tempo relevante (Sterman, 2000).

Além disso, o autor sugere que, para se avaliar se o modelo gera padrões de comportamento tais como aqueles observados no sistema real, sejam feitas comparações qualitativas das saídas do modelo com os dados reais da série histórica, comparando comportamento, formato das curvas das variáveis e assimetrias.

Alguns métodos utilizados para esse fim são o erro absoluto médio (EAM), o erro percentual absoluto médio (EPAM), o erro absoluto médio como uma porcentagem da média (EAM/média), e o erro médio quadrático (EMQ). Uma variação deste último é a aplicação da raiz quadrada ao resultado obtido (REMQ).

Todos esses métodos calculam o erro médio entre o valor simulado e o valor real (série histórica). O EAM pesa todos os erros linearmente; o REMQ pesa os erros maiores com mais força do que os erros menores. Ambos medem o erro na mesma unidade da variável exposta ao teste. O EPAM não pode ser usado se a série histórica possuir valores muito próximos de zero. Em tais casos, o EAM/média gera resultados mais robustos dimensionalmente.

Dentre as métricas mencionadas cabe a decisão de qual se utilizar. O EMQ e o REMQ penalizam mais os erros maiores do que os menores. Geralmente não há base suficiente para se preferir REMQ ao invés de EAM. EPAM e EAM/média proporcionam medidas adimensionais para o erro, o que pode ser de fácil interpretação. É importante salientar que os erros podem ser causados devido a um modelo fraco ou a uma grande quantidade de ruídos nos dados.

Por fim, outro método utilizado é a decomposição do erro EMQ em três componentes: tendência, desigualdade de variação e desigualdade de covariação (STERMAN, 2000; QUDRAT-ULLAH, SEONG, 2009; LEMKE, ŁATUSZYŃSKA, 2013), que é chamado de Estatística de Desigualdade de Theil (EDT).

A tendência surge quando os dados de saída e da série possuem diferentes médias. A desigualdade de variação indica que a variância das duas séries diverge. Já a desigualdade de covariação significa que a saída do modelo e dos dados não são perfeitamente correlatos, ou seja, eles divergem ponto a ponto (STERMAN, 2000).

Para o cálculo de EDT é necessário calcular o coeficiente de correlação (r), o EQM, o desvio padrão (σ) e a média dos dados históricos e das saídas do modelo. As equações para cálculo são apresentadas a seguir.

- Média dos dados (\bar{x}):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x \quad (25)$$

em que, n é o número de dados; e x são os dados, ponto a ponto.

- Desvio padrão (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^2} \quad (26)$$

em que, n é o número de dados; x são os dados, ponto a ponto; e \bar{x} é a média dos dados.

- Coeficiente de correlação (r):

$$r = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{x_d - \bar{x}_d}{\sigma_d} \right) \left(\frac{x_m - \bar{x}_m}{\sigma_m} \right) \quad (27)$$

em que, n é o número de dados; x são os dados, ponto a ponto; e \bar{x}_d e \bar{x}_m são, respectivamente, a média dos dados históricos e dos resultados de saída do modelo; σ_d e σ_m são, respectivamente, o desvio padrão dos dados históricos e dos resultados de saída do modelo.

- Erro Quadrático Médio (EQM):

$$EQM = \frac{1}{n} \sum (x_m - x_d)^2 \quad (28)$$

em que, n é o número de dados; x_d e x_m são, respectivamente, o valor ponto a ponto dos dados históricos e dos resultados de saída do modelo.

Realizando-se os cálculos apresentados, é possível decompor o EQM nos três componentes de Theil:

- Tendência (U^M):

$$U^M = \frac{(x_m - x_d)^2}{EQM} \quad (29)$$

- Desigualdade de variância (U^S):

$$U^S = \frac{(\sigma_m - \sigma_d)^2}{EQM} \quad (30)$$

- Desigualdade de covariância (U^C):

$$U^C = \frac{2(1-r)\sigma_m\sigma_d}{EQM} \quad (31)$$

Além disso,

$$U^M + U^S + U^C = 1. \quad (32)$$

Cada um dos componentes revela um comportamento do modelo:

- Um grande valor para U^M indica um erro sistemático provocado por erro na estimativa dos parâmetros;
- Um valor alto para U^S pode indicar um erro sistemático. Quando isso ocorre, o modelo e os dados reais possuem valores aproximados de médias e são altamente correlatos, mas a variância entre eles difere;

- Por fim, um valor alto para U^C indica presença de ruído ou ciclos na série de dados não capturada pelo modelo. Geralmente é um erro não sistemático, exceto se o propósito do modelo é identificar esses ciclos.

O critério para decidir quando um erro deve ser considerado grande ou sistemático, depende do propósito do modelo. Se os erros surgem de tal modo que o comportamento seja respeitado, não comprometendo o fim para o qual o modelo se propõe, então os referidos erros não comprometem a utilização do modelo (STERMAN, 2000).

Com os resultados dos três componentes, é possível analisar o modelo quanto ao seu comportamento e verificar se ele está reproduzindo os resultados com algum erro e, em caso positivo, proceder com a correção caso seja necessário.

Para o modelo desenvolvido foi realizado o cálculo dos erros em seis variáveis, escolhidas aleatoriamente pelo autor dentre todas aquelas existentes no modelo. As variáveis referem-se à coleta seletiva, à quantidade de alguns resíduos reciclados e à receita obtida com a venda dos recicláveis. A Tabela 7 apresenta os resultados.

Tabela 7 - Estatística de Desigualdade de Theil das variáveis analisadas

Variável	U^M	U^S	U^C	U
Coleta Seletiva	0,004	0,801	0,202	1,007
Papel reciclado	0,020	0,609	0,368	0,997
PET reciclado	0,136	0,517	0,351	1,004
PP e PS reciclado	0,007	0,925	0,069	1,001
PEAD reciclado	0,018	0,636	0,356	1,01
Receita com recicláveis	0,109	0,698	0,204	1,011

Fonte: Elaborado pelo autor

Como se vê, o valor de U está muito próximo de 1. As diferenças podem ser justificadas por prováveis arredondamentos realizados durante os cálculos.

Analisando os resultados obtidos para essas variáveis, percebe-se que para a variável “PP e PS reciclado”, os componentes de Theil se aproximam do

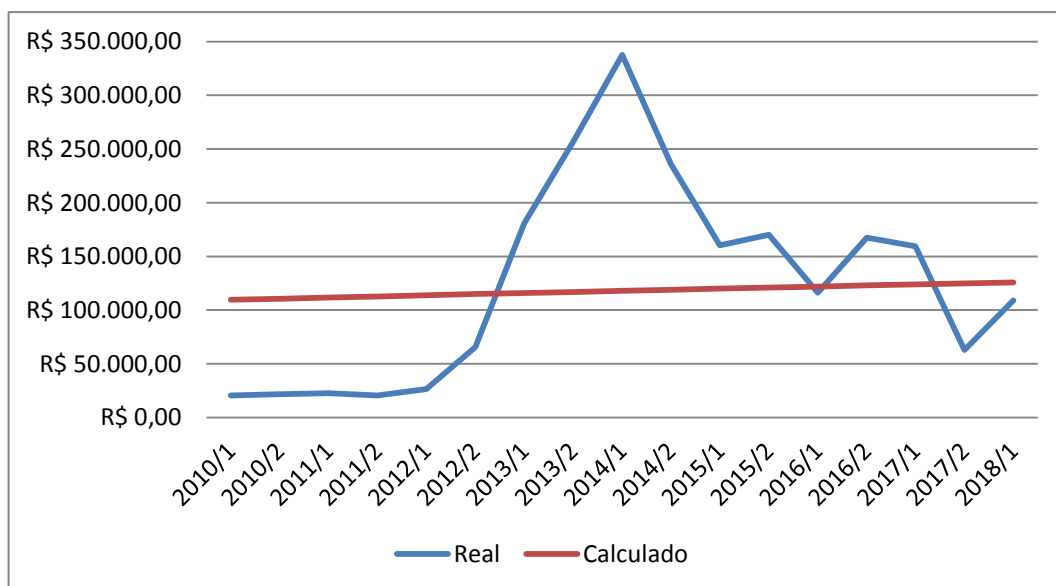
padrão (0,1,0), ou seja, os resultados possuem um erro de variação. De acordo com Sterman (2000), esse tipo de erro ocorre, pois o valor utilizado para a simulação da variável corresponde ao valor médio dos dados reais.

Além disso, um U^s alto indica que as variâncias dos dados da série histórica e dos dados de saída do modelo são diferentes. Isso se justifica, pois para determinar a quantidade de resíduo gerado, por exemplo, foram utilizados os valores médios, calculados com base na série histórica. Assim, as quantidades de cada tipo de resíduo dadas como saída pelo modelo praticamente não possuem variância, são valores médios, conforme se pode ver nos gráficos 3 a 8, a seguir.

Por outro lado, observa-se que o uso dessas médias como estimativa é razoável, pois não induz um erro sistemático alto, uma vez que o componente U_m é relativamente próximo de zero.

O Gráfico 3 representa os valores reais e calculados referentes à variável “PP e PS reciclado”. No eixo horizontal deste gráfico e dos demais que seguirão, o termo “2010/1” representa o primeiro semestre de 2010 e assim sucessivamente.

Gráfico 3 - Valores reais e simulados da variável PP e PS reciclado



Fonte: Elaborado pelo autor

Sterman (2000) complementa que se o propósito do modelo é analisar o comportamento em longo prazo, não considerando os movimentos individuais e periódicos, então o erro é não sistemático, ou seja, o erro não é prejudicial para

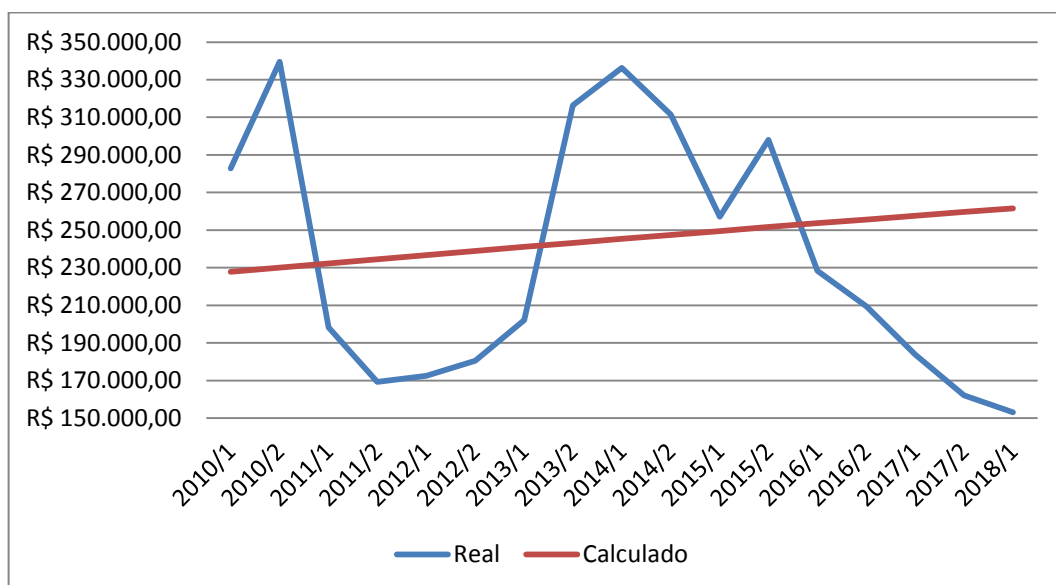
validar o resultado obtido. Sendo assim, como já dito acima, não é o objetivo do modelo estudar as variações provocadas pelas flutuações, portanto, pode-se desconsiderar o erro apresentado.

Para as demais variáveis, considerando que o índice U^M está próximo de zero e que U^S e U^C compõem o EQM quase em sua totalidade, Sterman (2000) caracteriza esse erro no padrão $(0, a, 1 - a)$, o que significa que o modelo retorna os dados reais, exceto por um erro (e_t) com média zero. Também significa que tanto os dados históricos quanto os do modelo compartilham da mesma média e tendência, apresentando apenas alguma divergência ponto a ponto. É considerado um erro não sistemático se o objetivo do modelo não for analisar os ciclos dos dados.

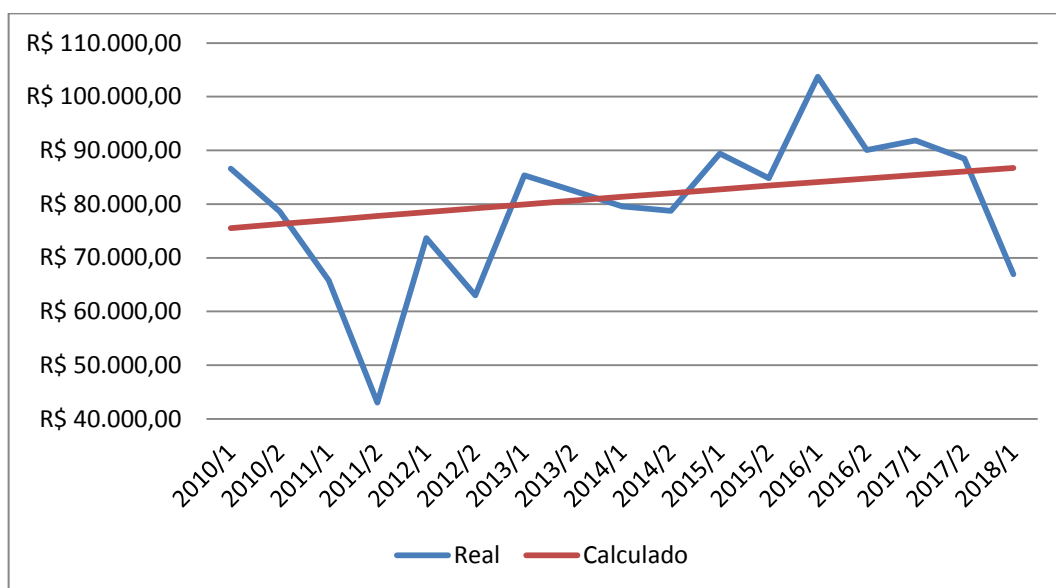
Com base nessa análise, pode se considerar que os erros não são sistemáticos e, portanto, o modelo desenvolvido é viável para o fim a que se propõe, em outras palavras, salvo divergências dos próprios autores ao se referirem ao termo, o modelo é válido.

Os gráficos 4 a 8 representam os valores simulados e reais das demais variáveis. Percebe-se que o gráfico dos valores reais está em torno da reta simulada, que é feita pela média dos dados no período, e também que se mantém a tendência da reta.

