

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO
URBANO PARA COPROCESSAMENTO: UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-
ALOCUÇÃO DE FACILIDADE MULTIOBJETIVO

Yuka Akasaka

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Transportes, COPPE, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Transportes.

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Rio de Janeiro
Junho de 2015

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO
URBANO PARA COPROCESSAMENTO: UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-
ALOCÇÃO DE FACILIDADE MULTIOBJETIVO

Yuka Akasaka

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Luís Alberto Duncan Rangel, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2015

Akasaka, Yuka

Estruturação do Sistema Logístico Reverso do Resíduo Sólido Urbano para Coprocessamento: Um Problema de Localização-Alocação de Facilidade Multiobjetivo/Yuka Akasaka. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XI, 115 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Márcio de Almeida D’Agosto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 95-101.

1. Sistema Logístico Reverso do Resíduo Sólido Urbano. 2. Gestão de Resíduos. 3. Problema de Localização-Alocação Multiobjetivo. I. D’agosto, Márcio de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo amor incondicional e por todo apoio e incentivo aos estudos em toda a minha vida. Em especial agradeço a minha irmã, Naomi Akasaka, que acompanhou este processo de perto e me apoiou nas inúmeras revisões de artigos e dissertação. Agradeço pela paciência e dedicação pela minha pessoa.

A todos os meus amigos, por entenderem a minha ausência e mesmo assim estarem presentes quando precisei. Agradeço pela amizade eterna e por tornarem os meus dias mais prazerosos e divertidos.

Aos amigos conquistados no mestrado, que tornaram a vivência e o estudo mais especiais. Em especial a Amanda Fernandes Ferreira, em que pude compartilhar uma experiência única no MIT. Agradeço pelas inúmeras conversas sobre os estudos e a vida, pelos incentivos e pelo carinho.

Ao meu namorado Frédéric Kuonen pela cumplicidade, por me apoiar a manter o foco e por estar disponível sempre quando precisei. Agradeço pela compreensão e estímulo que recebi para conseguir concluir este trabalho.

Aos professores da banca examinadora, Prof. D.Sc. Glaydston Mattos Ribeiro e Prof. D.Sc. Luís Alberto Duncan Rangel, por terem gentilmente aceitado fazer parte da minha banca.

Aos funcionários do Programa de Engenharia de Transportes, por gentilmente apoiarem todos os processos administrativos e pela prontidão no atendimento quando necessitei.

Aos amigos da Lafarge que durante grande parte desta jornada fizeram parte do meu cotidiano. Agradeço pela compreensão e apoio.

E por último agradeço especialmente ao Prof. D.Sc. Márcio de Almeida D'Agosto pela dedicação, tempo e atenção na orientação deste trabalho. Por todo conhecimento compartilhado, compreensão, incentivo, gentileza e confiança. Agradeço pela oportunidade de ser sua orientanda.

Meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO
URBANO PARA COPROCESSAMENTO: UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO-
ALOCÇÃO DE FACILIDADE MULTIOBJETIVO

Yuka Akasaka

Junho/2015

Orientador: Márcio de Almeida D'Agosto

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho propõe um procedimento para avaliar o comportamento do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano (RSU) com a inclusão do coprocessamento no sistema existente, levando em consideração parâmetros econômicos e ambientais. Para tanto, primeiramente integram-se os conceitos da logística reversa e gestão de resíduos, seguido pela sintetização dos artigos encontrados na revisão bibliográfica narrativa para elaboração do modelo conceitual do sistema. Dessa forma, identifica-se a necessidade da definição da localidade de uma planta intermediária e alocação das ofertas do RSU para otimização e estruturação do sistema. Através da programação linear inteira mista e pelo método *e-constraint* desenvolve-se o modelo matemático para a resolução deste problema. A partir dos resultados obtidos, elabora-se o procedimento e aplica-se como estudo de caso em uma região no Estado do Rio de Janeiro. O resultado da aplicação sugere que a utilização do coprocessamento seria uma alternativa que aumenta a sustentabilidade do sistema, levando a diminuição do descarte do RSU, da emissão de gases de efeito estufa e consumo energético pelos combustíveis fósseis. Entretanto, o resultado apresenta um aumento no custo total, que pode reduzir ao passar dos anos. Assim, este trabalho destaca-se pelo apoio que pode ser concedido ao Estado para a definição de uma gestão do RSU mais sustentável e economicamente viável.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STRUCTURING THE REVERSE LOGISTIC SYSTEM OF MUNICIPAL SOLID
WASTE TO COPROCESSING: A MULTIOBJECTIVE FACILITY LOCATION-
ALLOCATION PROBLEM

Yuka Akasaka

June/2015

Advisor: Márcio de Almeida D'Agosto

Department: Transportation Engineering

This work proposes a procedure to evaluate the behavior of reverse logistics system of municipal solid waste (MSW) by including coprocessing in the current system, and taking into account economic and environmental parameters. Firstly, the integration of the concepts of reverse logistics and waste management was done, and then was developed the conceptual model of the system by synthesizing the articles found in the narrative literature review, which identifies the need to define the location of an intermediary plant and allocation of the generated MSW for system optimization and structuring. Through mixed-integer linear programming and the *e*-constraint method is developed the mathematical model to solve this problem. From the obtained results, elaborates the procedure and applies as a case study in a region in the state of Rio de Janeiro. The result of the application suggests that the use of coprocessing is an alternative that increases the system's sustainability, leading to a diminishing of MSW disposal, greenhouse gas emission and energy consumption by fossil fuels. However, the result shows an increase in the total cost, which may decrease over the years. Therefore, this work stands out for supporting the state to define a sustainable and economically viable MSW management.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Motivação e justificativa	1
1.2 – Problemática	4
1.3 – Objeto de estudo	6
1.4 – Objetivo	6
1.5 – Estruturação da dissertação	6
2 – CONCEITUALIZAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO	8
2.1 – Logística reversa	8
2.2 – Gestão de resíduos	10
2.3 – Logística reversa do resíduo sólido urbano	12
2.4 – Classificação do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano	15
3 – MODELO CONCEITUAL DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA COPROCESSAMENTO	18
3.1 – Revisão bibliográfica	18
3.2 – Atividades da logística reversa do resíduo sólido urbano	26
3.2.1 – <i>Coleta</i>	26
3.2.2 – <i>Triagem e destinação</i>	27
3.2.3 – <i>Transporte</i>	28
3.2.4 – <i>Processamento</i>	29
3.2.5 – <i>Descarte</i>	30
3.2.6 – <i>Planta Intermediária</i>	32
3.3 – Modelo conceitual do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano	33
3.4 – Modelo conceitual do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano para coprocessamento	35
4 – MODELO MATEMÁTICO PARA ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA COPROCESSAMENTO	38
4.1 – Revisão bibliográfica	38
4.2 – Modelos matemáticos para a estruturação do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano	48
4.2.1 – <i>Problema de decisão multicritério</i>	49
4.2.2 – <i>Função objetivo e parâmetro de decisão</i>	52
4.3 – Formulação do modelo matemático para inclusão do coprocessamento	54
4.3.1 – <i>Funções objetivo</i>	54
4.3.2 – <i>Parâmetros e variáveis de decisão</i>	55
4.3.3 – <i>Restrições</i>	61
4.4 – Formulação do <i>baseline</i> do sistema	63
5 – PROCEDIMENTO PARA INCLUSÃO E ANÁLISE DO COPROCESSAMENTO NO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO	65

5.1 – Etapa 1: Definição da região de estudo	65
5.2 – Etapa 2: Identificação do sistema atual	66
5.3 – Etapa 3: Identificação da geração do resíduo sólido urbano	68
5.4 – Etapa 4: Desenho do sistema atual e cálculo do <i>baseline</i>	68
5.5 – Etapa 5: Definição dos locais candidatos da planta TMB	69
5.6 – Etapa 6: Identificação dos parâmetros de <i>input</i>	69
5.7 – Etapa 7: Definição dos valores de restrições das funções objetivo	70
5.8 – Etapa 8: Cálculo do modelo matemático multiobjetivo	71
5.9 – Etapa 9: Comparação e avaliação do resultado com <i>baseline</i>	72
5.10 – Etapa 10: Análise de sensibilidade	72
6 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO: ESTUDO DE CASO NO CONSÓRCIO DA REGIÃO SERRANA II	73
6.1 – Etapa 1: Definição da região de estudo	73
6.2 – Etapa 2: Identificação do sistema atual	74
6.2.1 – <i>Coleta</i>	74
6.2.2 – <i>Planta intermediária</i>	74
6.2.3 – <i>Processamento</i>	74
6.2.4 – <i>Descarte</i>	75
6.2.5 – <i>Transporte</i>	75
6.3 – Etapa 3: Identificação da geração do resíduo sólido urbano	76
6.4 – Etapa 4: Desenho do sistema atual e cálculo do <i>baseline</i>	77
6.5 – Etapa 5: Definição dos locais candidatos da planta TMB	79
6.6 – Etapa 6: Identificação dos parâmetros de <i>input</i>	80
6.7 – Etapa 7: Definição dos valores de restrições das funções objetivo	83
6.8 – Etapa 8: Cálculo do modelo matemático multiobjetivo	84
6.9 – Etapa 9: Comparação e avaliação do resultado com <i>baseline</i>	85
6.10 – Etapa 10: Análise de sensibilidade	86
7 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXOS	102
ANEXO I – RELATÓRIO DA VISITA TÉCNICA A UNIDADE DE TRATAMENTO DO RSU NO MUNICÍPIO DE CANTAGALO	102
ANEXO II – CÁLCULO DO CUSTO DE TRANSPORTE	109
ANEXO III – CÁLCULO DO <i>BASELINE</i> DETALHADO	111
ANEXO IV – CÁLCULO DE AMORTIZAÇÃO DO CUSTO DE INVESTIMENTO DA PLANTA TMB	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processos da Logística Reversa	9
Figura 2.2 – Hierarquização da Gestão Integrada	11
Figura 2.3 – Processos da Logística Reversa do Resíduo Sólido Urbano	14
Figura 3.1 – Modelo Conceitual do Sistema Logístico Reverso do RSU	34
Figura 3.2 – Modelo Conceitual do Sistema Logístico Reverso do RSU para Coprocessamento	37
Figura 4.1 – Sistema Logístico Reverso do RSU para Coprocessamento com as Respectivas Variáveis de Decisão	56
Figura 5.1 – Procedimento de Inclusão e Análise do Coprocessamento no Sistema Logístico Reverso do RSU	67
Figura 6.1 – Sistema Logístico Reverso do RSU da Região Serrana II	77
Figura 6.2 – Nós do Sistema Logístico Reverso do RSU Atual	80
Figura 6.3 – Comparação <i>Baseline</i> x Cenário com Coprocessamento	86
Figura 6.4 – Comparação <i>Baseline</i> x C1 x C2	89
Figura 6.5 – Evolução do Custo de Descarte em R\$/t	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação dos Métodos de Valorização da Logística Reversa com a Hierarquização da GIRS	12
Tabela 2.2 – Classificação do Sistema Logístico Reverso do Resíduo Sólido Urbano .	16
Tabela 3.1 – Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU	20
Tabela 4.1 – Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU	40
Tabela 4.2 – Métodos Utilizados no Problema de Decisão Multiobjetivo (MODM) ...	50
Tabela 4.3 – Relação das Funções Objetivo e Parâmetros de Decisão	53
Tabela 4.4 – Notações das Variáveis de Decisão Utilizado para Formulação do Modelo	56
Tabela 6.1 – Geração de RSU do Consórcio da Região Serrana II	76
Tabela 6.2 – Composição Gravimétrica do RSU no Brasil (em %)	76
Tabela 6.3 – <i>Baseline</i> do Consórcio da Região Serrana II	79
Tabela 6.4 – Resultado do Problema Mono-objetivo e Cálculo das Demais Funções ..	84
Tabela 6.5 – Restrições para Resolução do Problema Multiobjetivo	84
Tabela 6.6 – Resultado do Problema Multiobjetivo	85
Tabela 6.7 – Comparação - <i>Baseline</i> x Cenário com Coprocessamento	85
Tabela 6.8 – Comparação Detalhada - <i>Baseline</i> x Cenário com Coprocessamento	87
Tabela 6.9 – Comparação Detalhada - <i>Baseline</i> x C1 x C2	88
Tabela 6.10 – Comparação Detalhada – B1 x B2 x B3 x C1 x C2	90

LISTA DE SIGLAS

ABCP – Associação brasileira de cimento Portland.
ABRELPE – Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais.
CBA – *Cost-benefit analysis*.
CEA – Coordenadoria de educação ambiental.
CF – Combustível fóssil.
CNI – Confederação nacional da Indústria.
EC – *European commission*.
EPA – *Environmental Protection Agency*.
EUBIONET – *European bioenergy networks*.
FEAM – Fundação estadual do meio ambiente.
GEE – Gases de efeito estufa.
GIRS – Gestão integrada do resíduo sólido.
GWP – *Global Warming Potential*.
IBAM – Instituto brasileiro de administração municipal.
IPTS – *Institute for prospective technological studies*.
ISWA – *International solid waste association*.
LCA – *Life cycle assessment*.
MADM – *Multi-attribute decision making*.
MMA – Ministério do meio ambiente.
MODM – *Multi-objective decision making*.
NTC – Associação nacional do transporte de carga e logística.
PEV – Pontos de entrega voluntária.
PLIM – Programação linear inteira mista.
RDF – *Refuse derived fuel*.
RSU – Resíduo sólido urbano.
SMA – Secretaria do meio ambiente.
SNIC – Sindicato nacional da indústria cimenteira.
TMB – Tratamento mecânico-biológico.
UE – União Europeia.
WTE – *waste-to-energy*.

1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os aspectos introdutórios desta dissertação. Primeiramente, apresenta-se a motivação, a justificativa e a problemática para contextualização e visão geral deste trabalho. Em seguida, o objeto de estudo e o objetivo são apresentados, sendo o último detalhado em geral e específicos. Por fim, apresenta-se a estrutura na qual este trabalho está sendo conduzida.

1.1 – Motivação e justificativa

Populações urbanas cresceram cerca de 68% entre 1990 e 2013 chegando ao patamar de 3,7 bilhões de pessoas. A América Latina e a região do Caribe se destacam neste crescimento com 79% da população concentrada em grandes centros urbanos (World Bank, 2014). A tendência à urbanização tem implicações econômicas, sociais e ambientais e uma das principais consequências diretas que abrangem estes três aspectos é o aumento da produção de resíduos.

No Brasil, o aumento da geração do resíduo sólido urbano (RSU) é crescente e contínuo. Em 2013 foram gerados cerca de 76 milhões de toneladas de resíduos, aumento de 4,1% em relação ao ano anterior, representando um aumento na geração per capita de 0,39% (ABRELPE, 2013). A necessidade de estruturação da gestão do resíduo urbano é primordial para que este crescimento aconteça de forma sustentável e em prol da qualidade de vida da população.

O sistema de gestão do RSU pode se apresentar com várias estruturas e consequentemente com resultados diversos devido não apenas à composição gravimétrica do resíduo, mas também ao histórico de desenvolvimento deste tema em cada país.

Nos EUA foram gerados em 2011 cerca de 250 milhões de toneladas de resíduos, sendo que 26% foram reciclados, 8,7% compostados, 11,6% conduzidos para combustão com recuperação energética e 53,8% descartados em aterros sanitários (EPA, 2011). Em 2012, a geração de resíduo dos 27 países que compõem a União

Europeia (UE) foi de 244 milhões de toneladas, nos quais 27% foram reciclados, 14,7% compostados, 23,7% encaminhados para combustão com recuperação energética e 34,4% descartados em aterros sanitários (EUROSTAT, 2014).

Já na China, em 2006, a geração estimada de RSU foi de aproximadamente 212 milhões de toneladas, no entanto apenas 148 milhões de toneladas foram coletados e transportados. Deste montante 6,4% foram incinerados, 2,2% passaram por compostagem e cerca de 91,4% dos resíduos foram encaminhados para os aterros sanitários. Aproximadamente 64 milhões de toneladas, 30% dos resíduos gerados, não foram controlados (Zhang *et al.*, 2010).

No Brasil, de acordo com ABRELPE (2013), foi estimada a geração de resíduos para o ano de 2013 em 209 toneladas ao dia, ou seja, 76 milhões de toneladas ao ano. Destes foram coletados cerca de 69 milhões de toneladas, porém não foi possível encontrar um panorama geral da gestão do RSU por tipo de processamento. Além disso, cerca de 28,8 milhões de toneladas de resíduos coletados foram destinados aos locais inadequados, como aterros controlados e lixões.

Dessa forma, entende-se que o aumento da geração de resíduo não está sendo acompanhado na mesma velocidade pela estruturação no setor. A constituição da política nacional de resíduos sólidos pela Lei 12.305 definiu como uma das principais diretrizes a extinção dos lixões até 2014, porém no ano anterior ao prazo era possível verificar ainda o uso de locais impróprios de descarte por 60% dos municípios brasileiros (ABRELPE, 2013).