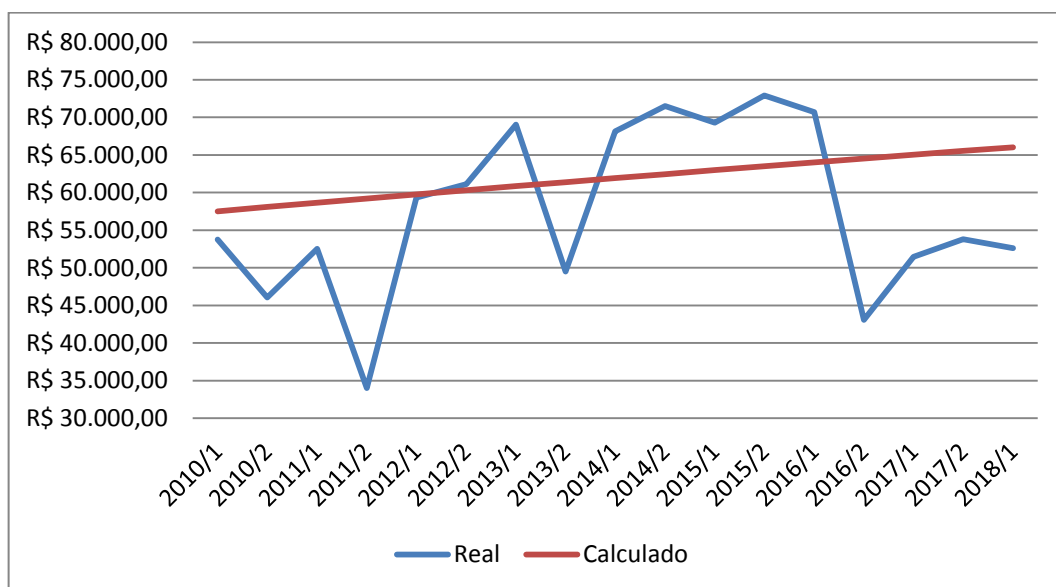
Gráfico 4 - Valores reais e simulados da variável papel reciclado



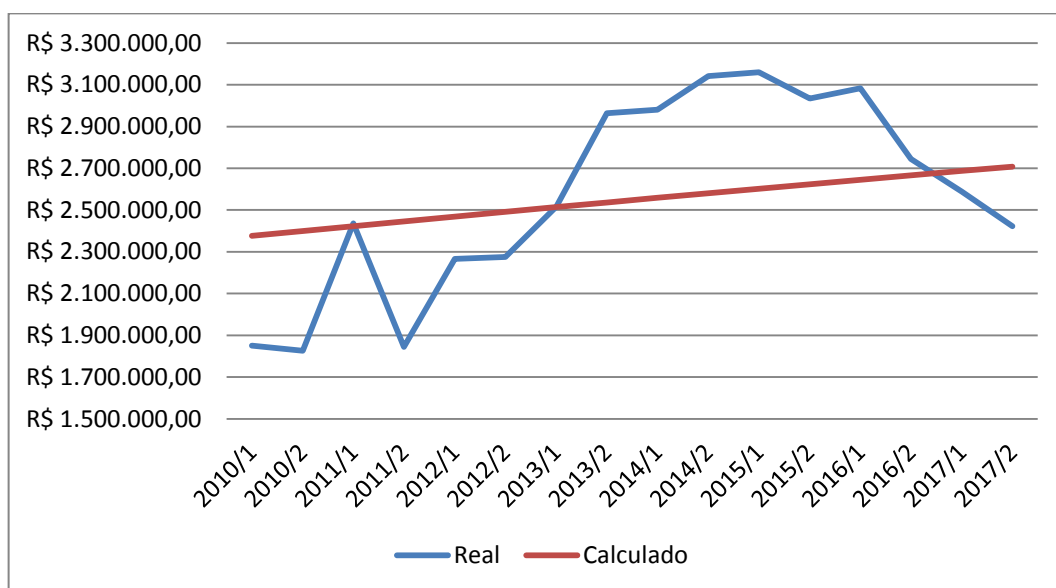
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 5 - Valores reais e simulados da variável PEAD reciclado

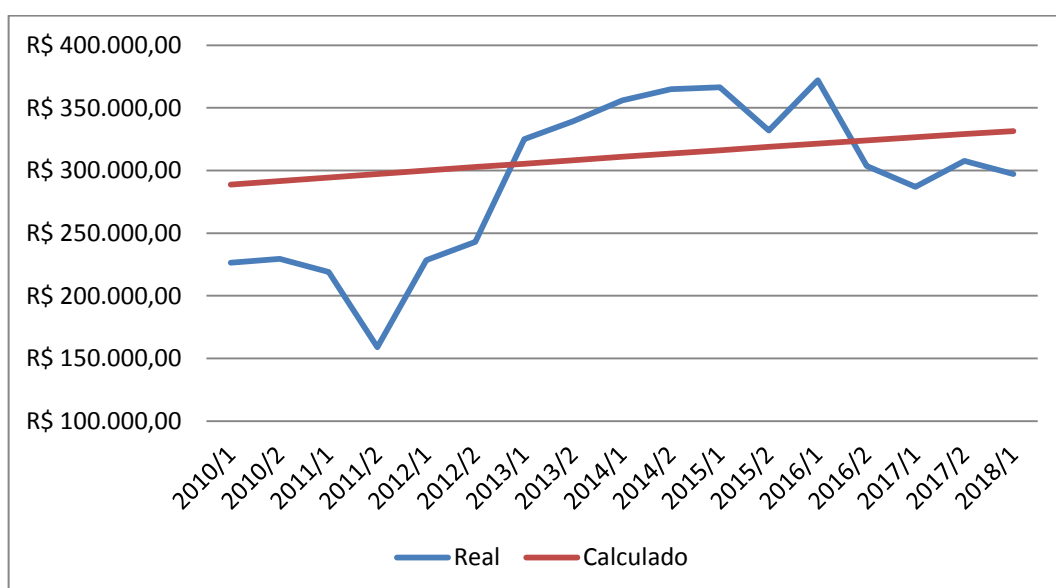
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6 - Valores reais e simulados da variável PET reciclado

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 7 - Valores reais e simulados da variável Coleta Seletiva

Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 - Valores reais e simulados da variável receita com recicláveis

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos gráficos é possível assumir que, apesar das flutuações, causadas por uma variação natural, os dados simulados e reais de cada variável possuem mesma média e tendência, diferindo ponto a ponto, e o desvio existente entre eles é um erro não sistemático.

Algumas das variações encontradas em determinados resíduos podem ser justificadas com base no consumo da população, que não é contínuo e

constante, podendo variar dependendo de certas épocas do ano, tais como festas (carnaval e natal, por exemplo), eventos esportivos (campeonatos, Copa do Mundo etc.) e férias (meses de janeiro e julho, por exemplo). Além disso, como a receita se refere ao resíduo efetivamente comercializado, determinados tipos são acumulados para posterior venda, o que pode afetar certos picos em determinadas épocas. Como exemplo, tem-se que o isopor é comercializado quando se obtém por volta de 2 toneladas de resíduo, pois, caso contrário, gera prejuízo para a empresa compradora. Outro fator que afeta as curvas históricas é que alguns resíduos específicos só são comercializados quando a Cooperativa consegue um comprador, como certa embalagem de leite, cuja comercialização não é constante devido à dificuldade em sua reciclagem.

As variáveis referentes às despesas da Cooperativa não foram analisadas nessa etapa, pois com base nas informações passadas pelos seus responsáveis e nos dados obtidos, não seria possível reproduzir com precisão o número de cooperados, para calcular o rateio, já que seu organograma mudou de 2010 até o momento, o que influencia diretamente em suas despesas.

5. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o desenvolvimento do modelo e verificação quanto à sua utilidade, foi possível simular alguns resultados para os próximos dez anos (20 semestres).

Para isso foram elaborados 6 cenários, cada um com características específicas, com o intuito de se aproximar das informações obtidas no PMGIRS, tais como percentuais de crescimento da coleta e implementação da compostagem, quanto os anseios percebidos pelos gestores da Cooperativa e o da autarquia. Nesse último caso, foi pensado no aumento da eficiência das atividades desenvolvidas por aquela, como maneira de aumentar a produtividade, diminuir a quantidade separada indevidamente e conseqüentemente encaminhada ao aterro e atendimento da demanda crescente no que se refere a coleta seletiva.

No que se refere aos percentuais de crescimento da coleta e de implantação da compostagem, dadas as especificidades existentes no município e tendo em vista os investimentos necessários, foram utilizados valores menores do que os previstos no PMGIRS, como forma de auxiliar na visualização do impacto causado e os resultados obtidos com a proposta de pequenas mudanças no cenário. Além disso, as propostas feitas nos cenários estão próximas da realidade do município e possíveis de serem implementadas, dependendo da disposição orçamentária e planejamento.

O primeiro cenário utilizado é aquele em que nenhuma mudança é realizada no sistema, ou seja, nenhuma melhoria é aplicada. Tal cenário servirá de base para se realizar a comparação dos resultados obtidos nos demais cenários.

As propostas realizadas a seguir alcançam seu ápice em 5 anos, pois é entendido que mudanças como essas precisam de tempo para serem implementadas e, em se tratando de políticas públicas, é necessário ter cautela nas finanças para não prejudicar outros serviços.

Os demais cenários apresentam propostas de melhoria do sistema de modo a auxiliar os gestores municipais e da Cooperativa na tomada de decisão. Em consonância com o estabelecido pelo PNRS (BRASIL, 2010), propõe-se que sejam elaboradas políticas e práticas para aumento da coleta seletiva. Para esse fim, é necessária a educação da população quanto à separação adequada dos resíduos,

buscando, também, reduzir a quantidade de rejeitos que são enviados para a Cooperativa, dificultando o trabalho dos responsáveis pela triagem e separação.

Além da separação dos resíduos, propõe-se a implantação da compostagem dos resíduos orgânicos num percentual de 10% até 2023. Essa prática ainda não é presente no município e contribuiria com a redução dos resíduos enviados para aterro sanitário. Essa atividade poderia contribuir de várias formas, tanto economicamente quanto sustentavelmente, pois o material poderia ser utilizado pelos agricultores locais e reduzir os gastos com adubos e fertilizantes. Além disso, o município teria redução na despesa com o envio do resíduo para o aterro sanitário em Guataparã-SP, pois diminuiria o número de viagens para aquele município.

O PMGIRS propõe que o município reduza, em 2031, 55% dos resíduos compostáveis. Para 2015 a meta era reduzir, no mínimo, 25% (ARARAQUARA, 2013). Entretanto, até o momento não existe a prática. Sendo assim, nesta simulação é proposto que se inicie com uma meta de 10% e, após a implantação, que se proceda com o aumento desse percentual.

Outra proposta de cenário é aquele em que é realizada a capacitação dos cooperados, de modo a possibilitar aumento da eficiência e melhoria das condições de trabalho, principalmente em relação àqueles responsáveis pela triagem e separação dos resíduos, no intuito de aumentar a quantidade processada no período. Percebe-se que há uma relação dessa proposta com a primeira (educação da população com posterior aumento na quantidade disponibilizada para coleta seletiva), pois uma menor quantidade de rejeitos permitiria que os cooperados se dedicassem de maneira mais ativa à operação que realizam, contribuindo para o alcance das metas.

Cada um desses cenários foi simulado individualmente e, por fim, simulou-se um último cenário com todas as propostas concomitantemente. As características de cada cenário são:

- Cenário 1 - Nenhuma mudança no sistema, ou seja, manter as taxas de coleta e de trabalho tais como atualmente;
- Cenário 2 - A partir do cenário atual, aumentar a coleta seletiva em 10% até o 2º ano (4º semestre) e chegar em 15% até o 5º ano (10º semestre), com novos investimentos de educação da população a partir do 7º semestre;

- Cenário 3 - A partir do cenário atual, incluir a prática da compostagem em 10% até o 5º ano (10º semestre) de simulação;
- Cenário 4 - Mantendo as demais variáveis sem alteração, aumentar, em 40%, a capacidade dos cooperados na atividade de triagem e separação dos resíduos;
- Cenário 5 - A partir do cenário atual, em um prazo de 10 semestres, aumentar a coleta seletiva em 15% e a capacidade dos cooperados na atividade de triagem e separação dos resíduos em 40% - cenários 2 e 4 concomitantemente;
- Cenário 6 - A partir do cenário atual aplicar todas as mudanças propostas nos cenários 1 a 3, no mesmo prazo de 10 semestres.

O Quadro 17 apresenta resumidamente as propostas de cenários simulados com o modelo.

Quadro 17 - Cenários simulados com o modelo

Descrição do cenário	Cenário					
	1	2	3	4	5	6
Nenhuma mudança no sistema	X					
Aumento da coleta para 15%		X			X	X
Inclusão da Compostagem numa proporção de 10% da quantidade gerada pela população			X			X
Aumento da capacidade de separação em 40%				X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

Para aumento da coleta seletiva, sugere-se a panfletagem, que pode ser realizada pelo DAAE, em conjunto com a entrega da conta de água, nas residências e estabelecimentos. Além disso, divulgação nas rádios e emissoras de TV locais com o objetivo de estimular a separação adequada dos resíduos pela população. Para o município de Araraquara, 50 mil panfletos seriam suficientes para cobrir toda a área. Nesse caso, o investimento seria em torno de R\$3.000,00 em cada um dos momentos (2º e 7º semestres), totalizando R\$6.000,00.

Para inclusão da compostagem não é possível apresentar um valor para investimento, visto que é necessário que o município estude a viabilidade do local onde seria instalada a Usina e todos os demais procedimentos envolvidos (coleta, tratamento, destinação final ou comercialização). Atualmente existem empresas que realizam esse trabalho, da mesma forma que a Cooperativa realiza a coleta dos resíduos sólidos. Garré et al. (2017) apresentam a análise econômica para implantação de uma usina de compostagem no município de Pelotas-RS, um município com características semelhantes aos de Araraquara, mas com população 50% maior. Segundo os autores, o investimento inicial ficaria em torno de R\$7 milhões.

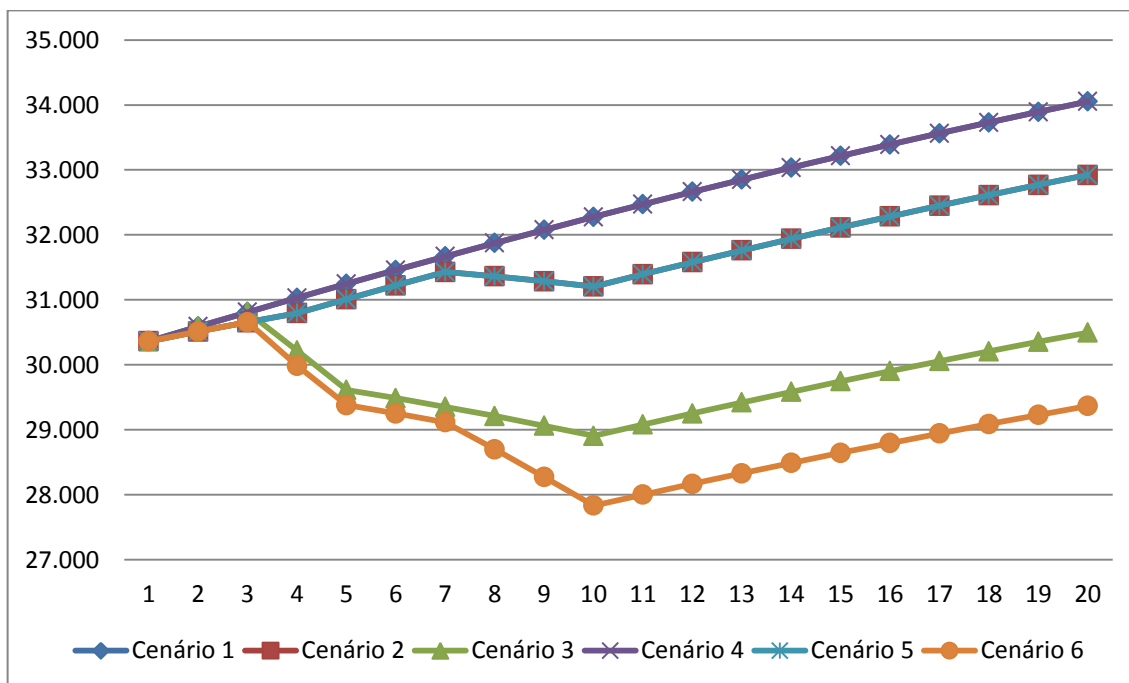
Por fim, para capacitação dos cooperados, sugerem-se cursos e treinamento realizados por especialistas e também oficinas com as cooperadas de maior experiência de modo a compartilharem entre si suas experiências e melhorarem o processo de triagem e separação dos resíduos. Para esse fim, acredita-se que um investimento de R\$5.000,00 a ser realizado no 4º semestre seria suficiente para oferecer tal capacitação e aumentar a capacidade da Cooperativa em realizar a triagem e separação dos resíduos de forma eficiente e eficaz.

A partir das propostas de cenários é possível fazer algumas análises quanto à efetividade das mudanças do sistema.

1. Envio de resíduos para o aterro sanitário

O Gráfico 1Gráfico 9 apresenta o resultado obtido com as simulações referentes à quantidade de resíduo encaminhado para aterro sanitário em cada um dos cenários. Percebe-se que os cenários 2 e 5 são coincidentes, pois ambos tratam do aumento da coleta para 15% e os cenários 1 e 4 são coincidentes, pois ambos não tratam de mudança nas práticas de coleta seletiva ou compostagem.

Gráfico 9 - Comparação das quantidades de resíduos enviadas para aterro



Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença da quantidade total de resíduos encaminhada para o aterro no período de 20 semestres, do cenário 1 para o 6, é de 65.118 toneladas, o que representa uma redução de 10,08% na quantidade total encaminhada para esse destino inadequado em 10 anos. Já se for considerada a quantidade no último semestre, percebe-se uma redução de 4.685 toneladas, o que representa uma redução de 13,75% da quantidade encaminhada para o aterro sanitário.

Ao se considerar a participação de cada uma das novas práticas nos cenários 2 (aumento da coleta) e 3 (inclusão da compostagem), ocorre uma redução no período analisado de 2,25% e 7,82% respectivamente. Com isso, percebe-se que a inclusão da compostagem tem um impacto maior na quantidade destinada incorretamente para o aterro, conforme esperado. Em termos de benefícios ao meio ambiente, dever-se-ia certamente iniciar a implantação, mas sabe-se que tal implantação, infelizmente, esbarra em obstáculos financeiros.

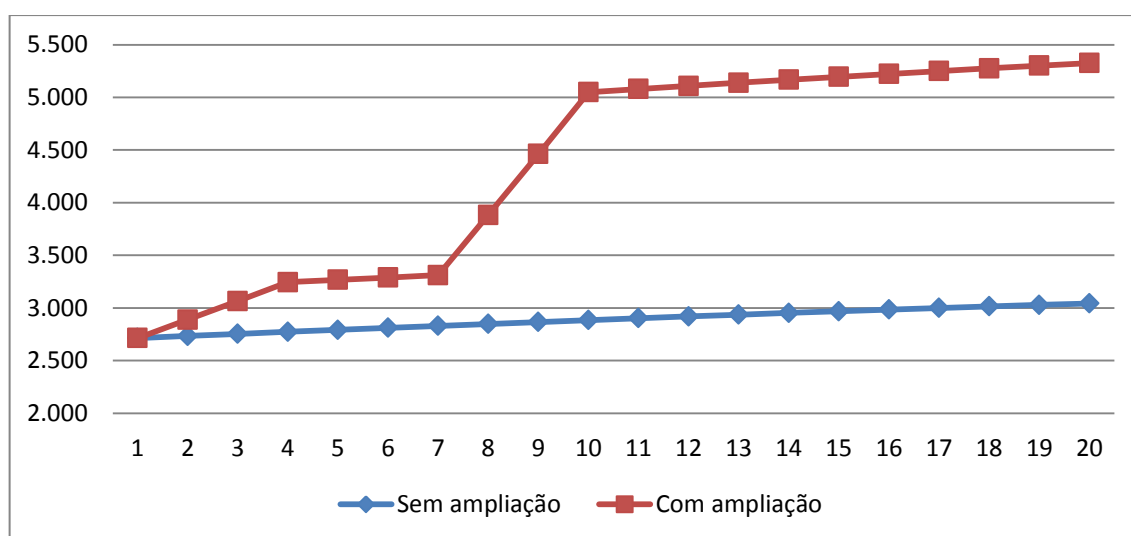
2. Quantidade de resíduos recebidos pela Coleta Seletiva

O Gráfico 10 apresenta o resultado obtido com as simulações referentes à quantidade de resíduo recolhido pela Coleta Seletiva. Nele é

apresentado o cenário sem a ampliação da Coleta para 15% até o 5º ano e aquele com o novo percentual.

A proposta seria implantada da seguinte maneira: o primeiro objetivo da proposta de aumento da coleta seletiva é saltar dos atuais 8,56% ao período para 10% até o 4º semestre (2º ano), seguido de uma estabilização até o 7º semestre e novo crescimento, quando alcançaria o segundo objetivo, o de 15% no 10º semestre (5º ano) e manteria esforços para, pelo menos, manter a meta.

Gráfico 10 - Comparação da quantidade advinda da Coleta Seletiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a ampliação da coleta seletiva, tem-se que, no 20º semestre, há um aumento na quantidade de resíduos coletados da ordem de 2.300 toneladas, aproximadamente. No período de 20 semestres, a diferença acumulada chega a quase 30 mil toneladas de resíduo recolhido, um aumento de 51% entre os cenários.

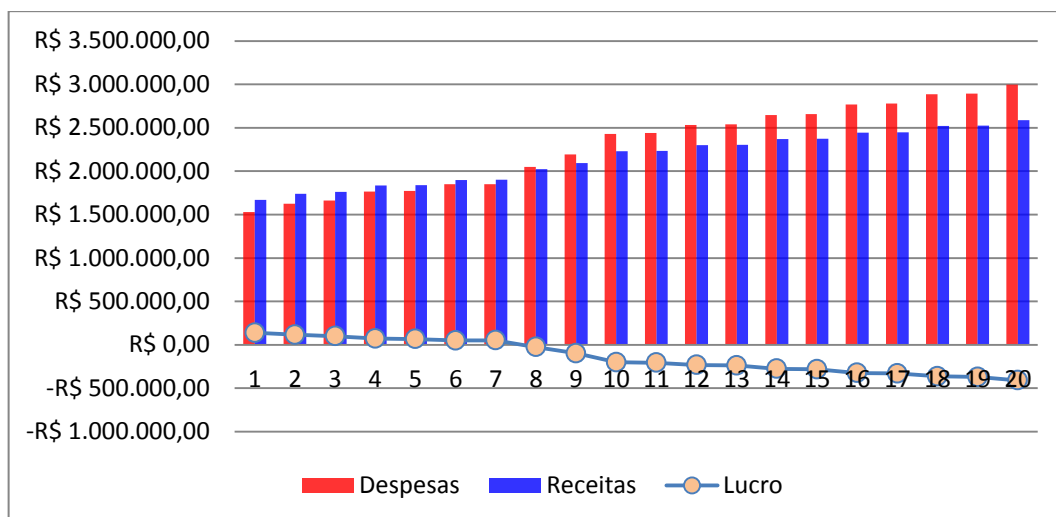
Entretanto, considerando esse aumento, são necessários investimentos para lidar com essa quantidade de resíduo. Dessa forma, o DAAE ou a Cooperativa precisarão adquirir novos caminhões para tratar da demanda. Como será visto no item referente aos lucros, apenas o aumento do estímulo de separação do resíduo para coleta não será suficiente para que a Cooperativa obtenha receita suficiente para cobrir seus gastos. Por isso, a menos que o DAAE reveja seu contrato de caminhões ou a Cooperativa consiga melhorar ainda mais sua força de trabalho, o atendimento da demanda não será possível.

Atualmente o contrato de caminhões cedidos para a Cooperativa pelo DAAE custa R\$70.000,00 ao mês à autarquia, uma média de R\$14.000,00 por

caminhão. A partir dos resultados simulados, percebe-se que a partir do 4º ano seria necessário incluir mais um caminhão para auxiliar as cooperadas na coleta dos resíduos porta a porta, ou seja, seriam necessários 6 caminhões para auxiliar nas atividades. Além disso, no 6º ano, quando se consolidasse em 15% a quantidade de resíduos disponíveis para coleta seletiva, prevê-se a necessidade da inclusão de outro caminhão.

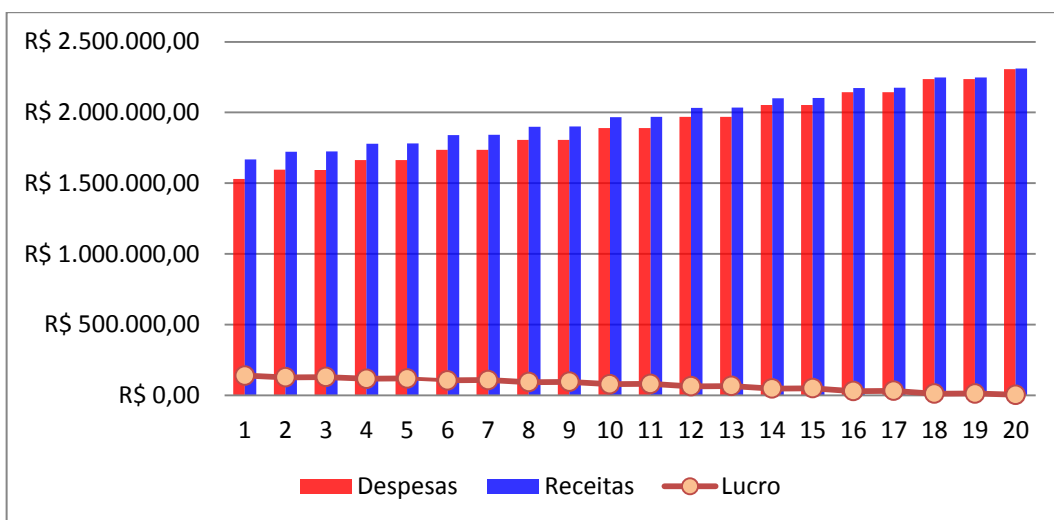
Os Gráficos 11 e 12 apresentam as receitas e despesas e o lucro da Cooperativa em cada um dos cenários, sendo um representando a ampliação da Coleta Seletiva e o outro sem a referida ampliação. Para as despesas não estão sendo considerados os valores referentes aos investimentos para melhoria do processo e educação da população, pois tanto a Cooperativa quanto o DAAE deverão definir quem ficará responsável por essa atividade e, conseqüentemente, seu custo. Também não estão sendo consideradas despesas referentes à cessão de caminhões, que porventura sejam necessários, para auxílio no transporte dos resíduos.

Gráfico 11 - Resultados financeiros com ampliação da Coleta Seletiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 12 - Resultados financeiros sem ampliação da Coleta Seletiva



Fonte: Elaborado pelo autor

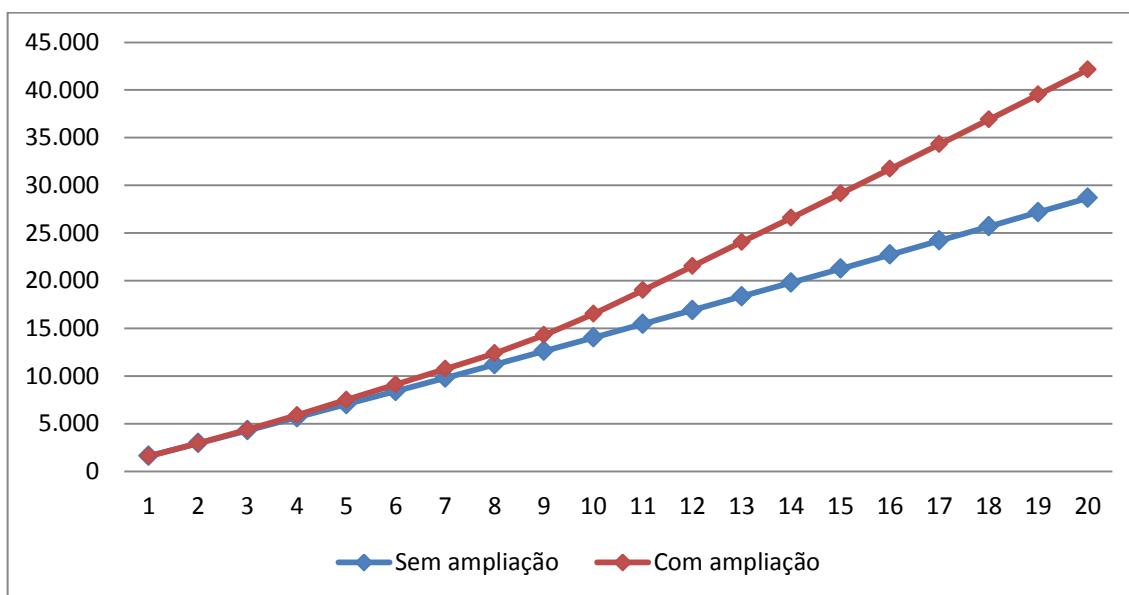
O motivo do aumento significativo das despesas é que, com o aumento de resíduo recolhido, a Cooperativa passa a necessitar de mais mão de obra para realizar suas atividades, o que aumenta as despesas com pessoal, chegando a ser necessário dobrar o número de cooperados somente na atividade de separação e triagem, incluindo, talvez, um segundo turno de trabalho. Entretanto, como a receita obtida não acompanha a despesa na mesma proporção, a Cooperativa passaria a registrar prejuízo. Por esse motivo, há necessidade da Cooperativa avaliar seus processos e verificar a possibilidade de aumentar a eficiência das atividades.

Assim exposto, considerando que a Cooperativa não tem fins lucrativos e é responsável pela realização do trabalho de coleta, triagem e comercialização dos resíduos recicláveis e também que a responsabilidade para cumprir o PMGIRS é do município, sugere-se que seja realizada a revisão do contrato administrativo de caminhões, não onerando ainda mais a Cooperativa, cuja receita com recicláveis é baixa.

3. Quantidade de resíduos reciclados

O Gráfico 13 apresenta os resultados obtidos com as simulações referentes à quantidade de resíduos reciclados. Nele é apresentado o cenário sem a ampliação da Coleta para 15% até o 5º ano e aquele com o novo percentual.

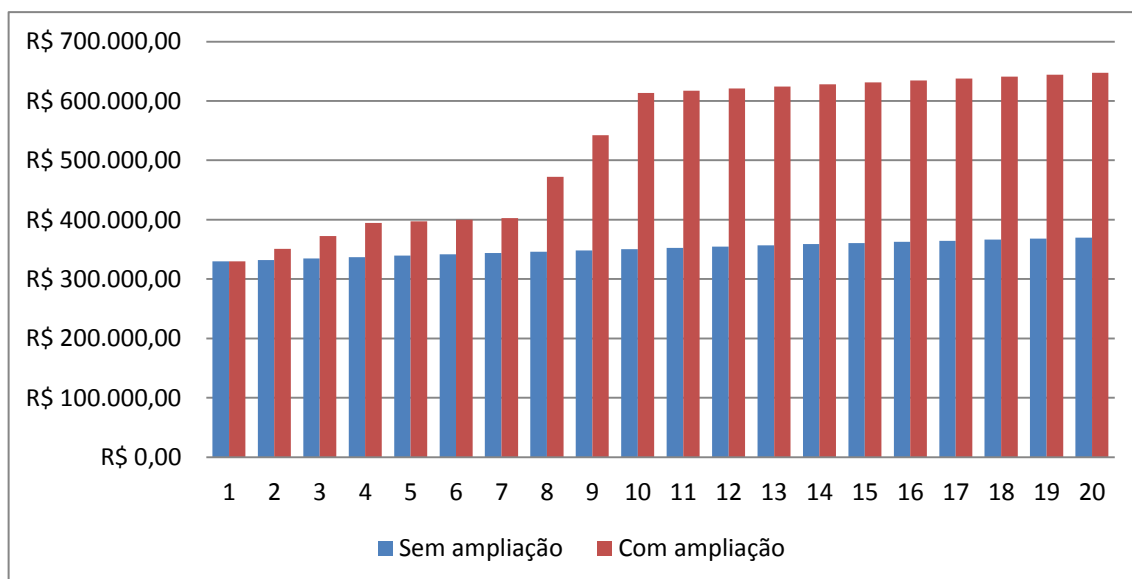
Gráfico 13 - Comparação de resíduos reciclados



Fonte: Elaborado pelo autor

A diferença da quantidade de resíduos reciclados no cenário com ampliação da Coleta Seletiva, em relação ao cenário sem a ampliação, é de 14.585 toneladas no período, um aumento de aproximadamente 51,04%, que reflete diretamente na receita da Cooperativa com resíduos recicláveis. O Gráfico 14 apresenta a receita obtida com a comercialização dos recicláveis considerando os dois cenários.