Percebe-se uma grande discrepância entre os resultados da gestão de resíduos nos países em desenvolvimento em comparação aos países desenvolvidos. No entanto, mesmo em países desenvolvidos ainda é destinado uma quantidade expressiva de resíduo para descarte nos aterros sanitários. Em 2011 os EUA destinaram cerca de 134 milhões de toneladas aos aterros sanitários, e em 2012 na UE cerca de 84 milhões de toneladas (EPA, 2011; EUROSTAT, 2014).

Dentre as formas de tratamento e recuperação de valor do RSU – reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética - pode-se considerar que o

processo de combustão com recuperação energética se destaca pela sua flexibilidade em processar resíduos de vários tipos que podem estar misturados. Desta forma, esta alternativa é a mais favorável à diminuição do envio de resíduos para descarte em aterros sanitários em relação às demais alternativas (EPA, 1974; Stehlík *et al.*, 2012).

Uma questão relevante para viabilização do processo de combustão com recuperação energética é o poder calorífico do material (IBAM, 2001; Brizio & Genon, 2008). Levando em consideração as características dos países em desenvolvimento, com quantidade expressiva de resíduos orgânicos (Zhang *et al.*, 2010), o modelo de combustão com recuperação energética que parece ter maior potencial de aplicação é o coprocessamento, já que nas demais formas de combustão com recuperação energética têm-se a necessidade de complemento com fontes primárias de energia ou resíduos com poder calorífico equivalente para a manutenção do poder calorífico do material que alimenta os fornos (ABRELPE & ISWA, 2013).

O coprocessamento é o uso de resíduos como combustível ou matéria-prima em substituição aos recursos minerais naturais e combustíveis fósseis, geralmente em indústrias com utilização intensa de energia, como indústria de cimento, aço e vidro (EUBIONET, 2003; IPTS, 2003; CNI-ABCP, 2012; Murtz & Morf, 2007).

Assim, esta dissertação elabora um procedimento para inserção do coprocessamento como forma de valorização do RSU no sistema existente. Para tanto, um dos desafios que perdura no tratamento e recuperação de valor do RSU, usualmente encontrado disperso em área urbana, está na estruturação de um sistema logístico reverso capaz de reconhecê-lo, coletá-lo, selecioná-lo e direcioná-lo de forma eficaz e eficiente para os diferentes processos produtivos onde será valorizado.

Além disso, a oferta inconstante de resíduos e a dificuldade de disponibilidade do mercado para o resíduo valorizado também são questões relevantes para se estruturar o sistema de forma otimizada, com o intuito de potencializar a viabilização da utilização do resíduo valorizado no mercado.

Neste contexto, a motivação desta dissertação é incentivar e apoiar o Estado no estabelecimento de um sistema logístico reverso do RSU ambientalmente sustentável,

com a utilização do coprocessamento que potencializa o aumento de resíduos valorizados e consequentemente a diminuição do descarte aos aterros sanitários.

1.2 – Problemática

A logística reversa tem recebido atenção progressiva nos últimos anos com o apoio da conscientização e mudança de comportamento dos consumidores e de ações proveniente da responsabilidade ambiental de instituições públicas e privadas.

As pesquisas sobre a logística reversa vêm crescendo desde os anos 60, contudo nota-se que houve um crescimento abrupto de publicações sobre o tema após o ano de 2005, mostrando inclusive o reconhecimento da logística reversa como um fator essencial no campo de estudo da logística e cadeia de suprimentos. No entanto, percebe-se que tem sido limitado os esforços para a sintetização da pesquisa em uma base integrada de conhecimento (Pokharel & Mutha, 2009).

Dentro do tema da logística reversa, os itens mais estudados são a recuperação de materiais, recuperação de peças, recuperação do produto - por meio da remanufatura - e o gerenciamento do resíduo (Pokharel & Mutha, 2009). Quando se trata da abordagem sobre a logística reversa associada ao resíduo, encontra-se na literatura estudos provenientes tanto da logística reversa quanto do campo de estudo da gestão de resíduos.

Da mesma forma que a logística reversa, a gestão de resíduos é um tema onde se nota um crescente interesse de pesquisadores, sendo o seu desenvolvimento direcionado por legislação com objetivos de melhoria da saúde pública e estruturação do setor.

Assim, a primeira problemática deste trabalho consiste na falta de integração e sintetização destes dois conceitos - logística reversa e gestão de resíduos. Estes dois campos de estudo vêm crescendo na literatura acadêmica de forma paralela. Este processo fez com que, apesar dos assuntos serem convergentes, revelasse a falta de integração dos conceitos, sendo possível encontrar muitas vezes terminologias diversas com o mesmo significado.

No âmbito prático observa-se grande diferença de resultados alcançados por meio da gestão do RSU. Esta diferença, como dito anteriormente, é considerável nos EUA e países da UE em relação ao Brasil e China. Isto se deve ao tempo de foco destes países ao assunto em questão, enquanto que a estruturação deste tema nos países em desenvolvimento se iniciou recentemente.

Vale ressaltar que mesmo entre os países desenvolvidos há uma considerável diferença entre os seus resultados. A UE, em comparação com os EUA, apresenta quase 70% a mais de massa de RSU sendo compostada e mais que o dobro passando por valorização energética. Tais diferenças nos resultados derivam das diferentes formas de estrutura do sistema (EPA, 2011; EUROSTAT, 2014).

Dessa forma, a segunda problemática desta dissertação consiste nas possibilidades de estruturação diversa que este sistema pode apresentar levando a necessidade de análise e caracterização das atividades da cadeia para sintetização do modelo e definição do sistema mais adequado para este trabalho.

Outro fator determinante para a estruturação deste sistema é a necessidade da caracterização específica do RSU para envio ao coprocessamento. Não é possível encaminhá-lo para os fornos industriais diretamente da forma como é coletado após o descarte, devendo passar por processos de tratamento para transformá-lo em um combustível alternativo.

Para tanto, é necessário incluir no sistema logístico reverso existente uma etapa intermediária entre as atividades de coleta e processamento do resíduo para o tratamento do RSU. Para esta etapa intermediária necessita-se a identificação da localidade ótima do seu posicionamento em função das ofertas de resíduos e destinações para as plantas de processamento, de modo a otimizar todo o sistema logístico reverso.

Idealmente este processo de otimização deveria considerar aspectos econômicos e ambientais, dando origem a um problema de otimização de múltiplas funções. Desta forma, em uma primeira abordagem, escolheu-se o problema de localização-alocação de facilidade multiobjetivo, tornando-se a terceira problemática deste trabalho.

1.3 – Objeto de estudo

O objeto de estudo desta dissertação é o sistema logístico reverso do RSU. Especificamente considerando a destinação do resíduo para o coprocessamento por meio do método de combustão.

1.4 – Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é definir um procedimento para analisar a inclusão do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU e verificar se o cenário estruturado é recomendável em relação ao cenário existente.

Assim sendo, os objetivos específicos são:

- Integrar os conceitos da logística reversa e de gestão de resíduos com o intuito de sintetizar os aspectos gerais de ambos os assuntos, bem como suas definições e conceitos;
- Identificar as características e atividades do sistema logístico reverso do RSU com o objetivo de definir um modelo conceitual que sirva de apoio na estruturação do sistema para o coprocessamento;
- Definir o modelo matemático de localização-alocação de facilidade multiobjetivo que suporte na estruturação do cenário a ser definido; e
- Elaborar um procedimento que visa descrever as etapas para a inclusão e avaliação do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU existente.

1.5 – Estruturação da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. O presente e primeiro Capítulo retrata os aspectos introdutórios, descrevendo a motivação, justificativa, problemática e objetivos geral e específico que regem este trabalho.

O segundo Capítulo apresenta os aspectos gerais da logística reversa e da gestão de resíduos, conceituando o objeto de pesquisa desta dissertação. O terceiro e quarto

Capítulos contextualizam a dissertação por meio de uma revisão bibliográfica narrativa. O Capítulo 3 apresenta o detalhamento das atividades do sistema logístico reverso do RSU analisando cada atividade e característica. Este capítulo visa definir o modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento.

O quarto Capítulo avalia os modelos matemáticos utilizados na literatura para a estruturação do sistema do RSU, além de abordar o problema de localização-alocação multiobjetivo no intuito de possibilitar a definição do método matemático que apoiará no processo de inserção do coprocessamento no sistema logístico reverso.

O quinto Capítulo define o procedimento para inclusão e análise do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU. O procedimento divide-se em 10 etapas, detalhando-as de forma abrangente com a finalidade de se obter um resultado que possa ser aplicado em qualquer sistema existente.

O sexto Capítulo utiliza a base conceitual e o procedimento descrito nos capítulos anteriores para a aplicação no estudo de caso, realizado no consórcio da Região Serrana II. Este capítulo, da mesma forma que o capítulo anterior, divide-se em 10 partes com o detalhamento desde a coleta de informações até a obtenção e análise dos resultados.

E, por fim, no sétimo Capítulo são descritos as considerações finais e conclusão deste trabalho, bem como, limitações do estudo e sugestões para novas abordagens para trabalhos posteriores.

2 – CONCEITUALIZAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

A logística reversa e a gestão de resíduos são dois assuntos em ascensão que vem recebendo importância em prol dos temas ambientais que estão em evidência globalmente. O assunto da logística reversa associada ao resíduo sólido pode ser encontrado nestes dois campos de estudos, que são convergentes, porém não são integrados.

Este capítulo tem como objetivo fundir os conceitos da logística reversa e gestão de resíduos. Primeiramente, introduz-se os aspectos gerais de ambos os conceitos, bem como suas definições. Após este processo, identifica-se as semelhanças e distinções, contextualizando e classificando a logística reversa do resíduo sólido com o objetivo de integração e simplificação do entendimento deste assunto.

2.1 – Logística reversa

Assim como no caso da logística, existem muitas variações na definição da logística reversa. Rogers & Tibben-Lembke (1998), autores tradicionais deste assunto, conceituam como “o processo de movimentar produtos dos seus típicos destinos finais com o objetivo de capturar valor ou destinar adequadamente”. Apesar de ser uma forma simples de definição, evidencia características básicas para diferenciação da logística direta, tendo o fluxo inverso e com objetivo de valorização do produto/resíduo movimentado.

A logística reversa pode movimentar tanto produtos quanto resíduos, pois esta estrutura-se tanto no sistema pós-venda com a movimentação de produtos, quanto no sistema de pós-consumo com a movimentação de resíduos.

Independente do produto ou resíduo existem quatro atividades que fazem parte de qualquer sistema logístico reverso: coleta, inspeção, triagem e destinação. A coleta refere-se às atividades de movimentação para consolidação do produto/resíduo para inserção no sistema logístico reverso. A inspeção é a verificação da qualidade e/ou característica do produto/resíduo. Após esses processos, o produto/resíduo pode ser

triado e destinado adequadamente para os métodos de valorização conveniente (Rogers & Tibben-Lembke, 1998; De Brito & Dekker, 2003; Fleischmann *et al.*, 2000).

Os métodos de valorização são inúmeros. Caso o produto/resíduo esteja com uma boa qualidade sem necessidade de reparo, pode sofrer utilização direta e inserido quase que imediatamente no mercado na forma de revenda/reuso, venda com desconto e redistribuição. Nos casos em que esteja com problemas de qualidade, é necessário passar por um reprocessamento, que pode ser em níveis variados, conforme definição de Thierry *et al.* (1995): nível do produto (reparo), nível de módulos (remodelagem), nível de componente (remanufatura), nível de peça parte (recuperação), nível de material (reciclagem) e nível energético (incineração). Nos casos em que não há mais possibilidade de valorização, este é encaminhado para o descarte, usualmente aos aterros sanitários (De Brito & Dekker, 2003; Rogers & Tibben-Lembke, 1998; Mckinnon *et al.*, 2010; e Thierry *et al.*, 1995).

Na Figura 2.1 é possível visualizar os processos descritos até então. A pirâmide mostra a hierarquização dos métodos de valorização sendo um modelo adaptado do processo de logística reversa apresentada por De Brito & Dekker (2003).

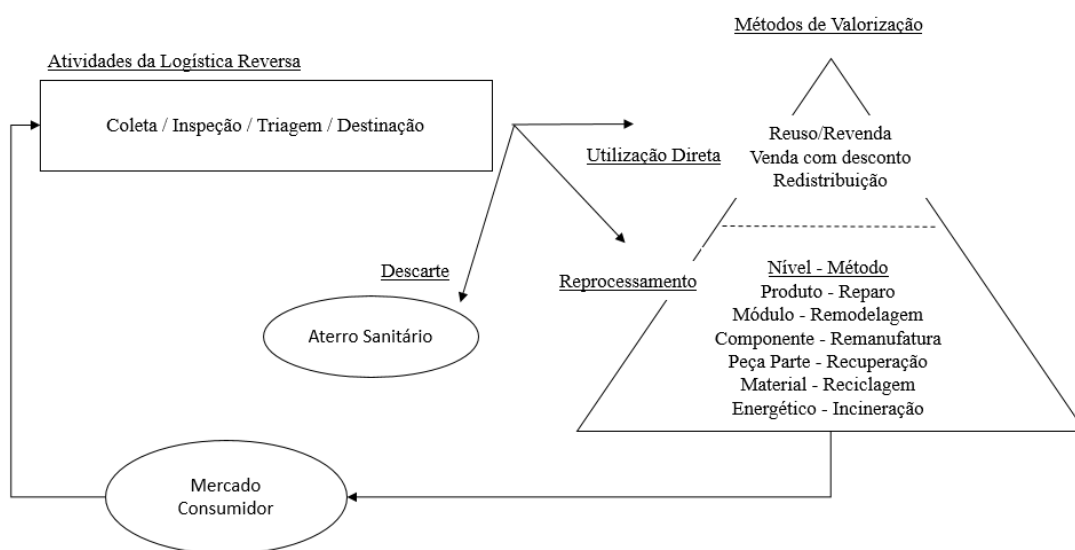


Figura 2.1: Processos da Logística Reversa. **Fonte:** Adaptado de De Brito & Dekker (2003).

Alguns autores não mencionam ou não consideram a incineração como um método de reprocessamento, pois entendem o processo de incineração como um método

de combustão para descarte, sem recuperação energética (Thierry *et al.*, 1995; Rogers & Tibben-Lembke, 1999; Mckinnon *et al.*, 2010; Fleischmann *et al.*, 2000). Especificamente, Fleischmann *et al.* (2000) e Thierry *et al.* (1995) direcionam este processo para a área de gestão de resíduos.

2.2 – Gestão de resíduos

O resíduo sólido é definido por IBAM (2001) que o classifica quanto à natureza ou origem, que podem ser agrupadas em cinco classes: lixo doméstico ou residencial; lixo comercial, que pode ser subdividido naquele gerado em pequenos geradores e grandes geradores; lixo público; lixo domiciliar especial, que compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas e pneus; e lixos de fontes especiais, com características peculiares, como lixo radioativo ou industrial.

O lixo doméstico e o lixo comercial constituem o chamado lixo domiciliar, que é o foco de estudo desta dissertação, que se denomina como RSU neste trabalho. Não será tratada nesta dissertação a logística reversa dos demais resíduos apresentados anteriormente.

Assim sendo, de acordo com EPA (1974), o campo da gestão de resíduos estuda o tema estruturando-o em 4 atividades: coleta, transporte, processamento e disposição. A atividade de coleta é o serviço de remoção do resíduo da sua geração, normalmente realizada pelas prefeituras, através do transporte do resíduo para o próximo ponto subsequente, podendo ser um local para processamento ou disposição (SMA/CEA, 2011; EPA, 1995).

Complementando esta definição, foi estabelecido em 1989 nos EUA pela *Environmental Protection Agency* (EPA) o conceito da gestão integrada dos resíduos, que define uma hierarquia do processo de valorização que se constitui em quatro níveis: redução/reuso, reciclagem/compostagem, combustão com recuperação energética e descarte.

Na Europa, a hierarquização utilizada para a gestão integrada é composta por 5 níveis: prevenção/redução, reuso, reciclagem, outros meios de recuperação e descarte

(EC, 2010). Já no Brasil, a política nacional de resíduos sólidos estabelece que na gestão do resíduo sólido deva-se seguir a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Dessa forma, a Figura 2.2 apresenta a hierarquização da gestão integrada representada por uma pirâmide invertida, em que a priorização deve ocorrer de cima para baixo. Os níveis de hierarquização da gestão integrada apresentada por vários países foram mesclados com o intuito de abranger e detalhar todos os níveis possíveis de valorização. Além disso, percebe-se que as atividades de processamento e disposição fazem parte da hierarquia da gestão integrada.

A estrutura apresentada na Figura 2.2, é um modelo adaptado de EC (2010) e ABRELPE & ISWA (2013). EC (2010) apresenta a hierarquização na forma de uma pirâmide invertida e ABRELPE & ISWA (2013) detalha o modelo com a indicação da priorização dos níveis da gestão integrada.