Gráfico 14 - Receitas obtidas com recicláveis

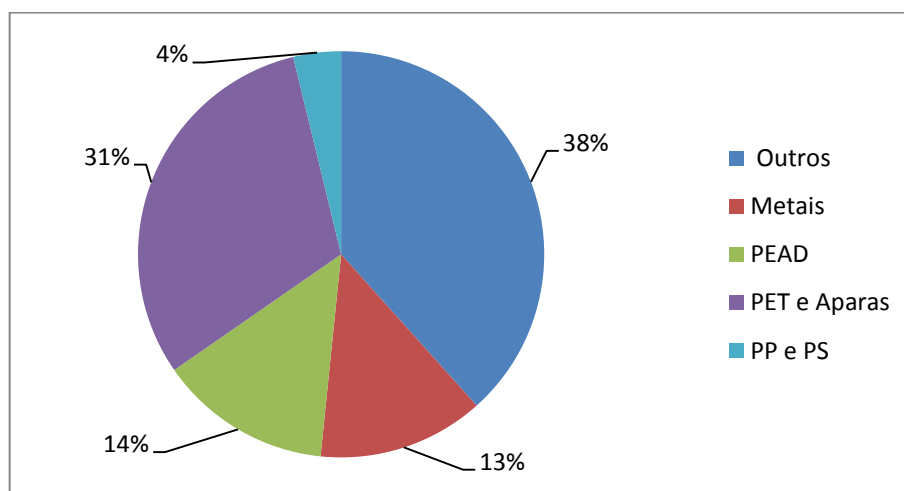


Fonte: Elaborado pelo autor

A participação de cada grupo de resíduos na matriz orçamentária referente ao comércio de recicláveis é diferente, sendo que a maior receita é proveniente dos grupos de outros tipos de resíduos (38% de participação), seguido pelo grupo de embalagens PET e aparas de papel (31% de participação). Já o grupo de PP e PS contribuem com apenas 4% na matriz orçamentária referente à comercialização de resíduos.

O Gráfico 15 apresenta a participação de cada grupo de recicláveis na receita total com a comercialização.

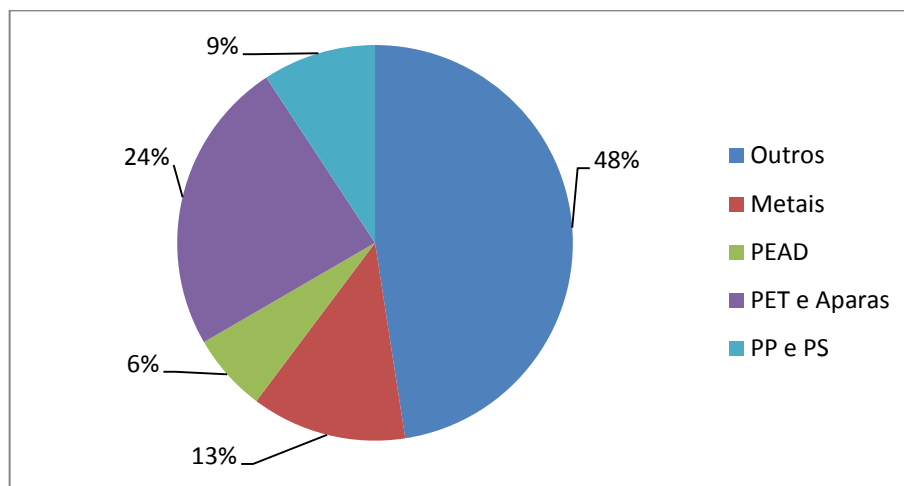
Gráfico 15 - Participação dos grupos na receita de recicláveis



Fonte: Elaborado pelo autor

Já o Gráfico 16 apresenta a participação de cada grupo de resíduos no total reciclado.

Gráfico 16 - Participação dos grupos na quantidade de resíduos recicláveis



Fonte: Elaborado pelo autor

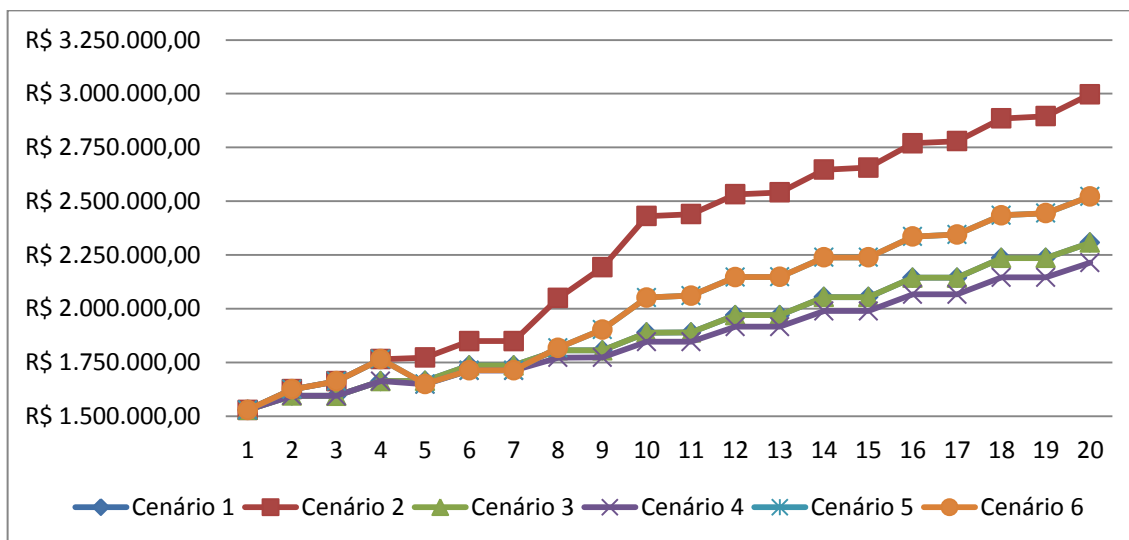
Conclui-se que o grupo de “outros resíduos” que tem maior presença na quantidade reciclada (48%) também é aquele que proporciona maior renda (38%), embora a proporção em quantidade seja maior do que a proporção em receita. Por outro lado, o grupo de PEAD que tem a menor presença na quantidade reciclada (6%), é o que proporciona a maior receita por unidade, respondendo por 14% das receitas totais.

4. Despesas da Cooperativa

O Gráfico 17 apresenta os resultados referentes a todos os cenários com relação às despesas da Cooperativa. Essa variável compreende a soma das despesas com pessoal (cooperados e funcionário) e despesas administrativas e de manutenção.

São coincidentes os cenários 1 (nenhuma alteração) e 3 (inclusão da compostagem), pois neles não houve mudança nos parâmetros da coleta seletiva; Também são coincidentes os cenários 5 e 6, pois a diferença de um para o outro é a inclusão da compostagem no cenário 6, o que não afeta as despesas da Cooperativa, uma vez que não foram colocados o investimento necessário para se implantar a compostagem nem os gastos operacionais.

Gráfico 17- Comparativo das despesas



Fonte: Elaborado pelo autor

Os degraus existentes a cada 2 períodos devem-se à atualização das despesas pelo IPCA (salários, taxas, tributos etc), cuja atualização é feita anualmente.

Com o aumento da coleta seletiva para 15% (cenário 2), a despesa aumentaria consideravelmente (34% no 20º período) em relação ao cenário 1, devido, principalmente, ao aumento de gastos com pessoal. Entretanto, a receita total da Cooperativa (comercialização de recicláveis e subsídios do município) não acompanharia essa evolução e, a menos que a Cooperativa aumente sua eficiência, passariam a registrar prejuízo. Caso seja realizada essa melhoria na produção (cenários 5 e 6), o aumento na despesa seria de apenas 13,28% no último período analisado.

Entretanto, caso seja realizada apenas a capacitação do pessoal e a coleta se mantenha no mesmo percentual (8,56% da quantidade de resíduos gerada - cenário 4), a redução de despesas seria de 4,03%. Isso se justifica porque, ao mesmo tempo em que haveria um aumento na quantidade coletada, por razões naturais (como aumento da população e consequente crescimento do município), também se melhoraria a força de trabalho e haveria uma compensação.

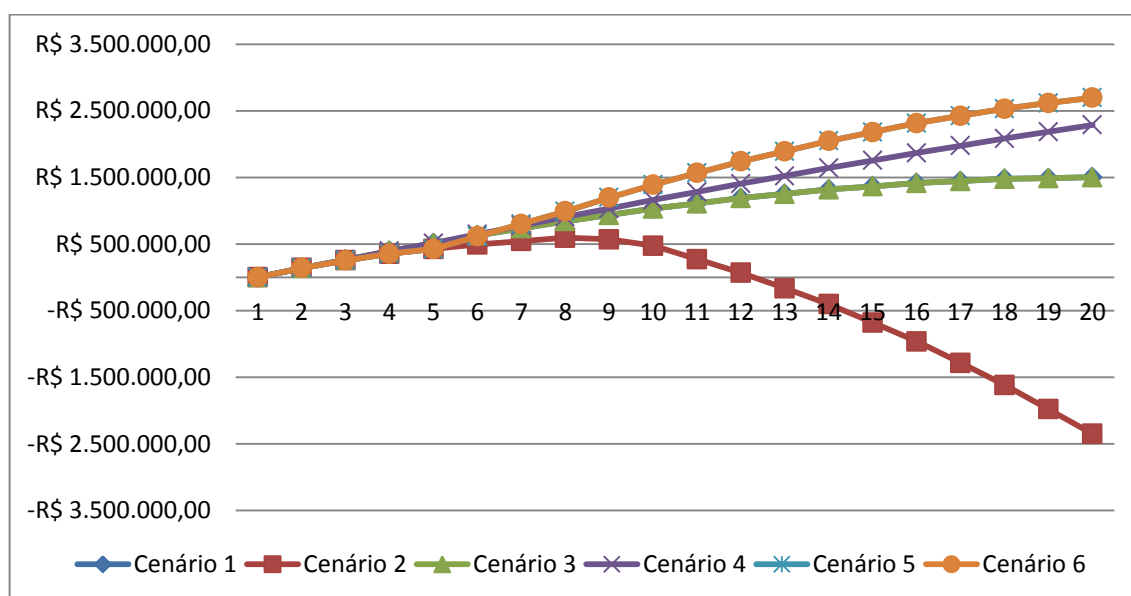
O Gráfico 18 representa o resultado obtido referente aos lucros (ou prejuízos) no período simulado.

São coincidentes os cenários 1 (nenhuma alteração) e 3 (inclusão da compostagem), pois neles não houve mudança nos parâmetros da coleta seletiva;

Também são coincidentes os cenários 5 e 6, pois a diferença de um para o outro é a inclusão da compostagem no cenário 6, o que não afeta a receita da Cooperativa (uma vez que não está sendo considerado o acréscimo de receita que viria da compostagem).

Como já mencionado, a partir do 13º semestre o cenário 2 apresenta prejuízo caso se aumente apenas a quantidade de resíduos coletados, sem que sejam melhorados os processos de triagem e separação, pois para atender a demanda será necessário aumentar o número de cooperados responsáveis por essa atividade.

Gráfico 18 - Comparação dos lucros acumulados



Fonte: Elaborado pelo autor

Por outro lado, está demonstrado na simulação que o aumento da coleta seletiva em consonância com uma melhora nos processos de trabalho, principalmente no que se refere à triagem e separação, apresentam resultados positivos à Cooperativa, pois passam a registrar lucro, o que permite investimento em outras áreas da Usina ou melhorar o rateio dentre os cooperados, melhorando suas condições de vida.

A partir do 19º semestre, todos os cenários começam a registrar queda no lucro semestral, diminuindo, portanto, o lucro acumulado. Isso se deve ao fato da estabilização da quantidade de resíduos coletados, da ausência de atualização dos valores dos recicláveis (controlados pelo mercado) e da atualização monetária das

despesas. Nesse caso, é importante que haja uma pressão não apenas da Cooperativa, mas da união de todos os grupos e entidades que trabalham com coleta seletiva e comércio de reciclagem, para que haja atualização dos valores praticados pelo mercado, da mesma forma que há atualização dos valores das despesas.

Em termos de sustentabilidade, aproveitamento dos recursos naturais e destinação adequada dos resíduos, o cenário 6 apresenta o melhor resultado para o município, ao reduzir em 10,08% a quantidade total de resíduos encaminhada para o aterro sanitário nos 20 semestres analisados, sendo apenas 2,26% o percentual de redução devido ao aumento da coleta seletiva, o que corresponde a 14.585 toneladas de resíduos, e 7,82% (50.534 toneladas) o percentual referente à inclusão da compostagem, conforme se conclui com base nos cenários 2 e 3, respectivamente.

Também foi analisado o quanto a Cooperativa é dependente do subsídio em cada um dos cenários. A situação foi comparada em 4 momentos: no 5º, no 10º, no 15º e no 20º períodos. Vale ressaltar que atualmente a receita com os recicláveis cobre apenas 20% das despesas da Cooperativa.

A Tabela 8 apresenta o percentual de despesas que é coberto com a receita obtida após comercialização dos recicláveis em determinados períodos. Ela foi gerada a partir da divisão da receita com recicláveis em determinado período pela despesa total da Cooperativa naquele mesmo período. O Anexo III apresenta todos os valores utilizados e o percentual de cada período

Tabela 8 - Cobertura das despesas por meio do comércio de recicláveis

Semestre	Cenários 1 e 3	Cenário 2	Cenário 4	Cenários 5-6
5	20,40%	22,40%	20,59%	24,07%
10	18,56%	25,24%	18,99%	29,90%
15	17,56%	23,77%	18,14%	28,20%
20	16,03%	21,59%	16,70%	25,66%

Fonte: Elaborado pelo autor

No cenário 2, a menos que se aumente a eficiência da Cooperativa, principalmente na operação de triagem e separação, o restante das despesas não é coberto pelo repasse do DAAE, provocando acúmulo de prejuízo a partir do 13º semestre. O aumento da quantidade coletada aumenta sutilmente a porcentagem de

cobertura dos gastos devido ao pequeno aumento de receita (em relação ao cenário 1), sem que haja grande aumento no valor repassado pelo DAAE, senão a atualização anual pelo IPCA.

No cenário 4, mesmo não sendo necessário aumentar o pessoal que trabalha na Usina, a porcentagem de cobertura dos gastos é semelhante à porcentagem referente ao cenário 1, uma vez que a quantidade coletada é a mesma nos dois cenários e, portanto, a receita com recicláveis também é a mesma. A pequena diferença entre os resultados para o cenário 1 e para o cenário 4 está em uma sutil redução de gastos no cenário 4..

Os cenários 5 e 6 apresentam as maiores porcentagens de cobertura em relação aos demais porque, com uma maior eficiência da mão de obra no processo de triagem e separação, é possível se beneficiar do aumento de receita gerado pelo aumento da coleta sem um aumento maior dos gastos. A partir do 10º semestre, a cobertura das despesas pelo comércio de recicláveis diminui em relação aos períodos anteriores, pois a Coleta Seletiva alcança seu ápice (15% sobre o total de resíduos gerado), mas o valor monetário com a comercialização não é atualizado pelo mesmo índice que as despesas (o IPCA), o que faz com que a cobertura das despesas por essa receita diminua e, portanto, a dependência do subsídio aumente.

Uma conclusão trivial que pode ser tirada da Tabela 8 é que a receita com os recicláveis não é capaz de tornar a Cooperativa independente do repasse municipal, o que era um resultado esperado.

Um dos fatores que influencia nessa dependência é que o valor praticado com o comércio desses resíduos, definido pelo mercado, é muito baixo. Além disso, esse valor não passa por atualização monetária com frequência, nem mesmo por índices de correção da inflação do período, o que provoca uma desvalorização ao longo do tempo. Sendo assim, os cenários foram modelados sem considerar qualquer atualização, pois faltariam parâmetros para essa decisão. Por outro lado, todas as despesas foram atualizadas regularmente a cada ano.

Para se alcançar a diminuição dessa dependência, o valor monetário com o comércio dos recicláveis precisa ser atualizado anualmente pelo mesmo índice de atualização das despesas (o IPCA). A eficiência do processo de reciclagem poderia aumentar, para que fosse mais atrativo comprar estes tipos de resíduo.

Em termos absolutos, nota-se facilmente que os cenários 5 e 6 são os mais vantajosos, em termos de diminuir um pouco a dependência da cooperativa em relação aos repasses financeiros advindos do poder público. Com isso, fica demonstrado que o foco da Cooperativa e do município deve ser a melhoria da Coleta Seletiva, por meio da educação da população, e também da capacitação dos cooperados para aumentar a eficiência em suas atividades, principalmente na triagem e separação.

Na prática, o cenário 5 seria o mais viável e vantajoso para ser implantado em curto e médio prazo, já que se sabe que decisões que envolvem altos investimentos financeiros, como a construção de uma instalação de compostagem, possuem alta inércia e há obstáculos políticos e econômicos para que sejam tomadas. É importante novamente destacar que o aumento da coleta de recicláveis deve vir acompanhado de investimento em capacitação dos cooperados e melhora da produtividade do processo de triagem e separação.

Além disso, o cenário 5 também é vantajoso para o município, pois, com sua implantação, tem-se que 14.585 toneladas de resíduos deixariam de ser encaminhadas indevidamente para o aterro sanitário, uma redução significativa e que traria benefícios ao meio ambiente por proporcionar o reaproveitamento dos recursos por meio da reciclagem. A implantação desse cenário também permitiria que o município chegasse mais perto, ainda que distante, da meta proposta em seu PMGIRS (2013), ou seja, redução de 42% da massa de resíduos reutilizáveis e recicláveis dispostos na estação de transbordo e aterro, entre 2014 e 2023.

Para a Cooperativa Acácia, a fim de tentar melhorar a lucratividade e, portanto, o rateio entre os cooperados, seria necessário, em contrapartida ao aumento da atividade de coleta seletiva, triagem e separação de resíduos, rever alguns pontos, tais como:

- a) Negociar, junto à autarquia, atualização do subsídio em índice superior ao do IPCA ou melhorar o valor do bônus - o que permitiria investimento em capacitação, em condições de trabalho e na Usina;
- b) Auxiliar a autarquia na educação da população, por meio de cursos e oficinas junto às escolas, de modo que as crianças e adolescentes se sintam motivadas a, desde cedo, fazer uma correta separação de seus resíduos;

- c) Tentar, junto a outras cooperativas e entidades de coleta seletiva, melhorar o preço praticado com a venda dos resíduos recicláveis, ou seja, unir-se com outros grupos para que consigam poder de barganha na negociação.

Além disso, com esse cenário a Cooperativa teria aumento em sua lucratividade, o que seria útil aos cooperados, pois poder-se-ia aumentar o rateio, garantindo-lhes melhores condições de vida, a continuidade do recolhimento de INSS e garantia de uma aposentadoria digna. Com a expansão da Cooperativa o trabalho social desenvolvido pode ser estendido a outras pessoas que se encontram desempregadas ou em situação crítica e com dificuldades de voltarem ao mercado de trabalho. A própria ideia de Cooperativa nasceu com o intuito de reunir um grupo de pessoas que compartilhavam a mesma atividade e buscavam uma forma de obterem renda mais dignamente do que aquela que tinham no antigo lixão do município.

Outro resultado possível com o cenário, no que se diz respeito a uma reeducação da população, seria a diminuição de lixo nas ruas e bueiros (o chamado “boca de lobo”), evitando prejudicar o escoamento de água das chuvas, o que pode gerar custos desnecessários com seu desentupimento, por exemplo, e garantindo uma cidade mais limpa e agradável de ver e de se viver.

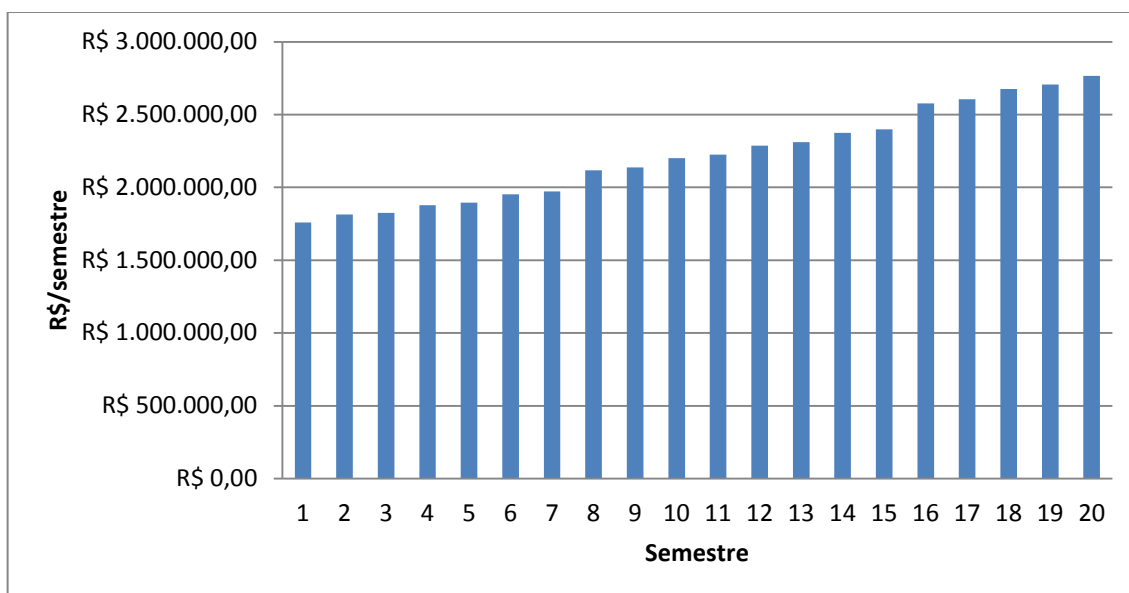
Para o município, a implantação do cenário 5 necessitaria de um investimento total, no período de 10 anos, de R\$44,5 milhões, menos de R\$2 milhões acima do valor gasto no cenário em que nenhum investimento é realizado. Esse investimento se daria em panfletagem nos semestres 2 e 7 (1º e 4º anos) e disponibilização de 6 caminhões a partir do semestre 8 e de 7 a partir do semestre 16. Esse aumento no número de caminhões se faz necessário devido ao aumento da quantidade de material que passaria a ser coletado após a campanha (no 4º ano), e por conta da tendência natural em se manter o crescimento da coleta (no 8º ano), visto que serão duas campanhas com breve espaço de tempo entre elas.

O pagamento do valor investido pelo DAAE precisará ser repassado à população, se for o caso, por meio da revisão da taxa de coleta seletiva, atualmente já existente no município.

O Gráfico 19 apresenta o investimento semestral do DAAE no caso de ser implantado o cenário 5. Percebe-se ligeiro aumento nos períodos em que se aumentaria o número de caminhões disponíveis para realização da tarefa de coleta

seletiva (8º e 16º semestres), e crescimento relativamente contínuo após esses pontos (após os degraus).

Gráfico 19 - Investimento do DAAE na implantação do cenário 5



Fonte: Elaborado pelo autor

6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de *System Dynamics* para gestão de resíduos sólidos que possibilitasse a simulação do crescimento populacional (com dados do IBGE); da geração de resíduos, discriminando o tipo gerado, ou seja, resíduos orgânicos e inorgânicos (classificando-os nos diferentes tipos); da quantidade enviada para aterro, compostagem e reciclagem; e dos custos e receitas envolvidos no processo ao longo do tempo. Tal modelo foi desenvolvido e dividido em módulos apresentados no decorrer do texto.

Com o modelo foi possível estabelecer a relação entre as variáveis, como o crescimento populacional e sua influência na geração de resíduos, bem como a proporção encaminhada para Coleta Seletiva, para uma possível compostagem, e a quantidade direcionada para sua destinação final no aterro sanitário.

Foram elaborados seis cenários com os quais se realizou a simulação das quantidades de resíduos encaminhados para Coleta Seletiva, compostagem e aterro sanitário e também se propôs aumentar a eficiência da atividade de triagem e separação realizada na Usina da Cooperativa Acácia. Foram também apresentados valores de investimento para implantação das mudanças propostas. Com esses cenários os gestores municipais e da Cooperativa teriam ferramentas para auxiliar na tomada de decisão.

No que se refere às obrigações e deveres do município, verificou-se a necessidade da implantação da compostagem, de modo a diminuir a quantidade de resíduos encaminhados indevidamente para o aterro sanitário em quase 8% - o que representa mais de 50 mil toneladas de resíduos - no período, ainda longe do esperado no PMGIRS, mas com estimativa de crescimento em longo prazo após a consolidação da prática. Com a ampliação desse tratamento, o município seria afetado tanto financeiramente quanto em termos de sustentabilidade, além do atendimento ao que está disposto no PNRS.

Já no que se diz respeito às atividades da Cooperativa, percebeu-se que apenas aumentar a quantidade disponível para Coleta Seletiva não seria suficiente para aumentar sua receita, já que, para atender a demanda, seria

necessário aumentar seu quadro de cooperados, afetando suas despesas drasticamente e inclusive causando prejuízos ao longo prazo, como pode ser visto no cenário 2 analisado. Com isso, foi sugerido que a Cooperativa realizasse investimentos em treinamento e capacitação de seus cooperados para aumentar a eficiência em suas atividades - análise realizada na proposição do cenário 4.

Além disso, conforme conversado com as gestoras da Cooperativa, apesar de ser necessário que a população separe corretamente e disponibilize seus resíduos recicláveis para diminuir o descarte inadequado, a Cooperativa precisaria rever muitas de suas atividades e quadro de pessoal, inclusive implantando um segundo turno de trabalho. Com isso, tem-se que aumentariam as despesas com pessoal, como já previsto na simulação. Entretanto, caso a quantidade de resíduos comercializáveis e, conseqüentemente, suas receitas, superem o estimado nos cenários simulados, esse segundo turno pode ser uma forma de atender a demanda do município.

Outro ponto analisado na simulação foi que, com o aumento da quantidade disponível para Coleta Seletiva, a Cooperativa precisaria de mais caminhões à sua disposição para transportar os resíduos coletados. Tendo em vista que a receita com a comercialização dos resíduos recicláveis e o subsídio recebido pelo DAAE não são suficientes para um investimento desse porte, a sugestão é que a autarquia disponibilize mais caminhões e motoristas para auxiliar nas atividades. Entretanto, é válido qualquer investimento que a Cooperativa possa realizar de modo a adquirir com capital próprio o veículo, porém as simulações não consideraram tal aquisição, deixando a cargo do município tal responsabilidade.

Dentre os cenários simulados, concluiu-se que o cenário 2 - aumento da coleta seletiva (sem melhoria nos processos) - apresenta o pior resultado financeiro para a Cooperativa. O cenário 5 - aumento da coleta seletiva e melhoria na operação de triagem e separação - surge como uma proposta de amenizar o problema causado pelo cenário 2 e é o mais indicado para o município e para a entidade, pois proporciona, de certo modo, lucro, que poderia ser repassado aos cooperados, melhorando suas condições de vida, e também por diminuir a quantidade de resíduos encaminhados indevidamente ao aterro com baixo investimento do município.

A quantidade de resíduo que deixaria de ser encaminhado para aterro ficaria em torno de 14.585 toneladas no período, chegando a 3% de redução a partir

do 10º semestre (redução em torno de mil toneladas por semestre). Com essa redução, o município reduziria o descarte indevido de resíduos e reduziria os gastos com transporte de resíduo da estação de transbordo para o aterro sanitário.

O gasto total que o município teria, no período, para a implantação do cenário 5, seria de R\$44,5 mi, uma diferença de menos de 2 milhões de reais para o caso de nenhuma adequação ser realizada no mesmo período (menos de R\$40.000,00 ao mês - valor este alcançado apenas após o 10º ano). Esses custos extras estariam relacionados com a contratação de empresa especializada para produzir os panfletos e demais comunicados à população, e também os gastos relacionados com a expansão da frota de caminhões necessária para transporte dos resíduos.

O investimento que seria necessário de ser realizado pela Cooperativa é o de treinamento e capacitação dos cooperados, de modo a aumentar a eficiência de suas atividades, algo em torno de R\$5.000,00 até o 2º ano da simulação.

Já com relação a quantidade total de resíduos encaminhados ao aterro sanitário, o cenário 6 - aumento da Coleta Seletiva e implantação da compostagem - apresenta o melhor resultado ao município, uma redução de 65.118 toneladas de resíduos encaminhados àquela destinação. No entanto, a menos que se consiga um convênio com alguma empresa ou órgão que faça a coleta e tratamento do resíduo orgânico, o investimento em sua implantação seria alto - em torno de R\$7 milhões - e o retorno pode não ser tão rápido, o que afetaria as finanças municipais.

O trabalho desenvolvido permitiu que se propusessem cenários que estivessem próximos ao do município e, de certa forma, dentro das expectativas dos seus gestores, tomando por base o que foi discutido nos encontros que ocorreram em três momentos distintos.

Também possibilitou contribuir com a literatura ao ampliar os modelos existentes e se realizar um maior detalhamento dos tipos de resíduos coletados e aqueles possíveis de serem comercializados, bem como suas quantidades e o valor praticado no mercado. Além disso, foi possível fazer uma análise financeira a partir dos cenários simulados, apresentando as receitas e despesas existentes no processo e seu crescimento ao longo do tempo. Permitiu analisar que apenas a receita obtida com a comercialização dos recicláveis não é suficiente para suprir as despesas da Cooperativa, sendo necessária a tomada de decisão tanto do município

quanto da entidade e, se possível, a união com outras Cooperativas e órgãos de modo a aumentar o poder de barganha e de negociação.

O modelo desenvolvido pode ser utilizado para outros municípios que possuam características semelhantes às de Araraquara, salvo alterações no que se refere a valores praticados na comercialização e crescimento populacional e de coleta seletiva e compostagem. De todo modo, caso o local de estudo não trabalhe com a mesma relação município e cooperativa de coleta seletiva, o modelo pode não ser adaptável, a menos que sejam feitas grandes modificações que atendam essas características.

Entretanto, o modelo proposto pode ser dito de referência, pois, contrariamente aos demais encontrados na literatura, especifica os materiais possíveis de serem coletados com mais detalhes, permitindo que os gestores trabalhem com o cenário que mais se aproxime de sua realidade fazendo alterações que julgar necessárias.

No que tange ao método de *System Dynamics*, o trabalho possibilitou que se aprofundasse no tema de validação e verificação de viabilidade, ao explorar análises pouco ou quase nunca realizadas nos trabalhos encontrados na RBS. Além disso, poucos trabalhos apresentavam o funcionamento interno do método, focando-se, geralmente, nos resultados proporcionados e fazendo-se a análise a partir deles.

Pode-se dizer que o trabalho contribuiu com a literatura como um todo ao apresentar um estudo de caso a partir de um município brasileiro com bons índices de desenvolvimento, econômico e pessoal, e bem posicionado geograficamente. Também contribuiu na perspectiva política e social ao permitir que, a partir de dados reais, fossem propostos cenários factíveis ao brasileiro, levando-se em consideração que o país atravessa um momento em que todo investimento realizado deve ser feito com cuidado e trazendo argumentos para que o justifique.