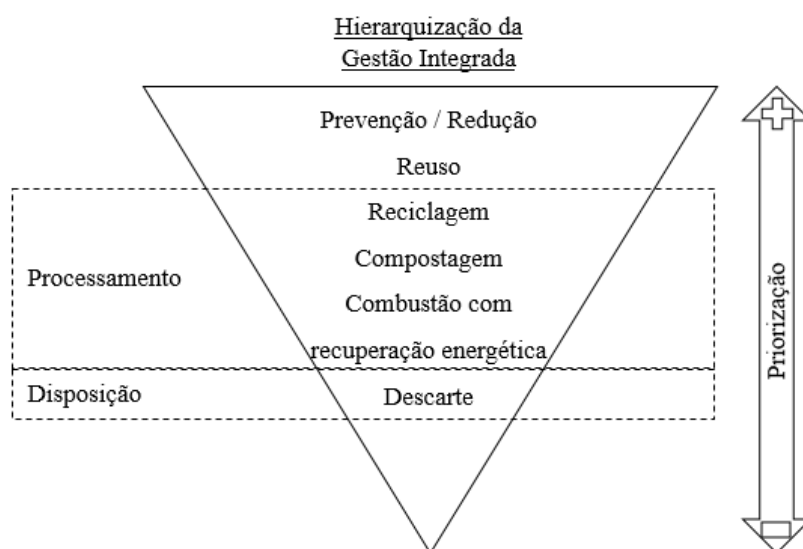


Figura 2.2: Hierarquização da Gestão Integrada. **Fonte:** Adaptados de EC (2010) e ABRELPE & ISWA (2013).

As atividades de coleta e transporte não fazem parte dos níveis da hierarquização em si, como as atividades de processamento e a disposição. No entanto, são atividades integradas a este processo, que ocorrem entre os níveis da gestão integrada.

Dessa forma, percebe-se que assim como na logística reversa, a gestão de resíduos mostra uma estrutura de atividades e hierarquização dos métodos de valorização do resíduo. Na próxima seção apresenta-se a integração destes dois conceitos.

2.3 – Logística reversa do resíduo sólido urbano

A partir desta contextualização entende-se que a logística reversa e a gestão de resíduos tem características similares. Os métodos de valorização da logística reversa e a hierarquização da Gestão Integrada do Resíduo Sólido (GIRS) podem ser comparados na Tabela 2.1, onde percebe-se semelhanças na abordagem nos dois campos de estudos.

Tabela 2.1: Comparação dos Métodos de Valorização da Logística Reversa com a Hierarquização da GIRS.

Atividade	Método de valorização da logística reversa		Hierarquização da gestão integrada do resíduo sólido
Utilização Direta	Reuso		Prevenção / Redução
	Revenda		Reuso
Reprocessamento ou Processamento	Produto	Reparo	
	Módulo	Remodelagem	
	Componente	Remanufatura	
	Peça Parte	Recuperação	
	Material	Reciclagem	Reciclagem / Compostagem
	Energético	Incineração	Combustão com recuperação energética
Disposição ou Descarte	Aterro Sanitário		Aterro Sanitário
			Combustão sem recuperação energética

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os métodos de valorização de reparo, remodelagem, remanufatura e recuperação que se apresentam da logística reversa não são compatíveis com nenhum nível na GIRS. Isso deve-se ao motivo da logística reversa se estruturar tanto no sistema pós-venda, com a movimentação de produtos, quanto no sistema de pós-consumo, com a movimentação de resíduos. Já a gestão de resíduos apenas movimenta resíduos no sistema de pós-consumo, portanto, os métodos de valorização que se referem ao produto não se encaixam na hierarquização da GIRS.

Ainda se observa na Tabela 2.1 que a gestão de resíduos considera a combustão sem a valorização energética com o objetivo de descarte do resíduo com uma granulometria menor. No entanto, na logística reversa, que se caracteriza pelo objetivo

de valorização do produto/resíduo, a combustão de resíduos deve ser considerada apenas para a recuperação e valorização energética na forma de reprocessamento.

As atividades da logística reversa e da gestão de resíduos também são semelhantes. Sendo as atividades da logística reversa - coleta, inspeção, triagem e destinação - e da gestão de resíduos - coleta, transporte, processamento e disposição - são coincidentes em ambos os campos de estudo.

A atividade de processamento da gestão de resíduos apresenta-se como reprocessamento na logística reversa, e a atividade de disposição como descarte, além da atividade de transporte que interliga todo processo de movimentação do produto/resíduo. Para a conceitualização da logística reversa do RSU, neste trabalho, utilizam-se as nomenclaturas “processamento” e “descarte”.

Além disso, a atividade da coleta, na logística reversa, é o processo no qual se inclui a atividade de transporte até a localidade da atividade de inspeção. Já na gestão de resíduos, a atividade de coleta é definida apenas como remoção do resíduo, definindo o processo de movimentação para a próxima localidade, como a atividade de transporte. Neste trabalho, utiliza-se o conceito da gestão de resíduos.

Assim sendo, adapta-se os conceitos descritos anteriormente para o processo logístico reverso do RSU apresentado na Figura 2.3, em que procura integrar a estrutura da logística reversa apresentada por De Brito & Dekker (2003) e da gestão de resíduos apresentados por EC (2010) e ABRELPE & ISWA (2013).

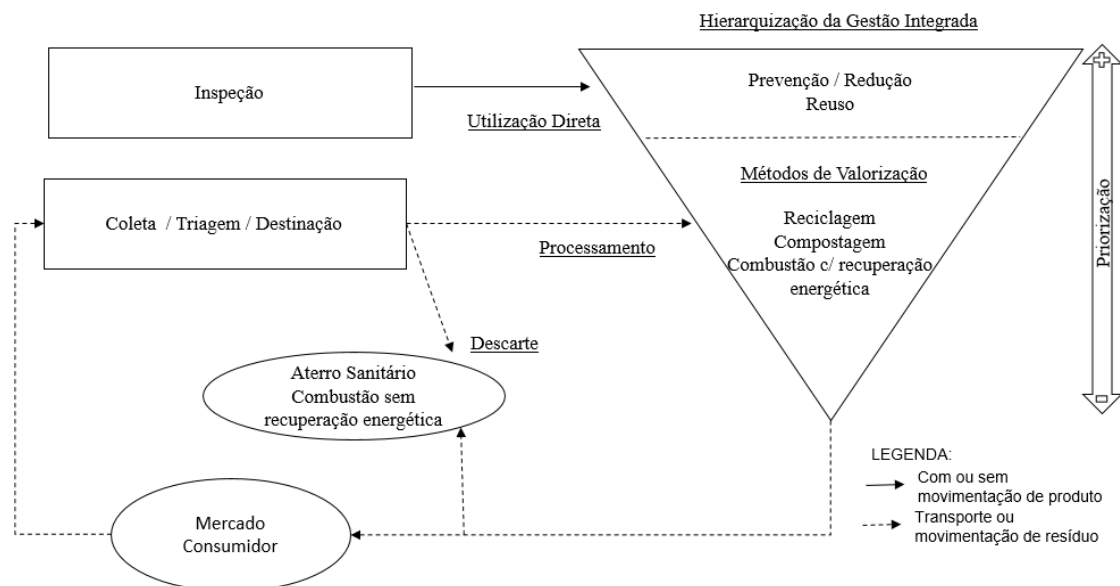


Figura 2.3: Processos da Logística Reversa do Resíduo Sólido Urbano. **Fonte:** Adaptados de De Brito & Dekker (2003); EC (2010); ABRELPE & ISWA (2013).

Percebe-se que a atividade de inspeção na logística reversa do resíduo sólido urbano ocorre antes da atividade de coleta e com o intuito de utilização direta do resíduo - prevenção, redução e reuso. Após esgotada esta possibilidade, o resíduo precisa passar por algum método de valorização para ser reutilizado no mercado, iniciando este processo pela atividade de coleta.

Ainda, a atividade de inspeção para a prevenção, redução e reuso, ocorre com ou sem a movimentação do produto/resíduo. A prevenção e redução do resíduo normalmente ocorre no mesmo local em que ocorre a atividade de inspeção. Já o reuso pode levar a movimentação do resíduo, retornando à localidade original após o processo de inspeção.

Já a atividade de descarte, que na gestão de resíduos apresenta-se no último nível da hierarquização, na Figura 2.3 apresenta-se como um processo a parte, como na logística reversa. Pois define-se como uma destinação final do resíduo, não sendo possível voltar ao mercado consumidor como acontece nos demais níveis da pirâmide.

Ainda, todos os métodos de valorização apresentados na atividade de processamento geram rejeitos no processo que devem ser encaminhados para descarte.

Desta maneira, a estruturação da gestão de resíduos pode ser elaborada na forma de um sistema logístico reverso com os mesmos padrões de atividades e hierarquização. Assim sendo, o sistema logístico reverso do RSU será classificado na próxima seção.

2.4 – Classificação do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano

O sistema logístico reverso pode ser classificado de algumas formas. Fleischmann *et al.* (2000) estruturam em cinco visões: grau de centralização; quantidade de níveis; sistema de ciclo aberto ou fechado; ligação com outros sistemas e grau de cooperação entre empresas.

O grau de centralização, de acordo com Rogers & Tibben-Lembke (1998) e Mckinnon *et al.* (2010), refere-se às atividades padrão da logística reversa: coleta, inspeção, triagem e destinação. No sistema logístico reverso centralizado, todo o produto/resíduo é encaminhado para um ponto intermediário, onde uma única empresa é responsável por estas atividades - coleta, inspeção, triagem e destinação. Porém, os produtos/resíduos podem ter sido originados por diferentes varejistas.

No sistema descentralizado cada ponto individual de varejo executa estas atividades, encaminhando-os para o método de valorização adequado. Para Fleischmann *et al.* (2000), quanto maior é o grau de centralização, a possibilidade de especialização e ganho em escala aumentam.

O sistema logístico reverso também pode ser classificado pela quantidade de níveis, ou seja, a quantidade de facilidades que o produto/resíduo precisa passar sequencialmente desde a coleta até o descarte como rejeito (Fleischmann *et al.*, 2000). Esta classificação será tratada neste trabalho como “quantidade de facilidades” no sistema, pois o termo quantidade de níveis pode ser confundida com os níveis de reprocessamento da logística reversa.

Além disso, o sistema logístico reverso pode ser de ciclo aberto ou fechado. No sistema de ciclo fechado o material retorna para o produtor original. Já em um sistema de ciclo aberto o material não retorna para a indústria original, sendo reprocessado com interação de diversas outras indústrias (Dekker *et al.*, 1997).

A ligação com outros sistemas logísticos refere-se ao grau de integração da nova rede com as redes logísticas existentes por meio do aproveitamento de parte das redes já existentes pela nova rede. Caso exista um sistema onde há a possibilidade de integração, não há necessidade de estruturação de uma nova rede, fazendo com que haja redução de custos fixos e melhoria no aproveitamento do sistema existente. Este processo tem maior possibilidade de ocorrer no sistema logístico reverso de ciclo fechado (Fleischmann *et al.*, 2000).

A última visão de classificação da logística reversa é o grau de cooperação entre empresas, que se refere às empresas ou agentes responsáveis por estabelecer um mesmo sistema. Iniciativas podem ser tomadas por uma empresa única através de subcontratações ou em conjunto com outras empresas do mesmo ramo (Fleischmann *et al.*, 2000).

O sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano também pode ser classificado de acordo com Fleischmann *et al.* (2000). Na Tabela 2.2, define-se e detalha-se cada tipo de classificação.

Tabela 2.2: Classificação do Sistema Logístico Reverso do Resíduo Sólido Urbano.

Classificações de Fleischmann <i>et al.</i> (2000)	Sistema Logístico Reverso do RSU	Detalhamento
Grau de centralização	Médio	As atividades de coleta, triagem e destinação no sistema logístico reverso do RSU, podem ser realizadas por agentes integrados ou distintos, dependendo do sistema de coleta. Quando existe a coleta seletiva, as atividades de triagem e destinação são realizadas pelos agentes geradores de resíduos. Já quando a coleta é indiferenciada, as atividades de triagem e destinação podem ocorrer em uma facilidade subsequente, sendo em uma planta intermediária ou de processamento.
Quantidade de facilidades	Alto	A quantidade de facilidades envolvidas no sistema logístico reverso do RSU é alta. Por não ser um sistema de ciclo fechado, têm-se a necessidade de participação de indústrias diversas. Este critério também depende do grau de centralização no sistema, quanto menor é o grau de centralização, a quantidade de facilidades tende a ser maior.
Sistema de ciclo aberto ou fechado	Ciclo Aberto	Usualmente os RSU não retornam para as suas indústrias originais. Após as atividades de inspeção e coleta, o resíduo é inserido dentro de um novo sistema para a valorização ou descarte.

Ligação com outros sistemas existentes	Baixo	O sistema logístico reverso do RSU tem pouca ligação com sistemas já existentes, por ser de ciclo aberto.
Grau de cooperação	Médio	O grau de cooperação entre empresas ou agentes do mesmo sistema difere dependendo da atividade. Nas atividades de coleta, triagem e destinação, o grau de cooperação é alto pois todos os agentes estão dentro de um mesmo sistema imposto pelo poder público. Já nas atividades de processamento, descarte e transporte, o grau de cooperação entre as empresas é baixo, pois normalmente são empresas especializadas em algum tipo de atividade e regionalizadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, o sistema logístico reverso do RSU pode ser considerado um sistema com o grau médio de centralização para as atividades de coleta, triagem e destinação e com grau médio de cooperação entre os agentes do sistema de acordo com a atividade. Além disso, define-se como um sistema de ciclo aberto com grande número de organizações atuantes e conseqüentemente com grande quantidade de facilidades atuante, porém com baixa integração com outros sistemas existentes.

A partir do estabelecimento do conceito da logística reversa do RSU, no próximo capítulo, avaliam-se e caracterizam-se as diversas possíveis estruturas do sistema logístico reverso do RSU com o objetivo de desenvolver um modelo conceitual deste sistema para a destinação do resíduo ao coprocessamento.

3 – MODELO CONCEITUAL DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA COPROCESSAMENTO

Estruturas e resultados diversos da gestão do RSU podem ser observados mundo a fora. Dessa forma, analisam-se as características da estruturação deste sistema através da revisão bibliográfica narrativa, com o objetivo de contextualizar o objeto de estudo, levando em consideração as atividades e métodos de valorização dos resíduos abordados no capítulo anterior.

Este capítulo divide-se em quatro seções. As Seções 3.1 e 3.2 apresentam a revisão bibliográfica e o resultado do estudo, respectivamente. Na Seção 3.3 são apresentadas a discussão do resultado e a definição do modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU. Por fim, na Seção 3.4 direciona-se o estudo focando o sistema para a destinação ao coprocessamento, definindo dessa forma, a contribuição principal deste capítulo.

3.1 – Revisão bibliográfica

Selecionaram-se através da revisão bibliográfica narrativa 49 artigos acadêmicos que estruturassem e/ou descrevessem um sistema logístico reverso do RSU no Brasil, Estados Unidos, Canadá, México, União Europeia, China e Índia. Os estudos foram selecionados em função da sua data de publicação, considerando os últimos 10 anos.

Ao mesmo tempo, foram selecionadas diretrizes e guias de implantação da gestão do RSU no Brasil, Estados Unidos e União Europeia. Não foi possível encontrar as diretrizes de implantação do Canadá, México, Índia e China.

As referências pesquisadas são sintetizadas nas Tabelas 3.1 e 4.1, para que cada estudo seja classificado em função das atividades apresentadas e dos modelos matemáticos utilizados para a estruturação do sistema.

A Tabela 3.1 descreve o sistema logístico reverso do RSU dos 43 artigos que descrevem o seu sistema, organizando-os pelas atividades apresentadas e classificando-os quando possível. As atividades detalhadas são a coleta, triagem, destinação, transporte, processamento e descarte. Na atividade de descarte não foi considerado o método de combustão sem recuperação energética, já que este processo não se apresenta em nenhum dos estudos analisados. Além disso, a atividade de processamento subdivide-se em três métodos de valorização: a reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética.

Dos artigos analisados, 75% apresentam a utilização de uma planta intermediária no sistema. Devido à relevância deste tópico, na Tabela 3.1 também se descreve a existência desta planta no sistema, detalhando o tipo e as atividades que são executadas. Este tema será abordado com mais detalhes junto às atividades do sistema na próxima seção deste capítulo.

As diretrizes e guias de implantação da gestão do RSU foram utilizados para análise de cada atividade da logística reversa do RSU com o intuito de dar consistência ao resultado obtido na tabulação dos artigos.

A Tabela 4.1 apresenta o modelo matemático utilizado em cada um dos 33 artigos que estruturam um sistema logístico reverso do RSU. A tabela, o resultado e a análise desta parte da revisão bibliográfica apresentam-se no Capítulo 4, onde também se define o modelo matemático utilizado nesta dissertação.

Tabela 3.1: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE		Tipo	Atividade
China	Hui <i>et al.</i> (2006)	Coleta indiferenciada com ponto de entrega	- SF: estação de transferência - SI: no ponto de entrega, exclusivamente para resíduos recicláveis	- SF: estação de transferência - SI: no ponto de entrega, exclusivamente para resíduos recicláveis	Coleta e TRANSF	x	-	x	Aterro sanitário e aterro controlado	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
Portugal	Semiao <i>et al.</i> (2006)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Centro de triagem	Triagem e destinação
China	Hong-tao <i>et al.</i> (2007)	Coleta seletiva	Geração e estação de transferência	Geração e estação de transferência	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário c/ e s/ RE	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
Canadá	Yeomans (2007)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração e estação de transferência	Geração e estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	-	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Compactação, triagem e destinação
Grécia	Erkut <i>et al.</i> (2008)	Coleta seletiva	Geração e estação de transferência	Geração e estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF PP do RDF	Triagem e destinação Produção do RDF
Canadá	Li <i>et al.</i> (2008)	Coleta seletiva	Geração	Geração	Coleta e TRANSF	x	x	-	Aterro sanitário	-	-
China	Su <i>et al.</i> (2008)	Coleta indiferenciada	Estação de transferência	Estação de transferência	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
Itália	Messineo & Panno (2008)	Coleta seletiva	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Centro de triagem	Triagem e destinação
Itália	Robba <i>et al.</i> (2008)	Coleta seletiva	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Centro de triagem PP do RDF	Triagem e destinação Produção do RDF

LEGENDA: REC – Reciclagem; COMP – Compostagem; CCRE – Combustão com recuperação energética; SI – Setor informal; SF – Setor formal; TRANSF – Transferência; PP – Planta de produção; RE – Recuperação energética; RDF – *Refuse derived fuel*; TMB – Tratamento mecânico-biológico.

Tabela 3.1 - Continuação: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE		Tipo	Atividade
Índia	Talyan <i>et al.</i> (2008)	Coleta seletiva porta-a-porta com carrinho de mão até o ponto de entrega	- SF: geração - SI: na coleta, ponto de entrega e lixão, exclusivamente para resíduos recicláveis	- SF: ponto de entrega - SI: na coleta, ponto de entrega e Lixão, exclusivamente para resíduos recicláveis	Coleta e TRANSF *	x	x	-	Lixão	-	-
Canadá	Warith <i>et al.</i> (2008)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração, centro de triagem e estação de transferência	Geração, centro de triagem e estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	-	Aterro sanitário	Centro de triagem Estação de TRANSF	Triagem e destinação de reciclável Triagem e destinação
Itália	Feo & Malvano (2009)	Coleta seletiva	Geração	Geração	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	PP do RDF	Processo de TMB
Índia	Dutta <i>et al.</i> (2009)	Coleta indiferenciada porta-a-porta com carrinho de mão até o ponto de entrega	SI: na coleta e ponto de entrega, exclusivamente para resíduos recicláveis	SI: na coleta e ponto de entrega, exclusivamente para resíduos recicláveis	Coleta e TRANSF	x			Lixão	-	-
China	Huang <i>et al.</i> (2009_a)	Coleta indiferenciada	-	-	TRANSF	-	-	x	Aterro sanitário	-	-
China	Huang <i>et al.</i> (2009_b)	Coleta indiferenciada	Estação de transferência	Estação de transferência	TRANSF	-	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
China	Li'ao <i>et al.</i> (2009)	Coleta indiferenciada	-	-	TRANSF	-	-	-	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Consolidação
China	Minghua <i>et al.</i> (2009)	Coleta indiferenciada	Estação de transferência	Estação de transferência	Coleta e TRANSF **	-	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
Itália	Galante <i>et al.</i> (2010)	Coleta seletiva	Geração	Estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Consolidação triagem e destinação

* Coleta realizada com carrinhos de mão que tem compartimento para resíduos recicláveis e não recicláveis separados.

** Coleta realizada com veículos com equipamentos compactadores e veículos com caçamba basculantes.

Tabela 3.1 - Continuação: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE		Tipo	Atividade
China	Zhen-shan <i>et al.</i> (2009)	Coleta seletiva porta-a-porta	Geração e estação de transferência 1	Geração e estação de transferência 1	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF 1	Compactação , triagem e destinação
										Estação de TRANSF 2	Compactação
										Centro de triagem	Triagem e destinação de reciclável
Espanha	Bovea <i>et al.</i> (2010)	Coleta seletiva mista	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	x	-	Aterro sanitário com e sem RE	Estação de TRANSF Centro de triagem	Compactação Triagem e destinação
China	Su <i>et al.</i> (2010)	Coleta indiferenciada	-	-	TRANSF	-	x	x	Aterro sanitário com RE	Estação de TRANSF	Compactação e pré-tratamento para descarte
China	Zhang <i>et al.</i> (2010)	Coleta indiferenciada porta-a-porta	- SF: Estação de transferência - SI: na coleta e estação de transferência, exclusivamente para recicláveis	- SF: estação de transferência - SI: na coleta e estação de transferência, exclusivamente para recicláveis	Coleta e TRANSF	x	-	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
China	Chen & Li (2011)	Coleta seletiva	Geração	Geração	TRANSF	-	x	-	Aterro sanitário	-	-
Canadá	Huang <i>et al.</i> (2011)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração	Estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Consolidação e destinação
Canadá	Huang & Zhu (2011)	Coleta seletiva	Geração	Geração	TRANSF	x	x	-	Aterro sanitário	-	-

Tabela 3.1 - Continuação: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE		Tipo	Atividade
China	Li <i>et al.</i> (2011_a)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	SI: na coleta e estação de TRANSF, exclusivamente para recicláveis	SI: na coleta e estação de TRANSF, exclusivamente para recicláveis	TRANSF	-	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Pré-tratamento, triagem e destinação
China	Li <i>et al.</i> (2011_b)	-	Estação de transferência	Estação de transferência	TRANSF	x	-	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Compactação, triagem e destinação
Portugal	Pires <i>et al.</i> (2011)	Coleta seletiva mista	Geração, centro de triagem e estação de transferência	Geração, centro de triagem e estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF Centro de triagem	Consolidação, triagem e destinação Processo de TMB*
Estados Unidos	Chang <i>et al.</i> (2012)	Coleta seletiva	Geração e Centro de triagem	Geração e Centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	-	-	Aterro sanitário com RE	Centro de triagem	Triagem e destinação de recicláveis **
China	Lu <i>et al.</i> (2012)	Coleta indiferenciada	-	-	TRANSF	-	-	x	Aterro sanitário	-	-
Canadá	Huang <i>et al.</i> (2012)	Coleta seletiva	Geração	Geração	Coleta e TRANSF	-	x	x	Aterro sanitário	-	-
Itália	Ionescu <i>et al.</i> (2013)	Coleta seletiva	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	-	x	x	x	Aterro sanitário	Centro de triagem	Triagem e destinação
Estados Unidos	Levis <i>et al.</i> (2013)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração	Geração	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	-	-
China	Zhang & Huang (2013)	Coleta indiferenciada	-	-	TRANSF	-	-	x	Aterro sanitário	-	-

* Centro de triagem com planta de compostagem e produção do RDF acoplados.

** Centro de triagem na mesma localidade do aterro sanitário.

Tabela 3.1 - Continuação: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE		Tipo	Atividade
Grécia	Komilis & Minoglou (2013)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração e centro integrado de gestão do RSU	Estação de transferência e centro integrado de gestão do RSU	TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF Centro integrado de gestão do RSU	Consolidação Processo de TMB *
Grécia	Mavrotas <i>et al.</i> (2013)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração, estação de transferência e centro de triagem	Geração, estação de transferência e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF Centro de triagem e PP de RDF	Triagem e destinação Processo de TMB
China	Wang <i>et al.</i> (2013)	Coleta seletiva com ponto de entrega voluntária	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	-	x	Aterro sanitário	Centro de triagem	Triagem de resíduo tipo metal **
China	Chi <i>et al.</i> (2014)	-	-	-	-	-	-	x	Aterro sanitário com RE	-	-
Itália	Moedinger <i>et al.</i> (2014)	Coleta seletiva	Geração e planta intermediária	Geração e planta intermediária	-	x	x	x	Aterro sanitário	Planta intermediária	Triagem, destinação, secagem e diminuição de granulometria Pré-
Portugal	Roca <i>et al.</i> (2014)	Coleta seletiva mista	Geração, centro de triagem e estação de transferência	Centro de triagem e estação de transferência	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário	Centro de triagem Estação de TRANSF	tratamento de reciclável, triagem e destinação Triagem e destinação

* Centro integrado de gestão do RSU com planta de compostagem e aterro sanitário acoplados.

**Centro de triagem na mesma localidade da planta de combustão com recuperação energética.

Tabela 3.1 - Continuação: Classificação das Atividades do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Coleta	Triagem	Destinação	Transporte	Processamento			Descarte Aterro Sanitário	Planta Intermediária	
						REC	COMP	CCRE.		Tipo	Atividade
Espanha	Fernández-Nava <i>et al.</i> (2014)	Coleta seletiva	Geração e centro de triagem	Geração e centro de triagem	Coleta e TRANSF	x	x	x	Aterro sanitário com RE	Centro de triagem	Triagem e destinação
China	Zhang <i>et al.</i> (2014)	Coleta indiferenciada com ponto de entrega	Estação de transferência	Estação de transferência	Coleta e TRANSF	-	-	x	Aterro sanitário	Estação de TRANSF	Triagem e destinação
Índia	Ravindra <i>et al.</i> (2015)	Coleta indiferenciada porta-a-porta	Geração e Estação de transferência *	Geração e Estação de transferência *	Coleta e TRANSF	x	x	-	Lixão	Estação de TRANSF PP do RDF	Consolidação Triagem, destinação, secagem, diminuição de granulometria

* Setor informal: na Coleta e Estação de transferência, exclusivamente para resíduos recicláveis.

LEGENDA: REC – Reciclagem; COMP – Compostagem; CCRE – Combustão com recuperação energética; SI – Setor informal; SF – Setor formal; TRANSF – Transferência; PP – Planta de produção; RE – Recuperação energética; RDF – *Refuse derived fuel*; TMB – Tratamento mecânico-biológico.

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 – Atividades da logística reversa do resíduo sólido urbano

A partir da revisão bibliográfica, detalha-se cada atividade de coleta, triagem, destinação, transporte, processamento e descarte apresentadas na Tabela 3.1. A planta intermediária será analisada de acordo com a sua tipologia e atividades exercidas. Os detalhamentos das atividades de triagem e destinação serão apresentados de forma integrada, pois são atividades complementares e subsequentes.

3.2.1 – Coleta

Existem dois sistemas de coleta de RSU: indiferenciada e seletiva. A coleta indiferenciada é o recolhimento de resíduos recicláveis e não recicláveis sem distinção. Já a coleta seletiva é o recolhimento de resíduos recicláveis de forma distinta dos demais resíduos (SMA/CEA, 2011).

Na literatura também se encontra a coleta seletiva separada por resíduos secos e úmidos, onde o resíduo úmido contempla o resíduo orgânico com possibilidade de compostagem, e o resíduo seco como os demais resíduos com possibilidade de reciclagem ou descarte (EPA, 1995; SRHU/MMA, 2011).

Na coleta seletiva, o RSU é previamente separado pela fonte geradora. Esta separação pode ocorrer de três formas: porta-a-porta, em pontos de entrega voluntária (PEV) ou mista (SMA/CEA, 2011). Na coleta indiferenciada a maioria dos casos ocorre de porta-a-porta, porém há casos de coleta indiferenciada onde o gerador precisa levar o resíduo até um ponto de entrega. Estes casos podem ser vistos em Hui *et al.* (2006) e Zhang *et al.* (2014).

Existem casos específicos na Índia onde a coleta porta-a-porta é realizada com carrinho de mão por recursos contratados pelos municípios e encaminhados a um ponto de entrega para consolidação. Dutta *et al.* (2009) apresentam este processo por meio da coleta indiferenciada e Taylan *et al.* (2008) na coleta seletiva.

Na China e na Índia a estrutura de coleta do resíduo reciclável é realizada por um processo completamente informal e sem apoio do poder público. Este processo pode

ser observado em Hui *et al.* (2006), Taylan *et al.* (2008), Dutta *et al.* (2009), Zhang *et al.* (2010), Li *et al.* (2011_a) e Ravindra *et al.* (2015). Ainda na China, muitas vezes os residentes vendem os resíduos de forma direta às unidades recicladoras ou por intermédio de grupos de pessoas que fazem a coleta do resíduo nas ruas para venda posterior. Cerca de 12% de todo RSU gerado na China é gerido desta maneira (Zhang *et al.* 2010).

3.2.2 – Triagem e destinação

As atividades de triagem e destinação podem ocorrer juntas em uma mesma facilidade ou não, porém sempre serão atividades de ocorrência próxima. Quando ocorrem de forma integrada, geralmente ocorrem na geração e/ou em alguma planta intermediária entre as atividades de coleta e processamento.

Verificam-se casos em que estas atividades ocorrem de forma integrada mais de uma vez dentro do mesmo sistema. Semiao *et al.* (2006), Hong-tao *et al.* (2007), Yeomans (2007), Erkut *et al.* (2008), Warith *et al.* (2008), Robba *et al.* (2008), Messineo & Panno (2008), Zhen-shan *et al.* (2009), Bovea *et al.* (2010), Pires *et al.* (2011), Chang *et al.* (2012), Wang *et al.* (2013), Ionescu *et al.* (2013), Mavrotas *et al.* (2013) e Fernández-Nava *et al.* (2014) apresentam um sistema logístico reverso do RSU em que as atividades de triagem e destinação ocorrem tanto na geração quanto no centro de triagem e/ou na estação de transferência.

Quando as atividades de triagem e destinação ocorrem de forma separada, normalmente ocorrem em processos subsequentes, como apresentados por Taylan *et al.* (2008), Galante *et al.* (2010), Huang *et al.* (2011), Komilis & Minoglou (2013) e Rocca *et al.* (2014). Como exemplo, em Huang *et al.* (2011) a triagem ocorre na geração através da coleta seletiva, porém todos os tipos de resíduos são encaminhados para a estação de transferência sem distinção. A destinação para a valorização ocorre na estação de transferência.

Além disso, em alguns países em desenvolvimento estas atividades podem ser realizadas pelo setor informal, exclusivamente para a triagem e destinação de resíduos recicláveis. Hui *et al.* (2006), Taylan *et al.* (2008), Dutta *et al.* (2009), Zhang *et al.*

(2010), Li *et al.* (2011_a) e Ravindra *et al.* (2015) apresentam este tipo de sistema, em que estas atividades ocorrem na coleta porta-a-porta e/ou no ponto de entrega onde o resíduo é consolidado. Talyan *et al.* (2008) ainda apresenta as atividades de triagem e destinação de resíduos recicláveis nos lixões.

3.2.3 – Transporte

A atividade de transporte do resíduo pode ser classificada em dois tipos com características distintas: transporte para coleta e transporte para transferência. O transporte na atividade de coleta é a primeira etapa de movimentação do resíduo que se origina nos geradores e se destina às atividades subsequentes, que podem ser em uma planta intermediária, nas unidades de processamento ou para descarte. O transporte para transferência do RSU ocorre após a primeira movimentação do resíduo na coleta podendo ser de diversas origens para diversos destinos, sendo na planta intermediária, planta de processamento e descarte.

O modelo de transporte da coleta é complexo e custoso, tendo a necessidade de analisar a demanda de cada área e montar um roteiro de coleta para otimização do uso dos veículos. As viaturas de coleta do resíduo domiciliar podem ser de dois tipos: veículos equipados com ou sem equipamentos compactadores (IBAM, 2001). Os veículos com equipamentos compactadores são os mais comuns na atividade de coleta e dispõem de um compactador hidráulico que permite aumentar a quantidade de resíduos coletados (EPA, 1995).

A escolha do tipo do veículo depende de como o sistema de coleta está estruturado, ou seja, depende da quantidade de RSU gerado na região e das características físicas da rota de coleta (IBAM, 2001; EPA, 1995).

Já quando há um entreposto, sendo este para o transbordo do resíduo para consolidação ou uma unidade de processamento de resíduo, o modelo de transporte apresenta características diferentes da coleta para o sistema de transporte a partir deste ponto. A transferência do RSU destes pontos para a próxima destinação é realizada com veículos de maior porte, cerca de 3 vezes maior do que o veículo de coleta, possuindo carroceria de 45 m³ ou com fundo móvel (IBAM, 2001).

Segundo EPA (1995), mesmo na transferência pode ser utilizado semirreboque com equipamentos compactadores. Este processo pode ser visto em Li'ao *et al.* (2009), em que a planta intermediária apresentada no sistema é responsável pela atividade de consolidação. Assim, o veículo com equipamento compactador é utilizado para redução do volume de resíduo para o descarte no aterro sanitário.

O transporte de transferência do resíduo do entreposto para o local de descarte não precisa ser necessariamente via modo rodoviário. Cidades como Nova York e Seattle utilizam barcas para transferência de RSU para os aterros sanitários (EPA, 1974). Além disso, nos EUA, cerca de 5% do volume de transferência de RSU são realizados por ferrovias, ocorrendo nas cidades de Seattle, Washington, Portland, Oregon e a região sudeste de Massachusetts.

3.2.4 – Processamento

A atividade de processamento consiste na valorização do RSU por meio de três possíveis métodos: reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética. A escolha de qual método a ser utilizado no sistema depende diretamente da estruturação das atividades de triagem e destinação e do tipo de resíduo disponível.

A reciclagem consiste na valorização do resíduo por meio de reparo ou tratamento para propósitos similares ao do produto de onde este material foi originado. De acordo com EPA (1995), podem ser reciclados materiais do tipo papel e papelão, metais em geral, vidro e plástico. A tecnologia, o processo a serem utilizados e a exigência do mercado de destino são diferentes para cada tipo de material.