A problemática da coleta seletiva e reciclagem de resíduos é um problema não só brasileiro, mas mundial, e não se deve medir esforços para se dar atenção ao tema e aumentar a reciclagem, inserir a compostagem e diminuir a exploração de recursos naturais e o envio inadequado de resíduos para aterros sanitários, onde ficarão por muito tempo até que sejam degradados, ação esta que pode levar não apenas anos (como resíduos orgânicos), mas séculos (plásticos e alguns metais).

Sendo assim, o modelo desenvolvido pode ser adaptado para outras regiões do país e do mundo, permitindo que os gestores analisem a possibilidade de investimento em métodos que melhorem os atuais números referentes a geração e destinação de resíduos sólidos.

6.1. DESENVOLVIMENTO DE TRABALHOS FUTUROS

A partir do que foi tratado nesta dissertação, alguns pontos merecem atenção em futuros desenvolvimentos. São eles:

- Verificar a possibilidade de utilizar o modelo em outros municípios que possuam características semelhantes às de Araraquara;
- Ampliar o modelo para uma maior discriminação das despesas, relacionando algumas variáveis com o trabalho desenvolvido pela Cooperativa;
- Utilizar o modelo desenvolvido por um período de tempo maior do que o simulado nesta dissertação para ampliar a análise dos resultados;
- Executar a simulação do modelo com maior participação dos gestores municipais e da Cooperativa de modo a alinhar os cenários dentro de suas capacidades e expectativas;
- Incluir um módulo que trate das viagens realizadas para transportar resíduos do município para o aterro sanitário - inclusive despesas;
- Observar o trabalho desenvolvido pelos funcionários e propor um projeto de trabalho que possa gerar a melhoria de produtividade desejada.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2016. ABRELPE, 2017.
- ADAMIDES, E. D.; MITROPOULOS, P.; GIANNIKOS, I.; MITROPOULOS I. A multi-methodological approach to the development of a regional solid waste management system. *Journal of the Operational Research Society*. 60 ed. 2008. p. 758 - 770.
- AL-KHATIB, I. A.; ELEYAN, D.; GARFIELD, J. A System Dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas. *Journal of solid waste technology and management*. Vol. 41, n. 2. 2015. p. 109 - 120.
- ARARAQUARA. Prefeitura Municipal de Araraquara. Departamento Autônomo de Água e Esgotos. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS. Araraquara, 2013. 371 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- BALA, B. K. Modelling of Solid Waste Management Systems. In: UQAILI, M. A.; HARIJAN, K. (Org.). *Energy, Environment and Sustainable Development*. Springer Wien. New York. 2012. p. 265 - 289.
- BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M.. *Discrete-event System Simulation*. New Jersey: Prentice-Hal. 2009. 528p.
- BEIGL, P., LEBERSORGER, S., SALHOFER, S. Modelling municipal solid waste generation: a review. *Waste Management*. 28, 2008. p. 200 - 214.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 26 out. 2016.
- CIMREN, E.; BASSI, A.; FIKSEL, J. T21-Ohio, a System Dynamics approach to policy assessment for sustainable development: a waste to profit case study. *Sustainability*. 2 ed. 2010. p. 2814-2832.
- DYSON, B., CHANG, N. B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast growing urban region with System Dynamics modeling. *Waste Management*. 25 ed, 2005. p. 669 - 679.
- FORRESTER, J. W.. *Industrial Dynamics*. Cambridge, Massachussets: M.I.T. Press, 1st Edition. 1961. 464 p.
- GARRÉ, S. O., LUZ, M. L. G. S., LUZ, C. A. S., GADOTTI, G. I., NAVROSKI, R. Análise econômica para implantação de uma usina de compostagem de resíduo orgânico urbano. *Revista Espacios*. Vol. 38, nº 17. 2017.
- GIANNIS, A.; CHEN, M.; YIN, K.; TONG, H.; VEKSHA, A. Application of System Dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in Singapore. *J Mater Cycles Waste Management*. 19 ed. 2017. p. 1177 - 1185.

GUO, H.; HOBBS, B. F.; LASATER, M. E.; PARKER C. L.; WINCH, P. J. System Dynamics-based evaluation of interventions to promote appropriate waste disposal behaviors in low-income urban areas: A Baltimore case study. *Waste Management*, v. 56. 2016. 547 - 560.

GUTBERLET, J.; KAIN, J.; NYAKINYA, B.; OLOKO, M.; ZAPATA, P.; CAMPOS, M. J. Z. Bridging Weak Links of Solid Waste Management in Informal Settlements. *Journal of Environment & Development*. 26 ed. 2016. p. 106 - 131.

INGHELIS, D.; DULLAERT, W. An analysis of household waste management policy using System Dynamics modeling. *Waste Management & Research* 29. 2010. p. 351 - 370.

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 ed. 2010. p. 2194 - 2203.

KUBANZA, N. S.; SIMATELE; D. Sustainable solid waste management in sub-Saharan African cities: application of system thinking and system dynamic as methodological imperatives in Kinshasa, the Democratic Republic of Congo. *Local Environment, The International Journal of Justice and Sustainability*. 2017.

LEMKE, J.; ŁATUSZYŃSKA, M. Validation of System Dynamics Models – a Case Study. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*. 2013.

MARTINS, R. A.. Princípios da Pesquisa Científica. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 7-31.

_____. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 47-63.

MORABITO NETO, R.; PUREZA, V.. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 7-31.

OYOO, R.; LEEMANS, R.; MOL, A. P. J. Future Projections of Urban Waste Flows and their Impacts in African Metropolises Cities. *International Journal of Environmental Research*. 5 ed. 2011. p. 705- 724.

PALACIO VÉLEZ, S. L.; ESCALANTE MORA, N. System Dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia. *International Journal of Environment and Waste Management*, Vol. 18, No. 2, 2016. p.161 - 180.

QUDRAT-ULLAH, H.; SEONG, B. S. How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. *Energy Policy Journal*. 2009.

RAHAYU, N.; ARAI, T.; YUDOKO G.; MORIMOTO, H. System Dynamics models for planning long-term integrated municipal solid waste management in Bandung city. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*. 179 ed. The Sustainable City VIII. Vol. 2. 2013. p. 1153 - 1168

SIMONETTO, E. S. Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste – an approach using systems dynamics. *Int. J. Environment and Sustainable Development*, Vol. 13, n. 4, 2014. p. 339 - 353.

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

SIMONETTO, E. S.; RODRIGUES, G. O.; DALMOLIN, L. C.; MODRO, N. R. O uso da dinâmica de sistemas para avaliação de cenários da reciclagem de resíduos sólidos urbanos. *Revista GEINTEC*, v.4, n. 2, 2014. p. 910 - 924.

STERMAN, J. D. *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for the Complex World*. McGrawhill, Boston. 2000.

SUFIAN, M. A., BALA, B. K. Modeling of urban solid waste management system: the case of Dhaka city. *Waste Manage.* 27 ed. 2007. p. 858 - 868.

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*, 52 ed. 2016. p. 50 – 61.

ULLI-BEER, S.; ANDERSEN, D. F.; RICHARDSON, G. P. Financing a competitive recycling initiative in Switzerland. *Ecological Economics*, 62 ed. 2007. p. 727 - 739.

VIVEKANANDA, B.; NEMA, A. K. Forecasting of solid waste quantity and composition: a multilinear regression and System Dynamics approach. *Int. J. Environment and Waste Management*, Vol. 13, nº 2, 2014. p. 179 - 198.

ZULKIPLI, F.; NOPIAH, Z. M.; BASRI, N. E. A.; KIE, C. J. Stock flow diagram analysis on solid waste management in Malaysia. *The 4th International Conference on Quantitative Sciences and Its Applications (ICOQSIA 2016)*. 2016.

Anexo I - Quadro resumo dos artigos analisados na RBS

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
01	<p>- Prever a geração de resíduos sólidos em uma cidade com rápido crescimento utilizando diferentes fatores de entrada;</p> <p>- A quantidade era medida em toneladas/ano;</p>	<p>5 modelos para simular a quantidade de toneladas geradas</p> <p>1) por renda total por centro de serviço</p> <p>2) por pessoas por domicílio</p> <p>3) por quantidade histórica gerada</p> <p>4) por renda por domicílio</p> <p>5) por pessoa</p>	<p>- Análise de regressão (r^2)</p>	<p>Não apresenta</p>	<p>- Crescimento econômico com base no NAFTA</p> <p>- Dividiu a cidade em 4 áreas de serviço</p> <p>- utilizou tabelas históricas para definir taxas de crescimento;</p> <p>- Apenas um cenário - sem proposta de alterações nas políticas de reciclagem;</p>	<p>- O cenário 1) foi o que melhor representou a estimativa de quantidade gerada.</p> <p>- Como o modelo foi separado por região, os resultados apresentaram o melhor lugar para se instalar um novo ponto de destinação e sua capacidade.</p>
02	<p>Avaliar o comportamento e hábitos da população no sentido da reciclagem, retorno dos investimentos públicos e as medidas econômicas de diferentes lógicas operacionais, tais como estímulo da venda de resíduos recicláveis pela própria população de modo a evitar o despejo de resíduos em local inadequado.</p>	<p>Vários cenários de acordo com a política implantada de modo a se obter a prática mais viável ao setor, considerando sempre o melhor e o pior caso possível em cada prática.</p>	<p>Não há</p>	<p>Retorno financeiro com a implantação de taxa paga pelo governo para aqueles que realizarem a coleta e separação e entrega de seus resíduos recicláveis</p>	<p>- Afirmando que políticas públicas podem mudar o comportamento das pessoas;</p> <p>- Propõe formulação matemática que determina a quantidade de pessoas que faz a separação dos resíduos;</p> <p>- Apresenta as relações causais das ações dos atores</p>	<p>O modelo simulado sugere que seja adotada uma taxa moderada para estimular a coleta e reciclagem de resíduos de modo a estimular que a população realize a separação e entrega dos resíduos para reciclagem, como forma de financiar as atividades de gestão de resíduos sólidos;</p> <p>Apontam a necessidade de divulgação de informação para as pessoas além de investimento em políticas de melhoria de infraestrutura para implantação de tais políticas.</p>
03 09	<p>- prever a geração e capacidade de coleta e geração de energia elétrica a partir dos resíduos sólidos;</p> <p>- Avaliar a situação da cidade a partir da proposição de políticas</p>	<p>Um cenário principal, apenas com as projeções naturais e dois outros cenários alterando políticas:</p> <p>Política 1 - aumentar a capacidade de coleta e avaliação do impacto de resíduos não separados, não tratáveis, número de caminhões e outros índices (peso, população, outras taxas) que indicam qualidade ambiental;</p> <p>Política 2 - Aumentar capacidade de coleta, de tratamento e de aterro e avaliação dos impactos</p>	<p>Não há</p>	<p>Apresenta os resultados, mas não os valores de entrada.</p>	<p>- Separam os tipos de resíduos e suas quantidades (%);</p> <p>- Apresentam as densidades dos materiais;</p> <p>- Apresenta um modelo para a geração de RS e um para a gestão de RS</p> <p>- Preocupação da população acerca do tema é uma variável de estoque;</p> <p>- Apresenta um parâmetro que mede a qualidade ambiental;</p>	<p>- Investir em limpeza e tratamento de resíduos implica em melhora no ambiente.</p> <p>- Energia a partir de incineração e dos RS reduz a emissão de gases poluentes, inclusive considerando a queima de carvão, de combustível e de gás natural.</p>

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
04	Entender o problema da gestão de resíduos sólidos da região e propor melhorias	Foram simulados mais de 50 cenários, variando 3 variáveis de decisão (percentual de resíduo reciclável, esforço na melhoria de conscientização e participação da população na tomada de decisão, e construção/inserção de outras instalações tecnológicas necessárias), ao final apresentou os resultados do mais viável.	SSM (<i>Soft Systems Methodology</i>), modelo bi-objetivo e sistema de informação geográfica (GIS)	Cálculo financeiro é feito a partir do orçamento destinado para GRS (66 a 80% do orçamento)	Utilizou SSM para analisar a situação atual, explorar outras dimensões do problema, estudar diferentes pontos de vista e verificou as necessidades do sistema para resolver o problema. Com GIS estabeleceu onde poderia ser instalado outra unidade de descarte de resíduo e com a modelo bi-objetivo trabalhou os custos e o menor percurso dos caminhos até o destino (otimização).	Com o modelo SD e o SSM foi possível entender o problema e com o modelo bi-objetivo e com o GIS foi possível estabelecer onde seria viável instalar novos aterros.
05	Estimar a geração de resíduo, utilização de aterro sanitário e o custo com separação, coleta e reciclagem.	Apenas um cenário, com as projeções naturais de crescimento	Séries temporais e análise de dados transversais	Custo de construção de novo aterro comparado ao custo de reciclar	Utiliza séries temporais e análises de dados transversais para obter a quantidade de resíduos gerada Simula os valores para papel/papelão, metal, plástico, orgânicos, vidro e resíduos perigosos, discriminando a parte que seria separada e a parte que iria para aterro.	Com o passar dos anos os custos para aterrar e para reciclar vão continuar a subir. Considerando o início e o final da simulação, começará a ser vantajoso reciclar a partir do 8º ano devido a possibilidade da inserção de novo método de processamento de resíduo, tal como incineração. Nesse período as contas se equilibram.
06	Simular a geração de RS, a criação de empregos, a quantidade de resíduos despejada em aterro sanitário, o aumento da capacidade da reciclagem, a geração de gases do efeito estufa e o PIB	3 cenários além de simular a situação atual - combustão de biomassa - estímulo governamental para reciclagem; e - ações colaboradas (indústrias que fabricariam produtos a partir do material coletado) Em cada cenário considerou-se diferença no investimento público	Não há	Estudo quanto ao investimento feito pelo governo no cenário em que é estimulada a reciclagem, e a geração de renda devido a utilização de resíduos coletados pelas indústrias colaboradoras.	Preocupação com a emissão de gases do efeito estufa, criação de empregos com a fabricação de subprodutos para geração de eletricidade a partir dos RS; Conforme há estímulo da população para realização de reciclagem, simula a capacidade para realizá-la;	Cada cenário apresentou um resultado, sendo que a reciclagem diminuiria a emissão de gases do efeito estufa e a necessidade de extração de recursos naturais; O uso da biomassa geraria uma energia limpa, reduzindo a emissão de gases a partir da queima de combustíveis fósseis; e as ações colaboradas reduziram os resíduos existentes e a geração de gases do efeito estufa, além de melhoria na economia (renda e aumento do PIB) e geração de empregos.

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
07	Construir um modelo para avaliar as atuais políticas de gestão de resíduos sólidos domésticos da região.	Vários cenários, dependendo do parâmetro analisado	Apresenta um modelo conceitual da coleta e despejo de resíduos e diversas equações matemáticas estabelecendo as relações entre as variáveis do modelo conceitual	Não há	São previstas iniciativas para diminuir a geração de resíduos e para gerar energia a partir dos resíduos coletados.	O modelo final obtido após sua calibração apresentou viabilidade para ser utilizado para diversos fins no que tange a análise das políticas de gestão de resíduos sólidos da região.
08	Apresentar resultados acerca de diferentes práticas e implantação de políticas acerca da gestão de resíduos sólidos	4 cenários: 1) cenário atual, sem mudanças nas atuais práticas, 2) mudanças na legislação com a proposição de normas para a população, 3) aumento de coleta de resíduos domiciliares, e 4) gestão adequada, que combina implantação de tecnologias, conscientização e normas apropriadas	Não há	Não há	Associa a gestão de resíduos sólidos com a qualidade de vida da população	De acordo com o cenário 1, a qualidade de vida da região se deteriorará; Cenários 2 e 3 melhoram a questão da coleta de resíduos, mas não resolvem a questão da recuperação de recursos; e cenário 4 resolve os problemas pontuais: diminui os danos ambientais e recupera a maior quantidade de recursos. Apontada a necessidade de esforços de diversos setores para que o cenário 4 possa ser alcançado.
10	Prever a geração de resíduos e auxiliar os tomadores de decisão na proposição de políticas para a gestão de resíduos sólidos	3 cenários: 1) Cenário atual - sem mudanças significativas, mantendo as atuais políticas e algumas poucas inovações tecnológicas; 2) Nenhum resíduo encaminhado aos aterros até o final do período simulado; e 3) Apenas 20% do resíduo gerado ser enviado para aterro.	Não há	Análise de custos (salários, manutenção dos caminhões, combustível etc) e receitas (orçamento disponível para as tarefas)	Apresenta o diagrama de como se procede a gestão dos resíduos sólidos e todas as necessidades do sistema.	A geração de resíduos vai aumentar devido o crescimento da população e da economia; É apontada a necessidade de planejamento para a construção de outras instalações para tratar os resíduos gerados.