Já a compostagem é um processo controlado de decomposição biológica da matéria orgânica presente no resíduo, no qual se utiliza micro-organismos existentes nos resíduos em condições adequadas de aeração, umidade e temperatura. Esse processo gera um produto biologicamente estável chamado composto orgânico, que podem servir de fertilizantes para a produção agrícola. Para a inserção do resíduo neste processo existe a necessidade de triagem dos resíduos orgânicos e de diminuição de granulometria (SMA/CEA, 2011; EPA, 1995; EPA, 2011).

O método de combustão com recuperação energética, também conhecida como processo *waste-to-energy* (WTE), iniciou-se nos EUA por volta de 1980. Antes disso, a combustão tinha o objetivo simplesmente de redução de volume do resíduo para o envio posterior ao aterro sanitário.

O processo WTE pode ocorrer de algumas formas: através da combustão direta, que pode ser realizada pelo método de incineração, pirólise ou gaseificação, ou através da utilização do resíduo como combustível sólido, também chamado de *refuse derived fuel* (RDF), onde este combustível pode ser encaminhado para outras indústrias e utilizado como substituto de um combustível fóssil (Cheng & Hu, 2010; EC, 2010; ABRELPE & PLASTIVIDA, 2012; Oliveira & Rosa, 2003; McKay *et al.*, 2004).

Os métodos de incineração, pirólise ou gaseificação, além da recuperação energética, geram rejeitos como resultados do processo, havendo a necessidade de transferência para descarte em aterros sanitários (Cheng & Hu, 2010; EPA, 1974; EC, 2010).

Apesar dos métodos de tratamento serem processos complementares e não excludentes entre si, percebe-se que nem todos os sistemas logísticos reversos do RSU apresentam estas três formas de processamento. Dentre os 43 artigos analisados, apenas 18 casos apresentam a estrutura de valorização integrada com a utilização dos três métodos.

3.2.5 – Descarte

O descarte do RSU pode ocorrer de duas formas: descarte direto para aterros sanitários ou o envio ao aterro sanitário após o processamento do resíduo. O envio do resíduo diretamente ao aterro sanitário é a forma mais comum de disposição, com o menor custo operacional e necessidade de capital, porém é a pior maneira sob a ótica ambiental e de utilização do solo.

Existem duas formas de processamento com o objetivo de diminuição do volume do resíduo para descarte: por meio de trituração e enfardamento ou pelo processo de combustão sem recuperação energética, que tem a possibilidade de diminuição do

volume do resíduo em até 90%. Estes processos são benéficos sob a ótica da utilização do solo, porém ainda há a necessidade de envio do rejeito ao aterro sanitário (EPA, 1974).

Entende-se que a utilização da combustão sem recuperação energética é um método ultrapassado, levando em consideração a revisão bibliográfica realizada. Em nenhum dos sistemas logísticos reversos analisados há a indicação deste método. Todos os métodos de combustão analisados foram através da recuperação energética.

Todavia, EPA (1995) evidencia a possibilidade de coleta de gases nos aterros sanitários como uma potencial fonte de energia. Hong-tao *et al.* (2007), Bovea *et al.* (2010), Su *et al.* (2010) Chang *et al.* (2012), Fernández-Nava *et al.* (2014) e Chi *et al.* (2014) apresentam sistemas logístico reversos do RSU com o descarte de resíduos e rejeitos em aterros sanitários com recuperação energética.

No Brasil, existe a possibilidade de envio do resíduo para descarte em aterros controlados e lixões. Os aterros controlados são locais que não possuem coleta e tratamento do chorume, assim como drenagem e queima de biogás. Nos lixões o lançamento do resíduo é feito a céu aberto com uma simples descarga ao solo, sem nenhum tipo de proteção ao meio ambiente (ABRELPE, 2013; IBAM, 2001). Dutta *et al.* (2009), Ravindra *et al.* (2015) e Talyan *et al.* (2008) também apresentam estudos de casos na Índia, em que os sistemas apresentam o descarte em lixões.

Um dos grandes problemas ambientais causados pelo descarte dos resíduos em aterros é a geração do metano, que tem potencial de aquecimento global 25 vezes mais intenso se comparado ao dióxido de carbono. Ao mesmo tempo esta é uma prática onde há a necessidade de grande área de uso do solo e pode resultar em problemas ambientais de forma secundária, como contaminação de solo e de lençóis freáticos, poluição do ar, além de servir como terreno fértil para pragas e doenças (Cheng & Hu, 2010; EC, 2010).

Além dos impactos ambientais do descarte, o histórico da evolução da gestão de resíduos nos países desenvolvidos mostra uma tendência dos órgãos reguladores em dificultar o envio do RSU aos aterros sanitários, fazendo com que diminua a quantidade

de aterros sem condições ambientais adequadas e aumente o valor da taxa de despejo do resíduo nos aterros sanitários.

3.2.6 – Planta Intermediária

Em muitos casos o sistema logístico reverso do RSU estrutura-se com o apoio de uma planta intermediária. Na Tabela 3.1 observam-se nomenclaturas e atividades diversas que constituem esta facilidade.

A nomenclatura para definição desta planta não é concisa na literatura acadêmica, podendo ser apresentada como estação de transferência, centro de triagem, centro integrado de gestão do RSU e planta de produção do RDF. Além disso, as atividades apresentadas não têm uma relação direta com nenhum tipo de nomenclatura estabelecida. Dessa forma, utiliza-se neste trabalho a nomenclatura “estação de transferência” para qualquer tipo de planta intermediária, com o intuito de simplificação.

As atividades apresentadas na estação de transferência são: consolidação, compactação, triagem, destinação, pré-tratamento para a atividade de processamento ou descarte, secagem, diminuição de granulometria e produção de RDF. Estas atividades apresentam-se de forma isolada ou integrada. Feo & Malvano (2009), Pires *et al.* (2011), Komilis & Minoglou (2013) e Mavrotas *et al.* (2013), apresentam ainda o processo de tratamento mecânico-biológico (TMB) como atividade na planta intermediária.

Apesar das atividades diversas que são executadas por esta facilidade, entende-se que todas as atividades são para consolidação ou para tratamento do resíduo para envio à atividade subsequente, que pode ser uma planta de processamento ou de descarte.

A necessidade de consolidação do RSU decorre do aumento da dificuldade de instalações dos aterros sanitários e plantas de processamento perto dos grandes geradores, por motivos sociais e econômicos. Com o aumento da distância entre o ponto de coleta e de processamento ou descarte, são implantadas as estações de transferência

com o intuito de diminuir a improdutividade dos veículos de coleta (IBAM, 2001; EPA, 1995; SMA/CEA, 2011).

Observa-se que quanto maior é a quantidade de atividades realizadas na estação de transferência, maior é a possibilidade de destinação do RSU para diversos métodos de valorização. Dessa forma, a estação de transferência, além de proporcionar melhoria no sistema através da otimização da atividade de coleta, pode apoiar também na integração do sistema logístico reverso do RSU facilitando a utilização de diversos métodos de valorização.

3.3 – Modelo conceitual do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano

A partir do detalhamento de cada atividade do sistema logístico reverso do RSU, propõe-se um modelo conceitual apresentado na Figura 3.1, fundamentado principalmente nos modelos de Erkut *et al.* (2008), Robba *et al.* (2008) e Roca *et al.* (2014). Estes modelos foram selecionados por apresentarem um sistema mais integrado em comparação aos demais, com a utilização dos três métodos de valorização - reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética.

Este trabalho não tem como objetivo a otimização e reestruturação da atividade de coleta do RSU como um todo. O processo que diz respeito à programação e roteirização da coleta nos seus respectivos nós de geração não será considerado neste trabalho. No entanto considera-se o segmento de transporte para destinação do resíduo após o processo de coleta. Assim, define-se neste trabalho este processo como “suprimentos”.

No processo de coleta seletiva os resíduos podem ser triados na forma de recicláveis e não-recicláveis ou secos e úmidos, podendo ser destinados diretamente para a unidade de reciclagem (resíduos recicláveis) e para a unidade de compostagem (resíduos úmidos). Os demais resíduos são encaminhados para a estação de transferência ou para descarte. No processo de coleta indiferenciada o RSU pode passar pela estação de transferência com o intuito de triagem e destinação ou encaminhados diretamente para o descarte no aterro sanitário.

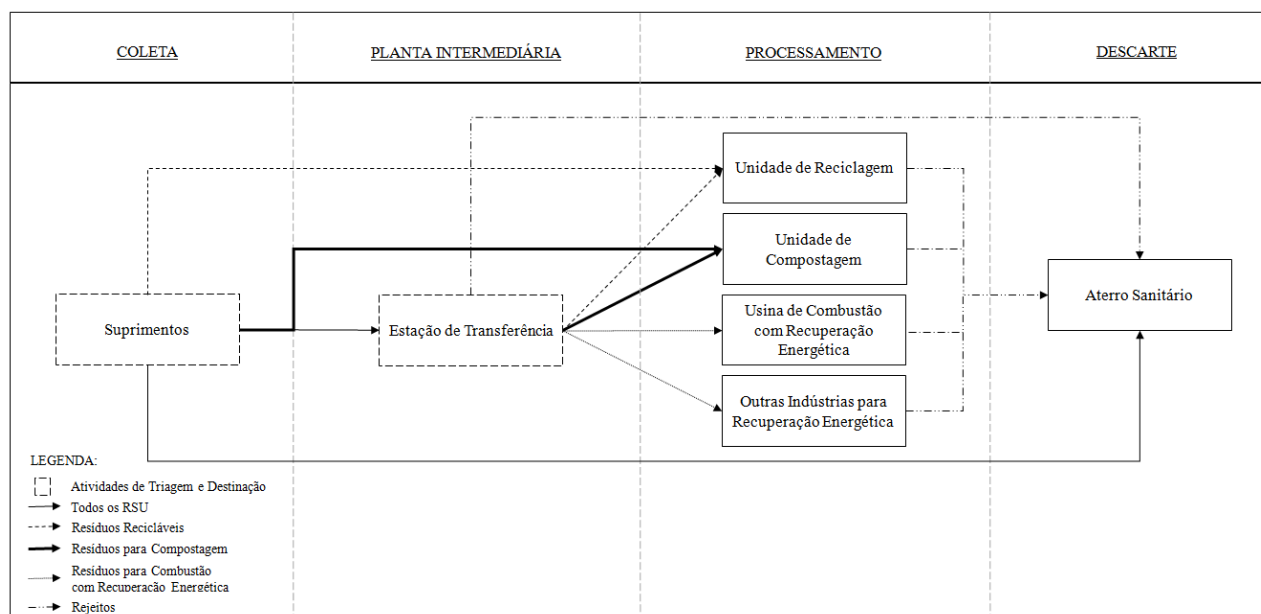


Figura 3.1: Modelo Conceitual do Sistema Logístico Reverso do RSU. **Fonte:** Adaptados de Erkut *et al.* (2008); Robba *et al.* (2008); Roca *et al.* (2014).

As atividades de triagem e destinação são representadas na Figura 3.1 nas facilidades onde estas podem ser executadas, em que podem ocorrer tanto na coleta quanto na estação de transferência.

A estação de transferência, neste caso, está estruturada para a realização das atividades de forma mais integrada possível, com as atividades de consolidação, triagem, diminuição de granulometria, produção de RDF e destinação para os respectivos métodos de valorização.

A utilização de todos os métodos da hierarquia em uma mesma estrutura de sistema é possível e recomendável para a gestão integrada do resíduo. Na UE pratica-se esta hierarquia há mais de 30 anos e os países que mais reduziram eficazmente a dependência do aterro sanitário tem alcançado esta meta combinando os processos de reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética (ABRELPE & PLASTIVIDA, 2012).

Assim, o processamento está sendo representado na Figura 3.1 por todos os métodos de valorizações. No caso da combustão com recuperação energética, apresenta-

se a usina específica para este processo e as indústrias com possibilidade de combustão do RDF.

Nos métodos de processamento e valorização do RSU são gerados rejeitos que devem ser descartados de forma adequada em aterros sanitários, assim como na estação de transferência há a geração de rejeito, que são resíduos depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento, triagem e destinação para valorização.

A atividade de transporte é representada pelas setas na Figura 3.1, em que são classificadas pelos tipos de resíduos e suas destinações. Neste caso, apresenta-se apenas o transporte para a transferência de resíduos. Já na atividade de descarte, foi considerado apenas o uso do aterro sanitário, pois o processo de combustão sem recuperação energética mostrou-se um método obsoleto para a atividade de descarte.

A elaboração e detalhamento do modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU também pode ser observada em Akasaka & D'Agosto (2015). A partir desta definição, na próxima seção almeja-se adaptar o modelo focando o sistema para a destinação do resíduo ao coprocessamento.

3.4 – Modelo conceitual do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano para coprocessamento

Para a utilização do RSU como combustível alternativo, em um processo de combustão não é possível encaminhá-lo para os fornos industriais diretamente da forma como é coletado após o descarte. É necessário passar por um processo de tratamento para transformá-lo em um RDF.

O RDF consiste no RSU tratado após a retirada de materiais como vidro, materiais ferrosos, areia e outros materiais não combustíveis. Além da atividade de triagem, necessita-se também da diminuição de volume de forma mais específica, com a granulometria nominal máxima do resíduo entre 10 a 15 centímetros (EPA, 1995; Cheng & Hu, 2010; EC, 2010; ABRELPE & PLASTIVIDA, 2012).

O RDF, além de ser utilizado como combustível alternativo nos processos de combustão direta ou no coprocessamento, pode também ser encaminhado para os aterros quando não há a oportunidade de combustão, já que o resíduo se encontra em um estado volumétrico menor e com todos os resíduos recicláveis triados (Robba *et al.*, 2004).

No coprocessamento o RDF é utilizado de forma complementar ao combustível fóssil. De acordo com Brizio & Genon (2008), a proporção de utilização dos resíduos no coprocessamento pode ser diferente dependendo das condições técnicas do forno e/ou legislação do país, variando de 2% na Espanha a 5% da Itália, ou chegando até a 30% na Alemanha e 72% na Holanda.

Ao tratar sobre a questão ambiental, a substituição do combustível fóssil (CF) pelo RDF tem um resultado positivo em relação à emissão de gases do efeito estufa (GEE), chegando a redução de 1,61 kg de dióxido de carbono por kg de RDF utilizado comparado com a utilização do carvão mineral. Entretanto, dependendo da composição do RSU e da característica do forno, é possível emitir maior quantidade de metais pesados no gás proveniente da queima do RDF em comparação ao do combustível fóssil (Brizio & Genon, 2008).

Dentre os artigos analisados na revisão bibliográfica, sete apresentam sistemas com a produção de RDF. Quatro artigos evidenciam o processamento por meio da planta TMB - Feo & Malvano (2009); Pires *et al.* (2011); Komilis & Minoglou, (2013) e Mavrotas *et al.* (2013). Dois artigos descrevem o processo da planta TMB, porém sem denominação do mesmo - Robba *et al.* (2008); Ravindra *et al.* (2015). E em Erkut *et al.* (2008), analisa-se o sistema com a produção de RDF, porém sem especificar e nem detalhar o processo. Assim, entende-se que a planta TMB parece possuir o processo mais comum de transformação do RSU em RDF.

O processo de TMB consiste na triagem de resíduos através de processos físicos, como a utilização de eletroímã e corrente de ar. Após este processo o resíduo passa por um processo de picagem e peneiramento. A fração mais fina do composto pode ser tratada em usinas de compostagem para a geração de um produto com potencial fertilizante. A fração mais grossa do composto se torna um material com alto poder

calorífico para substituição energética, podendo ser utilizada no método de combustão com recuperação energética (Robba *et al.*, 2004; Stehlík *et al.*, 2012; FEAM, 2010).

Dessa forma, levando em consideração o modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU apresentado na Figura 3.1, elaborase o sistema onde o RSU é destinado ao coprocessamento como alternativa WTE, exposto na Figura 3.2.

Uma diferença da proposta apresentada na Figura 3.1 para o modelo apresentado na Figura 3.2 é a definição da planta intermediária como planta TMB, que antes estava representada como estação de transferência de forma genérica. Além disso, a planta TMB direciona o método de valorização dos resíduos para combustão com recuperação energética para o coprocessamento em outras indústrias diversas, eliminando a possibilidade de destinação para as demais usinas de combustão.

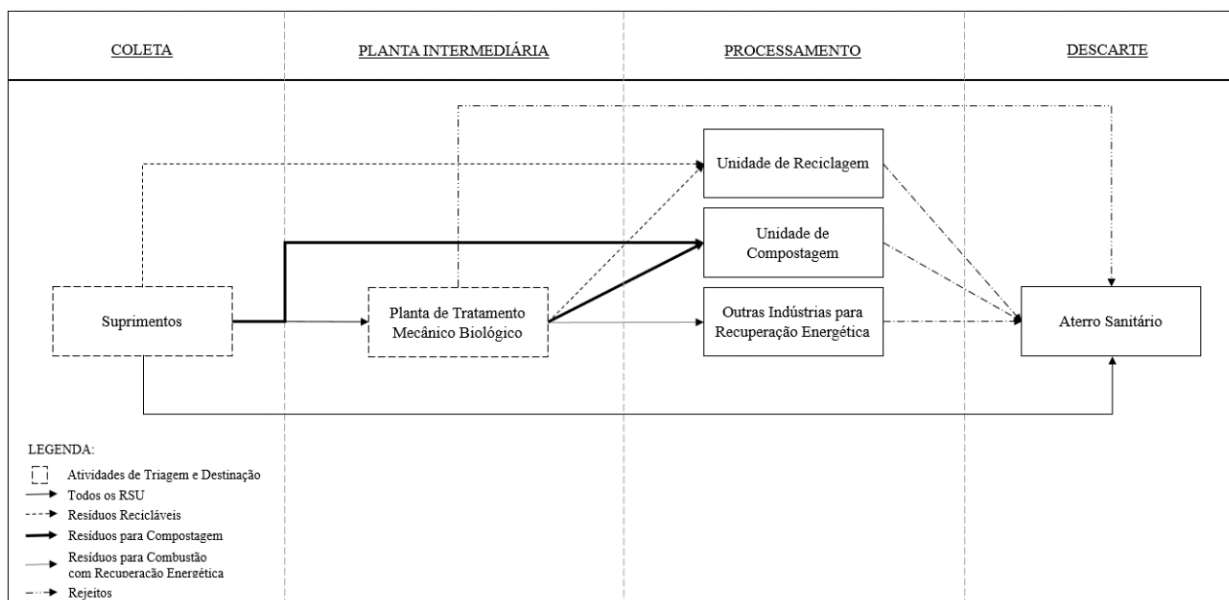


Figura 3.2: Modelo Conceitual do Sistema Logístico Reverso do RSU para Coprocessamento.

Fonte: Adaptados de Erkut *et al.* (2008); Robba *et al.* (2008); Roca *et al.* (2014).

A partir deste modelo dar-se-á continuidade ao trabalho utilizando-o como base para a estruturação do modelo matemático de otimização do sistema logístico reverso para a inserção do coprocessamento na gestão do RSU existente, que será elaborado no próximo capítulo desta dissertação.

4 – MODELO MATEMÁTICO PARA ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PARA COPROCESSAMENTO

A partir do estabelecimento do modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento, percebe-se a necessidade de uma planta intermediária, no caso, a planta TMB, para a viabilização do processo. Dessa forma, entende-se que o modelo de otimização para a estruturação deste sistema requer a definição da localização desta planta, assim como a alocação da oferta do RSU. Para tanto, avalia-se a seguir os métodos matemáticos encontrados na literatura para suportar o desenvolvimento do modelo a ser utilizado neste trabalho.

Este capítulo divide-se em quatro seções. As Seções 4.1 e 4.2 apresentam a revisão bibliográfica e resultado do estudo, respectivamente. A partir da análise dos resultados das seções anteriores, nas Seções 4.3 e 4.4 elaboram-se o modelo matemático a ser utilizado nesta dissertação, como contribuição principal deste capítulo.

4.1 – Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo definir o modelo matemático para otimização e estruturação do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento. No entanto, apresenta-se na literatura variados tipos de ferramentas e métodos de suporte à tomada de decisão para a estruturação deste tipo de sistema.

Para tanto, utiliza-se a revisão bibliográfica narrativa para avaliar os métodos utilizados na literatura para a resolução de problemas similares, e assim apoiar no desenvolvimento do modelo apropriado para a resolução do problema desta dissertação.

Os 33 artigos acadêmicos encontrados que estruturam este tipo de sistema estão sintetizados na Tabela 4.1, descrevendo as suas funções objetivo, parâmetros de decisão e os tipos de métodos matemáticos utilizados. Apresenta-se também na tabela os artigos classificados pelo tipo de análise, utilizando as mesmas categorias na revisão

bibliográfica realizada por Morrissey & Browne (2004): *cost-benefit analysis* (CBA), tomada de decisão multicritério e *life cycle assessment* (LCA).

Quando a análise é relacionada a tomada de decisão multicritério, classifica-se também como um problema de tomada de decisão multiobjetivo (sigla em inglês MODM - *multi-objective decision making*) ou problema de tomada de decisão multiatributo (sigla em inglês MADM - *multi-attribute decision making*).

Tabela 4.1: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Chang & Davila (2007)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional - Custo de descarte - Renda na venda de energia	<i>Minimax regret integer programming model</i>	Análise de 2 cenários futuros: - Aumento do valor do diesel; - Fechamento de um dos aterros sanitários. Utilização do solver LINDO. Período de análise de 4 anos.
China	Hong-tao <i>et al.</i> (2007)	Tomada de decisão multicritério	MADM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de energia - Tratamento de lixiviados - Elementos CHONS	<i>Monte-Carlo model:</i> - <i>analytic utility process</i> - <i>analytic hierarchy process</i> - <i>analytic uncertainty process</i> - <i>analytic information integration process</i>	Simulação de três cenários: - Cenário com condições normais; - Cenário com alto valor de descarte; - Cenário com coleta seletiva.
Canadá	Yeomans (2007)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e recicláveis	<i>Grey programming Evolutionary simulation-optimization</i>	
Grécia	Erkut <i>et al.</i> (2008)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização da emissão de gases de efeito estufa (GEE) Minimização do descarte Maximização do processamento Maximização da recuperação energética	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional - Emissão de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CFCs das plantas de processamento - Quantidade de resíduo para descarte no aterro sanitário - Quantidade de resíduos para processamento - Quantidade de resíduos para recuperação energética	Programação linear inteira mista MiniMax lexicográfico	Utilização do solver CPLEX 8.1.

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Canadá	Li <i>et al.</i> (2008)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de composto orgânico (CORG) e resíduos recicláveis - Custo de descarte	<i>Integrated two-stage optimization model:</i> - <i>Two-stage stochastic programming</i> - <i>Interval mathematical programming</i> - <i>Integer programming</i>	Período de análise: 25 anos.
Itália	Robba <i>et al.</i> (2008)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do resíduo não reciclável Minimização do descarte Minimização do impacto ambiental	- Custo da reciclagem - Custo de manutenção - Renda na venda de RDF e energia - Quantidade de resíduos não recicláveis - Quantidade de resíduo para descarte no aterro - Emissão de gases pela planta de combustão	<i>Nonlinear optimization model</i> <i>Reference point method</i>	Utilização do solver LINGO.
China	Su <i>et al.</i> (2008)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo do tratamento de: de lixiviados, gases e cinzas na combustão	<i>Interval-parameter linear dynamic programming e-constraint method</i>	Utilização do solver LINGO. Período de análise: 15 anos.
Croácia	Vego <i>et al.</i> (2008)	Tomada de decisão multicritério	MADM	Ecológico Econômico Social Funcional	- Relacionado à distância - Relacionado à localização - Custo de investimento - Custo operacional - Relacionado à localização - Viabilidade geral - Recursos existentes	<i>PROMETHEE method</i> <i>GAIA method</i>	

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Itália	Feo & Malvano (2009)	<i>Life cycle assessment (LCA)</i>	-	Impacto ambiental	- Consumo de energia renovável (RENOV) e não-RENOV - Consumo de água - Extração de minerais - Emissão de GEE - Acidificação - Eutroficação - Resíduos perigosos e não-perigosos	<i>Life cycle assessment</i>	
China	Huang <i>et al.</i> (2009_a)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de energia	<i>Inexact chance-constrained linear programming model</i> <i>Stochastic robust chance-constrained programming</i>	Comparação de dois métodos: ICCLP e SRCCP. Período de análise: 15 anos.
China	Huang <i>et al.</i> (2009_b)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e CORG	<i>Interval-parameter two-stage chance-constraint mixed integer linear programming</i>	Avaliação de três cenários: - Expansão das plantas; - Extensão da vida útil (EVU) do aterro em 3 anos; - EVU do aterro em 8 anos. Período de análise: 15 anos.
Espanha	Aragónes-Beltrán <i>et al.</i> (2010)	Tomada de decisão multicritério	MADM	Minimização do risco de inundação Maximização das distâncias Minimização das distâncias Planos de uso do solo	- Risco de inundação por localização Distância das: - plantas as cidades - plantas as áreas protegidas - plantas as rodovias - plantas aos parques industriais - De acordo com o plano de uso do solo	<i>Analytic Hierarchic Process (AHP)</i> <i>Analytic Network Process (ANP)</i>	Utilização do aplicativo Super Decisions v1.6.0. e Superdecisions-Q.

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Espanha	Bovea <i>et al.</i> (2010)	<i>Life cycle assessment</i> (LCA)	-	Impacto ambiental	- Impacto pelo uso de sacos e vasilhas na coleta - Consumo de energia - Consumo de combustível (COMB)	<i>Life cycle assessment</i> <i>Life cycle inventory</i>	Utilização do aplicativo SimaPro7.
Itália	Galante <i>et al.</i> (2010)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de investimento - Custo operacional da estação de transferência - Custo de transporte - Consumo de COMB - Custo do COMB	Programação linear inteira mista <i>Fuzzy Procedure</i> <i>Goal programming</i> <i>Weighted sum method</i>	Utilização do solver CPLEX 8.0 e do ARCmap 8.1.
China	Huang <i>et al.</i> (2010)	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia e CORG	<i>Inexact two-stage chance-constrained linear programming</i> <i>Interval quadratic programming</i>	Período de análise: 15 anos.
China	Su <i>et al.</i> (2010)	Tomada de decisão multicritério	MODM e MADM	Minimização do custo Maximização da vida útil do aterro Maximização de resíduos valorizados Maximização da satisfação do público	- Custo operacional - Custo de transporte - Custo de expansão - Renda na venda de energia e CORG - Vida útil (VU) do aterro - QTD de resíduo valorizados na compostagem e RE - Nível de satisfação do público	<i>Inexact chance-constrained mixed-integer linear programming</i> <i>Fuzzy decision model</i> <i>Weighted sum method</i> <i>Weighted product method</i> <i>TOPSIS</i>	Análise de três cenários: - Situação atual; - Balanço entre situação atual e cenário de longo prazo (LP) com taxa média de processamento; - Planejamento de LP com taxa alta de processamento. Comparação entre os métodos de SWA, WP e TOPSIS. Período de análise: 15 anos.
China	Chen & Li (2011)	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de CORG	<i>Fuzzy-stochastic-interval linear programming method</i> <i>Nguyen's method</i>	Período de análise: 5 anos.

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Canadá	Huang <i>et al.</i> (2011)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo do estoque - Custo de transporte - Custo de descarte	<i>Piecewise interval linear programming</i>	
Canadá	Huang & Zhu (2011)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de transporte - Renda na venda de CORG e resíduo reciclável	<i>Stochastic linear fractional programming</i>	Período de análise: 15 anos.
China	Li <i>et al.</i> (2011_a)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de investimento - Renda na venda de CORG e energia	<i>Two-stage support-vector-regression optimization model:</i> <i>- Support-vector-regression model</i> <i>- Interval-parameter mixed integer linear programming</i>	Período de análise: 5 anos.
China	Li <i>et al.</i> (2011_b)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo de investimento - Custo operacional - Renda na venda de energia e resíduos recicláveis	<i>Interval e parameter programming</i> <i>Minimax regret analysis</i>	Período de análise: 15 anos.
Portugal	Pires <i>et al.</i> (2011)	Tomada de decisão multicritério	MADM	Ambiental Técnico Custo Social	- Acidificação - Eutroficação - Emissão de GEE - Oxidação fotoquímica - Consumo de energia - VU do aterro sanitário - Custo de investimento - Custo operacional - Renda da venda de recicláveis, energia e CORG - Custo de transporte - Odor - Taxa paga pela população - Eficiência econômica	<i>Analytic hierarchy process (AHP)</i> <i>Technique for order performance by similarity to ideal solution (TOPSIS)</i>	

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Chang <i>et al.</i> (2012)	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment</i> (LCA)	MODM	Minimização do custo Maximização do benefício econômico Minimização de GEE	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de resíduo recicláveis e energia - Tarifa para coleta de resíduo - Custo operacional e de transporte para envio dos recicláveis valorizados para o mercado consumidor - Emissão no transporte - Emissão nas plantas	Programação linear <i>Compromise-programming model</i> <i>Life cycle assessment</i>	Avaliação em 5 cenários: - Minimização do custo; - Minimização do benefício econômico; - Minimização de GEE; - Minimização do benefício econômico e GEE; - Minimização do benefício econômico pela regulação ambiental de carbono. Utilização do solver GaBi e LINGO.
China	Lu <i>et al.</i> (2012)	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de expansão das plantas - Renda na venda energia	<i>Inexact two-phase fuzzy programming</i> <i>Mixed-integer programming and interval-parameter programming</i>	Período de análise: 15 anos.
Canadá	Huang <i>et al.</i> (2012)	<i>Cost-benefit analysis</i> (CBA)	-	Minimização do custo	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda energia e CORG - Custo para expansão das plantas	<i>Interval-valued fuzzy-stochastic programming</i> <i>Infinite α-cuts method</i>	Período de análise: 15 anos.
Índia	Srivastava & Nema (2012)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de transporte - Custo operacional - Custo de investimento - Emissão de gases - Emissão de lixiviados	<i>Fuzzy parametric programming model</i> <i>Weighted sum method</i>	Período de análise: 17 anos. Avaliação em 3 cenários: - 100% do peso no custo - 50% no custo e 50% no risco ambiental - 100% no risco ambiental
Grécia	Komilis & Minoglou (2013)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização da emissão de GEE	- Custo operacional - Custo de investimento - Emissão nas plantas	<i>Non-linear mathematical model</i> <i>e-constraint method</i>	Utilização do solver OptQuest.

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
Estados Unidos	Levis <i>et al.</i> (2013)	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment</i> (LCA)	-	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo de investimento - Custo operacional - Emissão de gases - Consumo de COMB - Consumo de energia elétrica	<i>Non-linear optimization model</i> <i>Life cycle assessment</i>	Período de análise: 30 anos.
Grécia	Mavrotas <i>et al.</i> (2013)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização do impacto ambiental	- Custo operacional da coleta PEV - Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de resíduo recicláveis e energia - Emissão de GEE (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) - Emissão de poluentes (NH ₃ , PM10, SO _x , NO _x , NMVOC)	<i>Mixed integer linear programming model</i> <i>e-constraint method</i>	Avaliação em 4 cenários com melhoria progressiva no processo de valorização do resíduo. Período de análise: 20 anos. Utilização do solver GAMS. Utilização do solver CPLEX 12.2.
China	Zhang & Huang (2013)	Tomada de decisão multicritério	MODM	Minimização do custo Minimização da emissão de GEE	- Custo de transporte - Custo operacional - Renda na venda de energia - Custo de investimento - Emissão de GEE nas plantas	<i>Dynamic stochastic possibilistic multiobjective programming (DSPMP)</i> <i>e-constraint method</i>	Período de análise: 15 anos. Avaliação em três cenários: - Considerando as duas funções objetivo; - Considerando apenas a função de custo incluindo a função de emissão do GEE como restrição com os limites de cada planta; - Considerando apenas a função de custo.
Espanha	Fernández-Nava <i>et al.</i> (2014)	<i>Life cycle assessment</i> (LCA)	-	Impacto ambiental	- Consumo de energia - Consumo de COMB - Consumo de água - Consumo de químicos - Emissão de biogás	<i>Life cycle assessment</i>	Análise de 5 cenários. Utilização do aplicativo SimaPro.

Tabela 4.1 - Continuação: Modelo Matemático do Sistema Logístico Reverso do RSU.

País	Referência Bibliográfica	Tipo de Análise	MODM/MADM	Função Objetivo	Parâmetros de Decisão	Método Matemático	Observação
China	Chi <i>et al.</i> (2014)	Tomada de decisão multicritério <i>Life cycle assessment (LCA)</i>	MADM	Eficiência energética Impacto ambiental Econômico	- Consumo de energia - Renda na venda de energia - Consumo de combustível fóssil - Uso do solo - Acidificação - <i>Ecotoxicity</i> - GEE - <i>Organic and inorganic respiratory</i> - Custo de investimento - Custo operacional - Renda na venda de energia	<i>Life cycle assessment</i> <i>Life cycle cost</i> <i>TOPSIS</i> <i>AHP</i>	Período de análise: 30 anos. Utilização do aplicativo GaBi.
China	Zhang <i>et al.</i> (2014)	<i>Cost-benefit analysis (CBA)</i>	-	Minimização do custo	- Custo operacional - Custo de descarte - Custo de transporte - Custo de armazenamento	<i>Stochastic programming method</i> <i>Linear chance-constrained programming model</i>	

LEGENDA: RENOV – Renovável; GEE – Gases de efeito estufa; EVU – Extensão da vida útil; VU – Vida útil; COMB – Combustível; CORG – Composto orgânico; PEV – Ponto de entrega voluntário; QTD – Quantidade; RE – Recuperação energética; LP – Longo prazo.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 – Modelos matemáticos para a estruturação do sistema logístico reverso do resíduo sólido urbano

A partir da revisão bibliográfica avalia-se os tipos de análises realizados na literatura para a estruturação do sistema logístico reverso do RSU, e assim define-se o tipo de análise mais adequado para este estudo. Além disso, avalia-se os parâmetros de decisão, funções objetivo e métodos matemáticos utilizados para a resolução do problema que nortearão o modelo matemático a ser desenvolvido.

Os 33 artigos avaliados foram classificados em três tipos de análises, no qual 14 artigos utilizam o CBA como método de análise, 13 apresentam análises de tomada de decisão multicritério, 3 artigos apresentam LCA, e 3 integram a tomada de decisão multicritério com o LCA.