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
11	Prever a quantidade e a composição dos resíduos sólidos	Apenas um, com os parâmetros atuais da região.	Regressão linear múltipla e funções de logística, sigmoide e de crescimento cinético	Não há, exceto a variação do PIB com a qual é simulada a geração de resíduos	Prevê a quantidade de resíduos gerada considerando a composição (papel, metal, plástico, orgânicos e outros) - para isso considera o PIB. A partir da queima dos resíduos simula a geração de cinzas que são enviados para outro destino.	Geração de resíduos terá aumento de quase 100%, sendo papel o componente de maior crescimento, enquanto comida e metais terá um decréscimo. Tais mudanças ocorreriam com a implantação de novas tecnologias de tratamento e de despejo de lixo.
12 13 14	Avaliar políticas públicas de incentivo à reciclagem, economia de energia elétrica e reuso e reutilização de resíduos.	2 cenários: atual, considerando as variações atuais das taxas; e um positivo, considerando taxas crescentes de reciclagem de resíduos e mantendo constante a produção per capita de resíduos pela população	Não há	Não há	Com a reciclagem dos resíduos, apresenta a economia de energia elétrica esperada caso fosse produzida a mesma quantidade de determinado material	Com taxas crescentes de reciclagem de resíduos (cenário positivo), a região poderia aumentar em até 150% o percentual de material reciclado ao final do período simulado
15	Prevê a geração de resíduos sólidos e os custos associados à sua gestão, além de separá-los quanto sua composição e densidade.	Foram simulados dois cenários, sendo que no que se refere ao crescimento populacional e geração de resíduos se manteve constante, variando apenas a premissa de haver ou não reciclagem e a taxa de reciclagem.	Não há	Não há	Separa os resíduos quanto a sua composição e a densidade dos seus componentes de modo a prever a utilização de aterro sanitário ou propor outra destinação.	A geração de resíduos tende a aumentar devido ao crescimento populacional e econômico, bem como os custos da operação. Para diminuir os custos existentes na gestão de resíduos sólidos, recomenda-se investimentos em políticas de reciclagem além de diminuir a poluição do meio ambiente.
16	Avaliar o desempenho da coleta e transporte de resíduos se tais resíduos forem separados pela população, na origem.	6 cenários Diferentes percentuais de separação de resíduos, sendo 3 deles considerando apenas resíduos recicláveis e outros 3 considerando separação de resíduos recicláveis e orgânicos.	Não há	Apresenta os custos da operação de coleta (custos relacionados a caminhões para coleta e salários dos operários que realizam a coleta)	- simulou os resultados para os 14 distritos da cidade - Entrevistou agentes de coleta e transporte e relacionou o conhecimento e o ganho de incentivos com a mudança de hábito da população, no que tange a separação de resíduos. - Propõe estratégias econômicas, sociais, ambientais e legislativas para incentivar a separação na fonte	No intervalo de tempo de 10 anos, a geração de resíduos aumentará em 16% enquanto a coleta aumentará apenas em 10%, representando 80% do total de resíduo gerado. Classifica os cenários com as diferentes taxas de coleta e transporte considerando a separação na origem - aquele com maior taxa de coleta e transporte de resíduos orgânicos e recicláveis apresenta melhores resultados que os demais;

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
17	Prever a quantidade de resíduo gerado com base no número de pessoas	Apenas um, com taxas normais de crescimento populacional	Não há	Não há	Considera a prática do 3R (reduzir, reutilizar, reciclar) como forma de diminuir a geração de resíduo	No período de 10 anos simulados e mantendo constante a taxa de crescimento populacional, haverá um grande aumento da população e, conseqüentemente da geração de resíduos, exceto se forem tomadas atitudes para diminuir tal geração e/ou outras formas de tratamento dos resíduos gerados.
18	Simular o efeito da formalização do trabalho de catadores de lixo informais de modo a resolver o problema social e ambiental	Pares de cenários considerando alguns fatores tais como formalização ou não do trabalho dos catadores ou investimento ou não em busca da formalização.	Não há	Não há	Aborda questões econômicas e sociais; Trata da questão dos catadores de lixo informais com o objetivo de inseri-los na formalidade/cooperativa	O aumento da quantidade de resíduo reciclado só será possível se os catadores informais forem inseridos no trabalho formal do município
19	Simular os impactos das intervenções no comportamento dos domiciliados	São simulados 5 cenários que agrupam conjuntos de intervenções	Percepções sociais e econômicas para simular como as escolhas da população pode diminuir problemas com despejo irregular de lixo.	Não há	Modelo baseado em normas sociais e econômicas que influenciam o comportamento das pessoas no que se refere o despejo de resíduos. Combina possíveis intervenções, cada qual agrupada de forma a enfatizar um parâmetro (normas sociais, incentivos financeiros, fatores contextuais, conhecimento e limpeza física) Aplica o modelo em outras regiões/áreas para calibrá-lo.	Intervenções com ênfase em aplicar normas sociais e incentivos financeiros apresentam melhores resultados no comportamento das pessoas no que se refere ao tratamento dado aos resíduos.

#	Objetivo simulação	Cenários	Métodos adicionais	Avaliação financeira	Contribuição/Diferencial	Resultados
20	Prever a geração de resíduos e a utilização de aterro sanitário e comparando com o despejo de lixo em aterro e o envio para incineração e também os custos envolvidos nos cenários simulados.	9 cenários - combinação de variação dos parâmetros de três fatores: padrões sociais (atual, baixo e alto), compostagem (atual e alta) e taxa de reciclagem (atual e alta)	Não há	Apresenta matriz de equilíbrio das despesas em cada cenário ao longo dos períodos simulados	Considera padrões socioeconômicos em diferentes níveis (PIB, tamanho das famílias, população total) Apresenta todas as equações utilizadas no modelo; Considera os diferentes componentes do lixo (papel, plástico etc); Ressalta que as cinzas dos materiais incinerados serão despejados em aterro	Em todos os cenários, a quantidade de resíduo que pode ser reciclada é a de maior influência no sistema, mesmo se considerar que a população apresentará altos padrões socioeconômicos; Apresenta o momento em que o aterro atinge seu limite nos nove cenários; Até os anos 2040, na maioria dos cenários (6/9) o aterro já terá atingido seu limite; Aumentar a eficiência na reciclagem promoverá mais economia no longo prazo.
21	Em conjunto com uma abordagem de diagrama de rede, localizar os pontos fracos da GRS e apontar as responsabilidades dos atores envolvidos	Não são apresentados cenários, mas interfaces da situação atual da região, de modo a apontar os pontos fracos da cadeia de GRS	Diagramas em rede	Não há	Utiliza a ideia de SD para criar diagramas de redes e apresentar os pontos fracos da GRS	Apontou os pontos fracos existentes na GRS da região e atribuiu as responsabilidades aos atores que devem buscar soluções para esses problemas
22	Com apoio da modelagem por SD desenvolver um framework que possibilite uma melhoria na gestão de resíduo sólido	Apenas um cenário, com a situação atual da região	Entrevistas	Não há	Entrevistas com algumas pessoas da cidade de modo a obter as características da população e suas percepções acerca da gestão de resíduos da região; Apresenta as relações causais de modo claro e os <i>feedback</i> de balanço e reforço	Percebe-se a necessidade de investimento em infraestrutura para uma gestão eficiente dos resíduos sólidos Não basta investir em desenvolvimento urbano, deve também se investir em políticas para reduzir a pobreza. Uma alternativa é a de criar empregos a partir do tratamento dos resíduos sólidos, o que melhoraria dois fatores que merecem atenção na região: falta de emprego e falta de uma gestão eficiente dos resíduos sólidos

Fonte: Desenvolvido pelo autor

O 009 não foi feito em separado, pois é o capítulo do livro, cujo autor foi Bala, mesmo do artigo 003.
Os 013 e 014 não foram feitos, pois são publicações, entre outros, de Simonetto que já foram explorados no 012.

Anexo II

Documentação do modelo desenvolvido no software Vensim

- (001) Administrativo = 13
Units: Pessoas
- (002) Aerossol = Coleta Seletiva * Percentual ferro aerossol coletado
Units: kg
- (003) Alumínio = Coleta Seletiva * Percentual alumínio coletado
Units: kg
- (004) Apara de Papel Branco = Coleta Seletiva * Percentual APB coletado
Units: kg
- (005) "Apara de Papel, Jornal e Revista" = Coleta Seletiva * Percentual APJR coletado
Units: kg
- (006) Aterro = INTEG (TxEnvio Aterro / 1000, 30145.4)
Units: Toneladas
- (007) Banco = 700
Units: R\$
- (008) Bolsão = 25000 * IPCA
Units: R\$
- (009) Bolsões = 11
Units: Pessoas
- (010) Bônus = 15780 * IPCA
Units: R\$
- (011) Caminhões = IF THEN ELSE(Coleta Seletiva<3.3e+006, 4,IF THEN ELSE(Coleta Seletiva<4.3e+006, 5, IF THEN ELSE(Coleta Seletiva<5.3e+006, 6, 7)))
Units: Unidades
- (012) Cobre = Coleta Seletiva * Percentual cobre coletado
Units: kg
- (013) Coleta Seletiva = RSU coletado * Percentual coleta seletiva
Units: kg
- (014) Coletores porta a porta = 70
Units: Pessoas

- (015) Combustível = 2500 * Caminhões
Units: R\$
- (016) Compostagem = INTEG (TxEnvio Compostagem, 0)
Units: kg
- (017) Compra de bags = 5000
Units: R\$
- (018) Contrato = 182282 * IPCA
Units: R\$
- (019) Crescimento Populacional = WITH LOOKUP (Time, ((1,0.004)-(20,0.008)],(1,0.0074169),(20,0.00453855))
Units: percentual
- (020) Despesa total = Despesas administrativas + Despesas com cooperados + Despesas com funcionário + Despesas Manutenção
Units: R\$
- (021) Despesas administrativas = ((Banco + Despesas não previstas + Escritório de contabilidade + Internet + Material escritório + OSCIP + Supermercado + Telefone) * 6) * IPCA + ISSQN
Units: R\$
- (022) Despesas com cooperados = Rateio cooperados + INSS
Units: R\$
- (023) Despesas com funcionário = Salário * 0.92 + Vale Transporte
Units: R\$
- (024) Despesas com pessoal = INTEG (Tx despesas com pessoal,0)
Units: R\$
- (025) Despesas Manutenção = ((Combustível + Compra de bags + Seguro e Impostos + Usina + Veículos +EPI) * 6) * IPCA
Units: R\$
- (026) Despesas não previstas = 2000
Units: R\$
- (027) EPI = 4000
Units: R\$
- (028) "EPS (isopor)" = Coleta Seletiva * Percentual EPS coletado
Units: kg
- (029) Escritório de contabilidade = 1300

Units: R\$

(030) Ferro = Coleta Seletiva * Percentual ferro coletado
Units: kg

(031) FGTS = Salário * 0.08
Units: R\$

(032) FINAL TIME = 20
Units: Semester
The final time for the simulation.

(033) INITIAL TIME = 1
Units: Semester
The initial time for the simulation.

(034) INSS = Rateio cooperados * 0.2
Units: R\$

(035) INSS Funcionários = Salário * 0.32
Units: R\$

(036) Internet = 200
Units: R\$

(037) IPCA = WITH LOOKUP (Time, (((1,0.9)-(20,2)), (1,1), (2,1.0385), (3,1.038), (4,1.078), (5,1.078), (6,1.12), (7,1.12), (8,1.16), (9,1.16), (10,1.208), (11,1.208), (12,1.254), (13,1.254), (14,1.302), (15,1.302), (16,1.353), (17,1.353), (18,1.405), (19,1.405), (20,1.45)))
Units: percentual

(038) ISSQN = Receita com recicláveis * 0.03
Units: R\$

(039) Lucro Total = INTEG (Tx lucro,0)
Units: R\$

(040) Material escritório = 600
Units: R\$

(041) Metais reciclados = Aerossol + Alumínio + Cobre + Ferro + Motorzinho
Units: kg

(042) Motorzinho = Coleta Seletiva * Percentual motorzinho coletado
Units: kg

(043) Nro de funcionários = 1
Units: Pessoas

- (044) OSCIP = 7500
Units: R\$
- (045) Outras despesas = INTEG (Tx outras despesas, 0)
Units: R\$
- (046) Outros resíduos reciclados = "EPS (isopor)" + Óleo + Papelão + Tetra Pak + Vidro
Units: kg
- (047) Óleo = Coleta Seletiva * Percentual óleo comestível coletado
Units: kg
- (048) Papel reciclado = Apara de Papel Branco + "Apara de Papel, Jornal e Revista"
Units: kg
- (049) Papelão = Coleta Seletiva * Percentual papelão coletado
Units: kg
- (050) "PEAD - Plástico Fino Branco" = Coleta Seletiva * Percentual PFB coletado
Units: kg
- (051) "PEAD - Plástico Fino Colorido" = Coleta Seletiva * Percentual PFC coletado
Units: kg
- (052) "PEAD - Sopro Branco" = Coleta Seletiva * Percentual sopro branco coletado
Units: kg
- (053) "PEAD - Sopro Colorido" = Coleta Seletiva * Percentual sopro colorido coletado
Units: kg
- (054) PEAD reciclado = "PEAD - Plástico Fino Branco" + "PEAD - Plástico Fino Colorido" +
"PEAD - Sopro Branco" + "PEAD - Sopro Colorido"
Units: kg
- (055) Percentual alumínio coletado = 0.00158785
Units: por cento
- (056) Percentual APB coletado = 0.0208187
Units: por cento
- (057) Percentual APJR coletado = 0.0750592
Units: por cento
- (058) Percentual cobre coletado = 0.00012747
Units: kg
- (059) Percentual coleta domiciliar = 1 - Percentual coleta seletiva - Percentual
Compostagem

Units: por cento

(060) Percentual coleta seletiva = IF THEN ELSE(Percentual crescimento coleta seletiva = 0, 0.0856, 0.0856 * (1 + Percentual crescimento coleta seletiva))

Units: por cento

(061) Percentual Compostagem = WITH LOOKUP (Time, (((3,0)-(10,0.2)], (3,0), (5,0.05), (10,0.1)))

Units: por cento

(062) Percentual crescimento coleta seletiva = WITH LOOKUP (Time, (((1,0)-(10,0.8)], (1,0), (4,0.17), (7,0.17), (10,0.75)))