O CBA é um modelo que transforma todos os parâmetros de decisão em termos monetários, os benefícios sendo os efeitos positivos, e os custos como os efeitos negativos. Apesar da ocorrência mais frequente desta análise na revisão bibliográfica realizada por meio de diferentes métodos matemáticos, Morrissey & Browne (2004) indicam que o CBA não é o tipo de análise mais adequado para decisões que envolvem interesses de diferentes grupos e objetivos diversos, como na gestão do RSU.

O LCA é uma técnica de análise de potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, identificando, quantificando e avaliando todos os recursos utilizados, bem como todas as emissões e resíduos liberados (Feo & Malvano, 2009). Estudos recentes apresentam o LCA integrado a tomada de decisão multicritério, normalmente associando parâmetros ambientais e econômicos, como em Chang *et al.* (2012), Levis *et al.* (2013) e Chi *et al.* (2014).

Já a análise de tomada de decisão multicritério é utilizada para a tomada de decisões com parâmetros diversos que levam em consideração diferentes categorias de critérios, conflitantes ou não, e dependendo do método utilizado podendo incorporar parâmetros quantitativos e qualitativos (Morrissey & Browne, 2004).

Para que a solução apresentada para a gestão de RSU seja ambientalmente e socialmente sustentável e em prol da sociedade presente e futura, entende-se que a estruturação desse sistema deve considerar não apenas questões relacionadas à viabilidade econômica, cabendo também a integração de parâmetros ambientais e/ou sociais para a tomada de decisão.

Além disso, tendo em vista a necessidade de resolução do problema de localização-alocação da planta TMB para a estruturação deste sistema, a tomada de decisão multicritério parece ser o método de análise que melhor se encaixa neste estudo. Os demais tipos de análise – CBA e LCA – não solucionam o objetivo deste trabalho.

4.2.1 – Problema de decisão multicritério

De acordo com Farahani *et al.* (2010), o problema de tomada de decisão multicritério pode ser de dois tipos: problema de tomada de decisão multiobjetivo (MODM) e problema de tomada de decisão multiatributo (MADM).

O MADM possui um número limitado de alternativas ou cenários pré-determinados em que cada uma apresenta um nível específico de alcance do objetivo, sendo o resultado a escolha da melhor alternativa entre elas. Esta lógica pode ser observada nos trabalhos de Hong-tao *et al.* (2007), Vego *et al.* (2008), Aragónes-Beltrán *et al.* (2010), Su *et al.* (2010), Pires *et al.* (2011) e Chi *et al.* (2014).

Já o MODM desenha a melhor alternativa considerando várias interações dentre as restrições que mais satisfazem o conjunto de objetivos. Modelos com abordagem exata como de Erkut *et al.* (2008), Robba *et al.* (2008), Su *et al.* (2008), Galante *et al.* (2010), Su *et al.* (2010), Srivastava & Nema (2012), Komilis & Minoglou (2013), Mavrotas *et al.* (2013) Zhang & Huang (2013) são exemplos para a estruturação do sistema logístico reverso do RSU. O problema de localização-alocação deste trabalho será definido através do MODM, em que as definições dos múltiplos objetivos apresentam-se na próxima subseção.

Um problema multiobjetivo divide-se em duas etapas: a busca de solução realizada pelo método escolhido e a tomada de decisão da solução preferida, que se

necessita do apoio do agente decisor. A primeira etapa corresponde à busca de soluções na região factível em direção à fronteira de Pareto, e a segunda etapa corresponde a alocação do critério de preferência para determinar qual das opções dentro do conjunto Pareto ótimo deve ser eleita para ser implantada (Garcia, 2005 e Farahani *et al.*, 2010).

Na Tabela 4.2 apresentam-se os artigos encontrados na revisão bibliográfica que utilizam a tomada de decisão multiobjetivo com a discriminação das duas etapas do problema.

Tabela 4.2: Métodos Utilizados no Problema de Decisão Multiobjetivo (MODM).

Referência Bibliográfica	Método de Busca da Solução	Método de Tomada de Decisão da Solução Preferida	Métodos Utilizados para outras Análises
Erkut <i>et al.</i> (2008)	Programação linear inteira mista	MiniMax lexicográfico	
Robba <i>et al.</i> (2008)	<i>Nonlinear optimization model</i>	<i>Reference point method</i>	
Su <i>et al.</i> (2008)	<i>Interval-parameter linear dynamic programming</i>	<i>e-constraint method</i>	
Galante <i>et al.</i> (2010)	Programação linear inteira mista	<i>Goal programming</i> <i>Weighted sum method</i>	<i>Fuzzy procedure</i>
Su <i>et al.</i> (2010)	<i>Inexact chance-constrained mixed-integer linear programming</i>	<i>Weighted sum method</i> <i>Weighted product method</i>	<i>Fuzzy decision model</i> TOPSIS
Srivastava & Nema (2012)	<i>Fuzzy parametric programming model</i>	<i>Weighted sum method</i>	
Komilis & Minoglou (2013)	<i>Non-linear mathemata model</i>	<i>e-constraint method</i>	
Mavrotas <i>et al.</i> (2013)	Programação linear inteira mista	<i>e-constraint method</i>	
Zhang & Huang (2013)	<i>Dynamic stochastic possibilistic multiobjective programming</i>	<i>e-constraint method</i>	

Fonte: Elaborado pela autora.

Os métodos de busca das soluções são baseados em programação linear e não linear, com diversas possibilidades de variações dependendo da decisão a ser tomada. Para a tomada de decisão sobre o problema de localização-alocação, o método mais utilizado é baseado na programação linear inteira mista (PLIM) em que se caracteriza por ter variáveis de decisão com valores inteiros e contínuos.

Os valores inteiros representam a decisão binária que se restringem aos valores de 0 ou 1, no qual 0 significa fechamento de uma facilidade e 1 a abertura de uma facilidade. Os valores contínuos representam os volumes de cada fluxo otimizado.

Os métodos para a tomada de decisão da solução preferida podem ser de diversos tipos. Na revisão bibliográfica apresentam-se os seguintes: MiniMax lexicográfico, *reference point method*, *e-constraint method*, *goal programming*, *weighted sum method* e *weighted product method*.

O método minimax lexicográfico, também denominado como *nucleolus of a matrix game* e *rank order goal programming* (Erkut *et al.*, 2008; Galante *et al.*, 2010), minimiza a máxima distância, como no método minimax clássico, porém continua minimizando a segunda maior distância, a terceira e assim por diante, podendo hierarquizar cada ponto candidato. No entanto, esta abordagem apenas é válida quando o sistema apresenta muitos pontos fora da curva em relação a distância média dos pontos. Para a resolução de um problema com características diferentes desta o método minimax lexicográfico é um método muito complexo e, outros métodos mais simples poderiam ser utilizados (Ogryczak, 1997).

O *reference method point* é uma técnica interativa onde a solução é obtida levando em consideração modificações progressivas do tomador de decisão. De acordo com Robba *et al.* (2008), é uma técnica que depende bastante do tomador de decisão e para um problema com múltiplos decisores não seria a melhor a ser utilizada.

Os métodos *weighted sum* e *weighted product* transformam o problema multiobjetivo em mono-objetivo através da alocação de peso a cada função objetivo, representando a importância relativa dos objetivos (Su *et al.*, 2010 e Deb, 2001). A desvantagem deste método é a limitação da não geração de todas as soluções do conjunto Pareto ótimo quando o espaço objetivo não for convexo (Deb, 2001).

Por fim, o método *e-constraint*, que se apresenta em maior quantidade na literatura, transforma as funções objetivo em restrições com valores específicos (*e*), mantendo apenas uma função objetivo que representa maior importância. As funções objetivo que se tornaram valores de restrições limitam o espaço objetivo factível. Esta técnica permite gerar o conjunto Pareto ótimo mesmo em espaço objetivo não convexo. A desvantagem neste método é a grande dependência do resultado na escolha dos valores das restrições das funções objetivo, ou seja, dos limitantes. Dessa forma, os

limitantes devem ser escolhidos de modo que fique entre os valores mínimos e máximos de cada função objetivo (Deb, 2001).

Ainda, alguns artigos incluem outras análises paralelas além do objetivo principal de estruturação do sistema. Galante *et al.* (2010) além de definir a localização e alocação das plantas intermediárias e suas respectivas capacidades, faz a seleção e diminuição da quantidade das localidades candidatas utilizando *fuzzy procedure*. Su *et al.* (2010) utiliza o modelo *fuzzy* para transformação de parâmetros qualitativos em quantitativas e assim comparar os resultados dos métodos MODM – *weighted sum* e *weighted product* - e MADM – método TOPSIS.

Na estruturação do sistema logístico reverso do RSU sendo um objeto de estudo que envolve múltiplos decisores e tendo que atender a objetivos com enfoque diversos, pode ser útil optar por um método de solução com menos interação possível de um tomador de decisão, que pode ser tendenciosa e subjetiva. Dessa forma, o problema de localização-alocação de facilidade multiobjetivo deste trabalho será solucionado pela programação linear inteira mista e método *e-constraint*, em que as funções objetivas e os parâmetros de decisão serão definidos na próxima subseção.

4.2.2 – Função objetivo e parâmetro de decisão

Após a definição dos métodos a serem utilizados para a resolução do problema, esta subseção apresenta e analisa as funções objetivo e os parâmetros de decisão apresentados na revisão bibliográfica, que estão organizados na Tabela 4.3.

Percebe-se que as funções relacionadas à minimização de custo e maximização dos benefícios são as que aparecem de forma predominante, seguido das funções objetivo que buscam minimizar os impactos ambientais, destacando os parâmetros de emissão de GEE e consumo de energia, sendo o consumo de combustível uma das suas formas.

A decisão sobre a valorização do resíduo e o descarte no aterro sanitário vem como a terceira função objetivo mais utilizada podendo ser definidas também como maximização dos resíduos processados, minimização do descarte ou maximização da

vida útil do aterro sanitário. Além disso, são abordados também parâmetros sociais e os funcionais ou técnicos, porém de forma menos recorrente na literatura.

Tabela 4.3: Relação das Funções Objetivo e Parâmetros de Decisão.

Funções Objetivo	Parâmetros de Decisão	Artigos Relacionados
Minimização de custo e Maximização dos benefícios	Custo operacional	29
	Custo de transporte	24
	Renda na venda de resíduos processados e energia	21
	Custo de investimento	15
	Custo de descarte	4
	Outros parâmetros econômicos	5
Minimização do impacto ambiental	Emissão de GEE	13
	Consumo de energia	6
	Consumo de combustível	5
	Problemas relacionados à localização	3
	Acidificação	3
	Emissão de lixiviados	3
	Consumo de água	2
	Outros parâmetros ambientais	13
Maximização dos resíduos valorizados, Maximização da vida útil dos aterros e Minimização do descarte ¹	Quantidade de resíduos valorizados	4
	Quantidade de resíduos para descarte	4
Maximização ou minimização dos parâmetros funcionais	Parâmetros funcionais ²	6
Minimização do impacto social	Uso do solo	2
	Outros parâmetros sociais ³	4

Nota¹: O parâmetro de decisão de “quantidade de resíduos para descarte” é relacionado as funções objetivo de “minimização do descarte” e “maximização da vida útil dos aterros”.

Nota²: Recursos existentes e viabilidade geral.

Nota³: Taxa paga pela população, odor, nível de satisfação da população e problemas relacionados à localização.

Fonte: Elaborado pela autora.

Para a resolução do problema deste trabalho utilizam-se as quatro principais funções objetivo apresentados na literatura e os respectivos parâmetros de maior representatividade. Assim sendo, este trabalho considera as seguintes funções objetivo:

- Minimização de custo integrando os parâmetros de custo de transporte, custo de investimento e operacional da planta TMB, custo de descarte e o valor do CF a ser substituído pelo RDF;
- Minimização da emissão de GEE que integra os parâmetros de emissão na atividade de transporte, no aterro sanitário e na indústria que utilizará o RDF;

- Minimização do consumo de energia/combustível proveniente do CF na atividade de transporte e na indústria; e
- Minimização do descarte de RSU no aterro sanitário.

Desta forma, a partir da definição do método de resolução do problema e das funções objetivo e seus respectivos parâmetros, formula-se a seguir o modelo matemático do problema.

4.3 – Formulação do modelo matemático para inclusão do coprocessamento

Nesta seção formula-se o modelo matemático do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento que contempla as quatro funções objetivo que tem como parâmetros aspectos econômicos e ambientais.

4.3.1 – Funções objetivo

As funções objetivo deste trabalho estão representadas abaixo.

Função Multiobjetivo:

$$\text{Minimizar } F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Sendo:

$$F_1 = CTrans + CI + COper + CDat - VCf \quad (4.1a)$$

$$F_2 = GEETrans + GEEAter - GEEInd \quad (4.1b)$$

$$F_3 = ETrans - EInd \quad (4.1c)$$

$$F_4 = DesAter \quad (4.1d)$$

A primeira função objetivo (4.1a) consiste nos parâmetros econômicos, que contemplam os parâmetros de custo de transporte ($CTrans$), custo de investimento na planta TMB (CI), custo operacional da planta TMB ($COper$), custo de descarte no aterro sanitário ($CDat$) e o valor do combustível fóssil (VCf), sendo o valor do CF

correspondente ao valor de ganho pela sua substituição. Dessa forma, este custo será subtraído da equação da função objetivo.

As três seguintes funções objetivos (4.1b, 4.1c e 4.1d) representam a abordagem ambiental. A segunda função objetivo (4.1b) refere-se à emissão de GEE no transporte (*GEETrans*), no descarte (*GEEAter*) e na indústria (*GEEInd*). O *GEEInd* corresponde a emissão do GEE não produzida pelo CF com a substituição pelo RDF, entrando de forma a subtrair na equação da função objetivo.

A terceira função (4.1c) contempla o consumo energético do combustível fóssil na atividade de transporte (*ETrans*) e a diminuição de consumo deste recurso na indústria (*EInd*), subtraindo na equação da função objetivo.

A quarta e última função objetivo (4.1d) representa a quantidade de descarte do RSU no aterro sanitário (*DesAter*). A seguir detalha-se cada parâmetro de decisão econômico e ambiental citado anteriormente.

4.3.2 – Parâmetros e variáveis de decisão

Diante do modelo do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento apresentado na Figura 3.2, considera-se os seguintes conjuntos:

- *I*: conjunto formado por locais de suprimentos da atividade de coleta;
- *II*: conjunto formado por locais candidatos a receberem uma planta TMB;
- *P*: conjunto formado por plantas da atividade de processamento;
- *V*: conjunto de tipologias para as plantas de processamento. Esse conjunto é composto dos elementos 1, 2 e 3, sendo que o valor 1 indica unidade de reciclagem, o valor 2 indica unidade de compostagem, e o valor 3 indica indústria para combustão com recuperação energética; e
- *T*: conjunto formado por aterro sanitário da atividade de descarte.

Os arcos da Figura 4.1 representam as atividades de transporte. Cada arco possui um local de origem e um de destino, denominados nós, que por sua vez são fixos e pré-determinados, inclusive as potenciais localizações da planta TMB. A Tabela 4.4

apresenta as variáveis de decisão que apoiarão na formulação das equações dos parâmetros de decisão, também exibidas na Figura 4.1.

Tabela 4.4: Notações das Variáveis de Decisão Utilizado para Formulação do Modelo.

Referência de Destinação	Notação	Detalhamento
Planta TMB	φ_{π}	Variável binária (1,0) para localizar a planta TMB na localidade $\pi \in \Pi$.
	$\alpha_{i\pi}$	Variável da quantidade do resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ e transportado para as plantas TMB $\pi \in \Pi$.
Planta de Processamento	β_{ip}^v	Variável da quantidade de resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ para a planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$.
	$\zeta_{\pi p}^v$	Variável da quantidade de resíduo (em t/dia) da planta TMB da localidade $\pi \in \Pi$ para a planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$.
Descarte	γ_{it}	Variável da quantidade do resíduo gerado (em t/dia) nos nós de suprimentos $i \in I$ e transportado para o aterro sanitário $t \in T$.
	$\iota_{\pi t}$	Variável da quantidade de rejeito (em t/dia) da planta TMB $\pi \in \Pi$ para o aterro sanitário $t \in T$.
	δ_{pt}^v	Variável da quantidade de rejeito (em t/dia) da planta de processamento $p \in P$ de tipologia $v \in V$ para o aterro sanitário $t \in T$.

Fonte: Elaborado pela autora.