Units: por cento

(063) Percentual EPS coletado = 0.00146328

Units: por cento

(064) Percentual ferro aerossol coletado = 0.00074571

Units: por cento

(065) Percentual ferro coletado = 0.0601761

Units: por cento

(066) Percentual motorzinho coletado = 0.0005532

Units: por cento

(067) Percentual óleo comestível coletado = 0.00165693

Units: por cento

(068) Percentual papelão coletado = 0.139462

Units: kg

(069) Percentual PET coletado = 0.0169304

Units: por cento

(070) Percentual PFB coletado = 0.00293562

Units: por cento

(071) Percentual PFC coletado = 0.0171851

Units: kg

(072) Percentual PL coletado = 0.0033595

Units: por cento

(073) Percentual PO coletado = 0.00391185

Units: por cento

(074) Percentual PP coletado = 0.00343363

- Units: por cento
- (075) Percentual PPR coletado = 0.0130768
Units: kg
- (076) Percentual PS coletado = 0.0296021
Units: kg
- (077) Percentual Reciclagem = 0.494685
Units: por cento
- (078) Percentual sopro branco coletado = 0.00422346
Units: por cento
- (079) Percentual sopro colorido coletado = 0.00744729
Units: por cento
- (080) Percentual tetrapack coletado = 0.0179412
Units: por cento
- (081) Percentual vidro coletado = 0.0763093
Units: por cento
- (082) Pessoal para triagem e separação = IF THEN ELSE(INTEGER(Coleta Seletiva / Triagem e separação por pessoa)<77 ,77 , INTEGER(Coleta Seletiva / Triagem e separação por pessoa))
Units: Pessoas
- (083) PET = Coleta Seletiva * Percentual PET coletado
Units: kg
- (084) PET Leite = Coleta Seletiva * Percentual PL coletado
Units: kg
- (085) PET Óleo = Coleta Seletiva * Percentual PO coletado
Units: kg
- (086) PET reciclado = PET + PET Leite + PET Óleo
Units: kg
- (087) População = INTEG (Tx Cresc populacional,233744)
Units: Pessoas
- (088) potencia = INTEG (TIME STEP * 2, 1)
Units: **undefined**
- (089) PP = Coleta Seletiva * Percentual PP coletado
Units: kg

- (090) $PP \text{ e } PS \text{ reciclado} = PP + \text{"PP-Ráfia"} + PS$
Units: kg
- (091) $\text{"PP-Ráfia"} = \text{Coleta Seletiva} * \text{Percentual PPR coletado}$
Units: kg
- (092) $PS = \text{Coleta Seletiva} * \text{Percentual PS coletado}$
Units: kg
- (093) $\text{Qtde coletada per capita} = 135.645$
Units: kg/semestre
- (094) $\text{Qtde cooperados} = \text{Administrativo} + \text{Bolsões} + \text{Coletores porta a porta} + \text{Pessoal para triagem e separação}$
Units: R\$
- (095) $\text{Qtde de Rejeitos} = \text{Coleta Seletiva} * (1 - \text{Percentual Reciclagem})$
Units: kg
- (096) $\text{Qtde FG} = 20$
Units: Pessoas
- (097) $\text{Rateio cooperados} = ((\text{Qtde cooperados} * \text{Valor Salário Mínimo} + \text{Valor FG}) * 6) * \text{IPCA}$
Units: R\$
- (098) $\text{Receita Aerossol} = \text{Aerossol} * \text{"Valor/kg aerossol"}$
Units: R\$
- (099) $\text{Receita Alumínio} = \text{Alumínio} * \text{"Valor/kg alumínio"}$
Units: R\$
- (100) $\text{Receita APB} = \text{Apara de Papel Branco} * \text{"Valor/kg APB"}$
Units: R\$
- (101) $\text{Receita APJR} = \text{"Apara de Papel, Jornal e Revista"} * \text{"Valor/kg APJR"}$
Units: R\$
- (102) $\text{Receita Cobre} = \text{Cobre} * \text{"Valor/kg cobre"}$
Units: R\$
- (103) $\text{Receita com recicláveis} = \text{Soma Receita Outros} + \text{Soma Receitas Metais} + \text{Soma Receitas PEAD} + \text{Soma Receitas PET e Aparas} + \text{Soma Receitas PP e PS}$
Units: R\$
- (104) $\text{Receita EPS} = \text{"EPS (isopor)"} * \text{"Valor/kg EPS"}$
Units: R\$

- (105) Receita Ferro = Ferro * "Valor/kg ferro"
Units: R\$
- (106) Receita Motorzinho = Motorzinho * "Valor/kg Motorzinho"
Units: R\$
- (107) Receita Óleo = Óleo * "Valor/l óleo"
Units: R\$
- (108) Receita Papelão = Papelão * "Valor/kg papelão"
Units: R\$
- (109) Receita PET = PET * "Valor/kg PET"
Units: R\$
- (110) "Receita PET-L" = PET Leite * "Valor/kg PET-L"
Units: R\$
- (111) "Receita PET-O" = PET Óleo * "Valor/kg PET-O"
Units: R\$
- (112) Receita PFB = "PEAD - Plástico Fino Branco" * "Valor/kg PFB"
Units: R\$
- (113) Receita PFC = "PEAD - Plástico Fino Colorido" * "Valor/kg PFC"
Units: R\$
- (114) Receita PP = PP * "Valor/kg PP"
Units: R\$
- (115) Receita PPR = "PP-Ráfia" * "Valor/kg PPR"
Units: R\$
- (116) Receita PS = PS * "Valor/kg PS"
Units: R\$
- (117) Receita SB = "PEAD - Sopros Branco" * "Valor/kg SB"
Units: R\$
- (118) Receita SC = "PEAD - Sopros Colorido" * "Valor/kg SC"
Units: R\$
- (119) Receita Tetra Pak = Tetra Pak * "Valor/kg TP"
Units: R\$
- (120) Receita total = Receita com recicláveis + Repasse DAAE
Units: R\$

- (121) Receita Vidro = "Valor/kg vidro" * Vidro
Units: R\$
- (122) Repasse DAAE = (Bolsão + Bônus + Contrato)*6
Units: R\$
- (123) ResíduosReciclados = INTEG (TxEnvioReciclagem/1000,1613.5)
Units: Toneladas
- (124) RSU coletado = População * Qtde coletada per capita
Units: kg/semestre
- (125) Salário = (1780 * Nro de funcionários * 6) * IPCA
Units: R\$
- (126) SAVEPER= TIME STEP
Units: Semester [0,?]
The frequency with which output is stored.
- (127) Seguro e Impostos = 1000 * Caminhões
Units: R\$
- (128) Soma Receita Outros = Receita EPS + Receita Óleo + Receita Papelão + Receita Tetra Pak + Receita Vidro
Units: R\$
- (129) Soma Receitas Metais = Receita Aerossol + Receita Alumínio + Receita Cobre + Receita Ferro + Receita Motorzinho
Units: R\$
- (130) Soma Receitas PEAD = Receita PFB + Receita PFC + Receita SB + Receita SC
Units: R\$
- (131) Soma Receitas PET e Aparas = Receita APB + Receita APJR + Receita PET + "Receita PET-L" + "Receita PET-O"
Units: R\$
- (132) Soma Receitas PP e PS = Receita PP + Receita PPR + Receita PS
Units: R\$
- (133) Supermercado = 2000
Units: R\$
- (134) Telefone = 2100
Units: R\$
- (135) Tetra Pak = Coleta Seletiva * Percentual tetrapack coletado

Units: kg

(136) TIME STEP = 1

Units: Semester [0,?]

The time step for the simulation.

(137) Triagem e separação por pessoa = WITH LOOKUP (Time,

((1,30000)-(10,50000)],(1,35000),(4,35000),(5,42500),(10,50000)))

Units: kg

(138) Tx Cresc populacional = Crescimento Populacional * População

Units: Pessoas

(139) Tx despesas com pessoal = Despesas com cooperados + Despesas com funcionário

Units: R\$

(140) Tx lucro = Receita total - Despesa total

Units: R\$

(141) Tx outras despesas = Despesas administrativas + Despesas Manutenção

Units: R\$

(142) TxEnvio Aterro = RSU coletado * Percentual coleta domiciliar + Qtde de Rejeitos

Units: kg

(143) TxEnvio Compostagem = Percentual Compostagem * RSU coletado

Units: kg

(144) TxEnvioReciclagem = Coleta Seletiva * Percentual Reciclagem

Units: kg

(145) Usina = 3000

Units: R\$

(146) Vale Transporte = (200 * Nro de funcionários * 6) * IPCA

Units: R\$

(147) Valor FG = 200 * Qtde FG

Units: R\$

Valor mensal

(148) Valor Salário Mínimo = 1076.2 * 0.92

Units: R\$

Valor salário mínimo vezes 0,92 (excluído os 8% de INSS)

(149) "Valor/kg aerossol" = 0.55

Units: R\$/kg

- (150) "Valor/kg alumínio" = 2
Units: R\$/kg
- (151) "Valor/kg APB" = 0.3
Units: R\$/kg
- (152) "Valor/kg APJR" = 0.06
Units: R\$/kg
- (153) "Valor/kg cobre" = 1.5
Units: R\$/kg
- (154) "Valor/kg EPS" = 0.8
Units: R\$/kg
- (155) "Valor/kg ferro" = 0.2
Units: R\$/kg
- (156) "Valor/kg Motorzinho" = 0.5
Units: R\$/kg
- (157) "Valor/kg papelão" = 0.25
Units: R\$/kg
- (158) "Valor/kg PET" = 1.5
Units: R\$
- (159) "Valor/kg PET-L" = 0.05
Units: R\$/kg
- (160) "Valor/kg PET-O" = 0.3
Units: R\$/kg
- (161) "Valor/kg PFB" = 0.5
Units: R\$/kg
- (162) "Valor/kg PFC" = 0.25
Units: R\$/kg
- (163) "Valor/kg PP" = 0.1
Units: R\$/kg
- (164) "Valor/kg PPR" = 0.1
Units: R\$/kg
- (165) "Valor/kg PS" = 0.1
Units: R\$/kg

- (166) "Valor/kg SB" = 1
Units: R\$/kg
- (167) "Valor/kg SC" = 0.9
Units: R\$/kg
- (168) "Valor/kg TP" = 0.2
Units: R\$/kg
- (169) "Valor/kg vidro" = 0.07
Units: R\$/kg
- (170) "Valor/l óleo" = 1
Units: R\$/kg
- (171) Veículos = 1000
Units: R\$
- (172) Vidro = Coleta Seletiva * Percentual vidro coletado
Units: kg

Anexo III - Cálculo da cobertura das despesas pelo comércio de recicláveis

Semestre	Cenários 1-3			Cenário 2			Cenário 4			Cenários 5-6		
	Despesa total	Receita com recicláveis	%	Despesa total	Receita com recicláveis	%	Despesa total	Receita com recicláveis	%	Despesa total	Receita com recicláveis	%
1	R\$ 1.529.134,25	R\$ 329.755,78	21,56%	R\$ 1.529.134,25	R\$ 329.755,78	21,56%	1.529.134,25	R\$ 329.755,78	21,56%	R\$ 1.529.134,25	R\$ 329.755,78	21,56%
2	R\$ 1.595.101,63	R\$ 332.201,53	20,83%	R\$ 1.625.279,13	R\$ 351.026,28	21,60%	1.595.101,63	R\$ 332.201,53	20,83%	R\$ 1.625.279,13	R\$ 351.026,28	21,60%
3	R\$ 1.594.410,75	R\$ 334.615,09	20,99%	R\$ 1.662.145,38	R\$ 372.538,19	22,41%	1.594.410,75	R\$ 334.615,09	20,99%	R\$ 1.662.145,38	R\$ 372.538,19	22,41%
4	R\$ 1.663.221,88	R\$ 336.995,53	20,26%	R\$ 1.764.842,75	R\$ 394.284,78	22,34%	1.663.221,88	R\$ 336.995,53	20,26%	R\$ 1.764.842,75	R\$ 394.284,78	22,34%
5	R\$ 1.663.292,25	R\$ 339.341,88	20,40%	R\$ 1.772.610,00	R\$ 397.029,94	22,40%	1.647.922,63	R\$ 339.341,88	20,59%	R\$ 1.649.653,25	R\$ 397.029,94	24,07%
6	R\$ 1.735.752,75	R\$ 341.653,09	19,68%	R\$ 1.849.273,88	R\$ 399.734,09	21,62%	1.711.800,13	R\$ 341.653,09	19,96%	R\$ 1.713.542,50	R\$ 399.734,09	23,33%
7	R\$ 1.735.821,00	R\$ 343.928,31	19,81%	R\$ 1.849.353,75	R\$ 402.396,16	21,76%	1.711.868,38	R\$ 343.928,31	20,09%	R\$ 1.713.622,38	R\$ 402.396,16	23,48%
8	R\$ 1.805.782,50	R\$ 346.166,63	19,17%	R\$ 2.049.367,00	R\$ 471.940,47	23,03%	1.772.705,25	R\$ 346.166,63	19,53%	R\$ 1.817.825,13	R\$ 471.940,47	25,96%
9	R\$ 1.805.848,50	R\$ 348.366,97	19,29%	R\$ 2.192.056,25	R\$ 542.291,25	24,74%	1.772.771,25	R\$ 348.366,97	19,65%	R\$ 1.902.629,13	R\$ 542.291,25	28,50%
10	R\$ 1.888.817,13	R\$ 350.528,56	18,56%	R\$ 2.430.618,75	R\$ 613.425,00	25,24%	1.845.759,63	R\$ 350.528,56	18,99%	R\$ 2.051.711,63	R\$ 613.425,00	29,90%
11	R\$ 1.888.880,88	R\$ 352.650,50	18,67%	R\$ 2.439.341,75	R\$ 617.138,44	25,30%	1.845.823,38	R\$ 352.650,50	19,11%	R\$ 2.060.434,50	R\$ 617.138,44	29,95%
12	R\$ 1.969.407,50	R\$ 354.731,81	18,01%	R\$ 2.531.634,75	R\$ 620.780,75	24,52%	1.915.770,88	R\$ 354.731,81	18,52%	R\$ 2.147.238,50	R\$ 620.780,75	28,91%
13	R\$ 1.969.468,75	R\$ 356.771,69	18,12%	R\$ 2.540.681,25	R\$ 624.350,50	24,57%	1.915.832,13	R\$ 356.771,69	18,62%	R\$ 2.147.345,75	R\$ 624.350,50	29,08%
14	R\$ 2.053.787,13	R\$ 358.769,28	17,47%	R\$ 2.646.602,00	R\$ 627.846,19	23,72%	1.988.815,75	R\$ 358.769,28	18,04%	R\$ 2.238.210,50	R\$ 627.846,19	28,05%
15	R\$ 2.053.845,75	R\$ 360.723,69	17,56%	R\$ 2.655.986,25	R\$ 631.266,38	23,77%	1.988.874,38	R\$ 360.723,69	18,14%	R\$ 2.238.313,00	R\$ 631.266,38	28,20%
16	R\$ 2.143.574,50	R\$ 362.634,06	16,92%	R\$ 2.769.026,75	R\$ 634.609,63	22,92%	2.066.413,00	R\$ 362.634,06	17,55%	R\$ 2.334.992,75	R\$ 634.609,63	27,18%
17	R\$ 2.143.630,50	R\$ 364.499,63	17,00%	R\$ 2.778.769,75	R\$ 637.874,38	22,96%	2.066.468,88	R\$ 364.499,63	17,64%	R\$ 2.344.735,75	R\$ 637.874,38	27,20%
18	R\$ 2.235.667,00	R\$ 366.319,59	16,39%	R\$ 2.884.926,25	R\$ 641.059,31	22,22%	2.145.524,00	R\$ 366.319,59	17,07%	R\$ 2.434.211,25	R\$ 641.059,31	26,34%
19	R\$ 2.235.720,00	R\$ 368.093,16	16,46%	R\$ 2.895.035,25	R\$ 644.163,00	22,25%	2.145.577,25	R\$ 368.093,16	17,16%	R\$ 2.444.320,25	R\$ 644.163,00	26,35%
20	R\$ 2.307.025,25	R\$ 369.819,53	16,03%	R\$ 2.997.567,00	R\$ 647.184,19	21,59%	2.213.995,00	R\$ 369.819,53	16,70%	R\$ 2.522.079,75	R\$ 647.184,19	25,66%

Fonte: Elaborado pelo autor