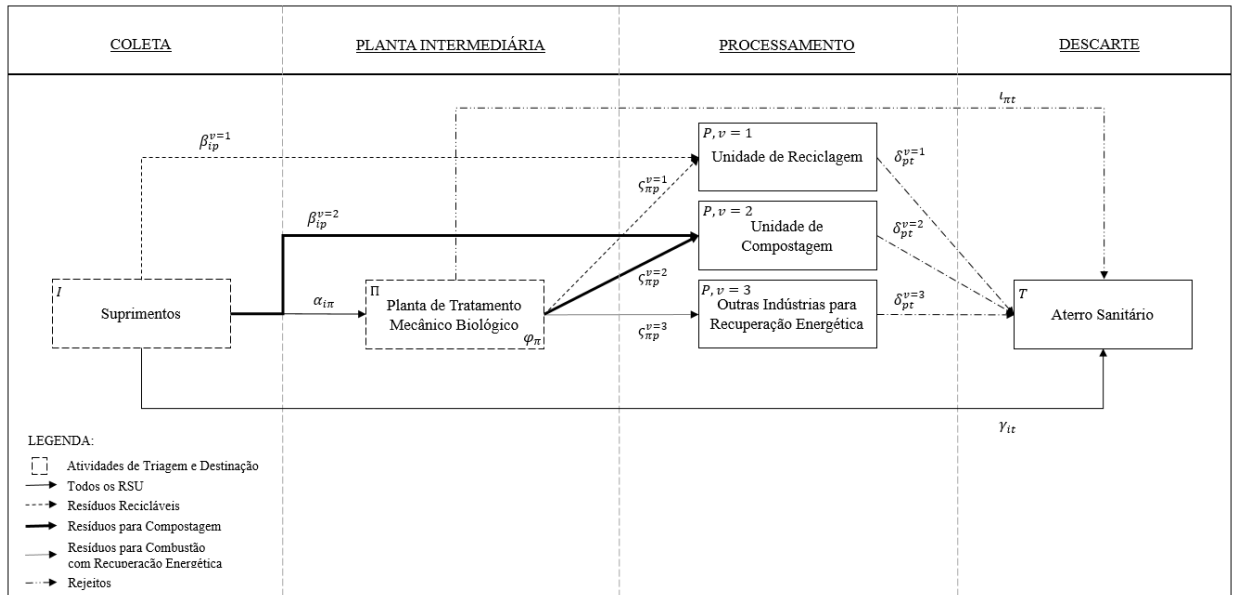


Figura 4.1: Sistema Logístico Reverso do RSU para Coprocessamento com as Respectivas Variáveis de Decisão. **Fonte:** Elaborado pela autora.

A seguir detalha-se cada elemento das funções objetivo.

Custo de transporte – CTrans

O CTrans é o somatório do produto do custo unitário de transporte (R\$/t) de cada arco pela quantidade de resíduos (t/dia) que trafega por ele. O resultado desta equação é o custo de transporte definida em (4.2).

$$\begin{aligned}
CTrans = & \sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} CVtp_{i\pi} \alpha_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} CVtp_{\pi p} \varsigma_{\pi p}^v + \\
& \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} CVtp_{ip} \beta_{ip}^v + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} CVtp_{it} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} CVtp_{\pi t} \iota_{\pi t} + \\
& \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} CVtp_{pt} \delta_{pt}^v
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Sendo:

- $CVtp_{ab}$: Custo unitário de transporte (em R\$/t) da origem $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$ para o destino $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$.

Custo de investimento na planta TMB – CI

O CI é o somatório do custo de investimento (R\$/dia) na abertura da planta TMB conforme (4.3).

$$CI = \sum_{\pi \in \Pi} CF_{\pi} \varphi_{\pi} \tag{4.3}$$

Sendo:

- CF_{π} : Custo do investimento (em R\$/dia) da planta TMB localizada em $\pi \in \Pi$.

Custo operacional da planta TMB – COper

O COper é o somatório do produto do custo de operação unitário (R\$/t) da planta TMB aberta conforme resultado do modelo pela quantidade de resíduos (t/dia) processados na planta TMB. O resultado desta equação é o custo operacional da planta TMB em R\$/dia conforme (4.4).

$$COper = \sum_{\pi \in \Pi} CVpl_{\pi} (\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi}) \varphi_{\pi} \tag{4.4}$$

Sendo:

- $CVpl_{\pi}$: Custo operacional (em R\$/t) da planta TMB localizada em $\pi \in \Pi$.

Custo de descarte no aterro sanitário – CDat

O CDat é o somatório do produto do custo unitário de descarte no aterro (R\$/t) com a quantidade de resíduos e/ou rejeitos (t/dia) que trafegam em cada arco destinado ao aterro sanitário. O resultado é o custo de descarte em R\$/dia definido em (4.5).

$$CDat = \sum_{t \in T} (\sum_{i \in I} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} l_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \delta_{pt}^v) CDat_t \quad (4.5)$$

Sendo:

- $CDat_t$: Custo de descarte (em R\$/t) no aterro sanitário $t \in T$.

Valor do combustível fóssil – VCf

O VCf é o somatório do produto do custo unitário do combustível fóssil (R\$/t) com a quantidade de RDF (t/dia) entregue na indústria. Para o custo do combustível fóssil deve-se levar em consideração a diferença do poder calorífico do RDF em relação ao CF. Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB para a transformação do RSU em RDF. O resultado fornece o valor do CF em R\$/dia, que entrará como ganho na função objetivo, conforme definido em (4.6).

$$VCf = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (CCF_p^{v=3} PC_{RDF/CF}) (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) \quad (4.6)$$

Sendo:

- $CCF_p^{v=3}$: Custo do combustível fóssil (em R\$/t) utilizado na indústria $p \in P$;
- $PC_{RDF/CF}$: Fator de diferença do poder calorífico do RDF em relação ao combustível fóssil (em %); e
- f_{π} : Grau de eficiência da planta TMB $\pi \in \Pi$ para a produção do RDF.

Emissão de GEE no transporte - GEETrans

Para a atividade de transporte utiliza-se a mesma lógica do inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (MMA, 2014) para o cálculo da emissão dos GEE. O GEETrans é o somatório do produto da distância total percorrida (km/dia) pelo fator de emissão de poluentes que resulta na emissão em kg de CO₂/dia, conforme definido em (4.7).

$$GEETrans = (\sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} Dist_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{\pi p} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Dist_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} Dist_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Dist_{pt}) FeTrans \quad (4.7)$$

Sendo:

- $Dist_{ab}$: Distância total (em km/dia) da origem $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$ para o destino $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$; e
- $FeTrans$: Fator de emissão de GEE (em kg CO₂/km) no transporte.

Emissão de GEE no aterro sanitário – GEEAter

O GEEAter é o somatório do produto do valor unitário de emissão de GEE no aterro sanitário (kg de CO₂/t) com a quantidade de resíduos e/ou rejeitos (t/dia) descartados. A Equação (4.8) resulta na emissão em kg de CO₂/dia.

$$GEEAter = \sum_{t \in T} (\sum_{i \in I} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \iota_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \delta_{pt}^v) Fe_t \quad (4.8)$$

Sendo:

- Fe_t : Emissão de GEE no descarte de resíduo e rejeito (em kg CO₂/t) no aterro sanitário $t \in T$.

Emissão de GEE na indústria – GEEInd

O GEEInd é o somatório do produto da quantidade RDF (t/dia) entregue na indústria com a diferença da emissão de GEE entre o CF e o RDF (kg de CO₂/t de RDF). Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB (f_{π}) para a transformação do RSU em RDF. O resultado fornece a emissão de GEE em kg de CO₂/dia que entrará como ganho na função objetivo, conforme definido em (4.9).

$$GEEInd = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) (DiffFe_p^{v=3}) \quad (4.9)$$

Sendo:

- $DiffFe_p^{v=3}$: Diferença da emissão de GEE na queima do combustível fóssil com o resíduo (em kg CO₂/t de RDF) na indústria $p \in P$; e
- f_{π} : Grau de eficiência da planta TMB $\pi \in \Pi$ para a produção do RDF.

Consumo de energia no transporte – ETrans

O ETrans é o somatório do produto da distância total percorrida (km/dia) com o fator de energia consumida (óleo diesel) no transporte rodoviário (em MJ/km), que resulta no consumo de energia em MJ/dia, conforme definido em (4.10).

$$ETrans = (\sum_{i \in I} \sum_{\pi \in \Pi} Dist_{i\pi} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{\pi p} + \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} Dist_{ip} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Dist_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} Dist_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Dist_{pt}) ETr \quad (4.10)$$

Sendo:

- $Dist_{ab}$: Distância total (em km/dia) da origem $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$ para o destino $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$; e
- ETr : Consumo de energia (em MJ/km) do diesel no transporte.

Consumo de energia na indústria – EInd

O EInd é o somatório do produto da quantidade de RDF (t/dia) consumida na indústria com a energia produzida pelo CF (MJ/t de RDF) não utilizado pela substituição pelo RDF. Para a definição da quantidade de RDF é necessário a inclusão do grau de eficiência da planta TMB (f_{π}) para a transformação do RSU em RDF. Sendo assim, o consumo de energia em MJ/dia, que entrará como ganho na função objetivo, é definido em (4.11).

$$EInd = \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{p \in P} (\zeta_{\pi p}^{v=3} f_{\pi}) (E_p^{v=3}) \quad (4.11)$$

Sendo:

- $E_p^{v=3}$: Consumo de energia (em MJ/t) com a utilização do combustível fóssil na indústria $p \in P$; e
- f_{π} : Grau de eficiência da planta TMB $\pi \in \Pi$ para a produção do RDF.

Descarte do resíduo – DesAter

O DesAter é avaliado por meio do somatório da quantidade de resíduos (t/dia) transportado de cada planta TMB para o aterro sanitário, conforme definido em (4.12).

$$DesAter = \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \gamma_{it} + \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} l_{\pi t} + \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \delta_{pt}^v \quad (4.12)$$

A seguir detalham-se as restrições que são contempladas no modelo matemático deste trabalho.

4.3.3 – Restrições

As restrições do modelo matemático são: capacidade máxima das plantas TMB, capacidade máxima de recebimento do RSU nas plantas de processamento e o balanceamento do volume de entrada-saída ao longo do processo. Além do domínio das variáveis de decisão que inclui não-negatividade e o conjunto discreto binário. Apresenta-se a seguir o detalhamento de cada uma delas.

Capacidade máxima da planta TMB

A restrição de capacidade máxima (t/dia) da planta TMB é representada em (4.13).

$$\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi} \leq \bar{k}_{\pi} \varphi_{\pi} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (4.13)$$

Sendo:

- $\bar{k}_{\pi}$: Capacidade máxima (em t/dia) da planta TMB na localidade $\pi \in \Pi$.

Capacidade máxima nas plantas de processamento

A restrição de capacidade máxima (t/dia) de recebimento do RDF na indústria e do RSU nas plantas de processamento, está apresentada em (4.14).

$$\sum_{\pi \in \Pi} \varsigma_{\pi p}^v \leq \bar{g}_p^v \quad \forall v \in V, p \in P \quad (4.14)$$

Sendo:

- $\bar{g}_p^v$: Capacidade máxima (em t/dia) da planta $p \in P$ com tipologia $v \in V$.

Balanceamento do volume de entrada-saída

O balanceamento é necessário para garantir que a quantidade total de resíduos que entra no sistema seja deslocada até o descarte. Assim, as restrições (4.15) – (4.19) garantem esta conservação de fluxo.

$$a_i = \sum_{\pi \in \Pi} \alpha_{i\pi} + \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \beta_{ip}^v + \sum_{t \in T} \gamma_{it} \quad \forall i \in I \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_{i\pi} = \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \varsigma_{\pi p}^v + \sum_{t \in T} \iota_{\pi t} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (4.16)$$

$$\sum_{i \in I} \beta_{ip}^{v=1} + \sum_{\pi \in \Pi} \varsigma_{\pi p}^{v=1} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=1} \quad \forall p \in P \quad (4.17)$$

$$\sum_{i \in I} \beta_{ip}^{v=2} + \sum_{\pi \in \Pi} \varsigma_{\pi p}^{v=2} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=2} \quad \forall p \in P \quad (4.18)$$

$$\sum_{\pi \in \Pi} \varsigma_{\pi p}^{v=3} \leq \sum_{t \in T} \delta_{pt}^{v=3} \quad \forall p \in P \quad (4.19)$$

Sendo:

a_i : Quantidade de resíduo (em t/dia) gerado por cada nó de suprimentos $i \in I$.

A Restrição (4.15) garante que todo resíduo gerado seja destinado para os devidos destinos subsequentes, de acordo com a capacidade máxima da planta TMB. As Restrições (4.16) garante que todo resíduo que entra na planta TMB seja destinado para a planta de processamento adequada de acordo com as capacidades máxima de recebimento. E as Restrições (4.17) – (4.19) garantem o envio do rejeito gerado nas plantas de processamento para o aterro sanitário.

Restrições de não negatividade

As restrições de não negatividade das variáveis de decisão contínuas estão representadas abaixo.

$$\alpha_{i\pi} \geq 0 \quad \forall i \in I, \pi \in \Pi \quad (4.20)$$

$$\beta_{ip}^v \geq 0 \quad \forall i \in I, v \in V, p \in P \quad (4.21)$$

$$\varsigma_{\pi p}^v \geq 0 \quad \forall \pi \in \Pi, v \in V, p \in P \quad (4.22)$$

$$\gamma_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.23)$$

$$\iota_{\pi t} \geq 0 \quad \forall \pi \in \Pi, t \in T \quad (4.24)$$

$$\delta_{pt}^v \geq 0 \quad \forall v \in V, p \in P, t \in T \quad (4.25)$$

Variáveis binárias

A restrição de variável binária determina a abertura ou não de uma localidade candidata para a planta TMB, conforme (4.26).

$$\varphi_{\pi} \in \{0, 1\} \quad \forall \pi \in \Pi \quad (4.26)$$

A partir das funções objetivo, parâmetros e variáveis de decisão e restrições apresentadas nesta seção, define-se o modelo matemático de localização-alocação multiobjetivo, que será solucionado através do Solver do Excel 2013 para a inclusão do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU.

Além disso, para a resolução do problema multiobjetivo utiliza-se o método *e-constraint*, onde cada função objetivo é solucionada de forma mono-objetiva considerando as restrições básicas do modelo matemático, e os resultados transformados em restrições com valores específicos (*e*). Neste trabalho, utiliza-se a função objetivo F_1 como principal e transforma-se as funções F_2 , F_3 e F_4 em restrições. A seguir formula-se o modelo matemático do cenário existente para posterior comparação entre cenários.

4.4 – Formulação do *baseline* do sistema

O *baseline* é a configuração inicial do sistema que servirá como base de comparação com o cenário de inclusão do coprocessamento no sistema. O cálculo do *baseline* se dá pelo cálculo dos parâmetros econômicos e ambientais estabelecidos na formulação matemática anterior.

Em relação aos parâmetros econômicos, não são considerados o valor do combustível fóssil (VCf), o custo de investimento (CI) e o custo operacional da planta TMB ($COper$). Dessa forma, sendo representada apenas pelos parâmetros de custo de transporte e ($CTrans$) e custo de descarte no aterro sanitário ($CDat$). O somatório destes dois parâmetros, que se apresenta na Equação 4.27a (B_1), será comparada com o resultado da função objetivo de minimização de custo (F_1).

Já em relação aos parâmetros ambientais, não são considerados para a elaboração do *baseline* os parâmetros relativos à indústria, no caso, a emissão de GEE na indústria ($GEEInd$) e o consumo de energia pelo CF na indústria ($EInd$).

Dessa forma, o somatório da emissão de GEE no transporte ($GEETrans$) e no aterro sanitário ($GEEAter$), que se apresenta pela Equação 4.27b (B_2), será comparado com a função objetivo (F_2) de minimização da emissão de GEE. E o consumo de

energia no transporte ($ETrans$), que se apresenta pela Equação 4.27c (B_3), com a função objetivo (F_3) de minimização do consumo de energia do CF.

O parâmetro de descarte no aterro sanitário continua sem alteração no cálculo do *baseline*, apresentado na Equação 4.27d (B_4), em que este deve ser comparado com a função objetivo (F_4) de minimização de descarte do resíduo no aterro sanitário. Dessa forma, define-se a formulação para cálculo do cenário *baseline*:

$$B_1 = CTrans + CDat \quad (4.27a)$$

$$B_2 = GEETrans + GEEAter \quad (4.27b)$$

$$B_3 = ETrans \quad (4.27c)$$

$$B_4 = DesAter \quad (4.27d)$$

O resultado deste cenário em comparação com o cenário proposto de inclusão do coprocessamento servirá para identificação da diferença de resultados no sistema, no qual será melhor detalhado no procedimento desenvolvido no próximo capítulo desta dissertação.

5 – PROCEDIMENTO PARA INCLUSÃO E ANÁLISE DO COPROCESSAMENTO NO SISTEMA LOGÍSTICO REVERSO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO

Este capítulo tem como objetivo consolidar os resultados obtidos nos capítulos anteriores estruturando-os em um procedimento que inclui o coprocessamento no sistema logístico reverso existente, avaliando esta alternativa nos âmbitos econômico e ambiental para uma gestão mais sustentável do RSU.

O procedimento apresenta-se em 10 etapas. As Etapas de 1 a 4 fazem referência à identificação do cenário atual da região em estudo, que serve como base para a avaliação e comparação dos resultados dos demais cenários gerados. A Etapa 5 consiste na identificação dos locais candidatos para a Planta TMB.

As Etapas de 6 a 8 consistem na identificação dos *inputs* do modelo e aplicação do problema de localização-alocação de facilidade multiobjetivo. Por fim, as Etapas 9 e 10 referem-se a comparação e análise dos resultados de cada cenário com a base inicial do sistema, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão para a estruturação do sistema logístico reverso do RSU da região. A seguir detalha-se cada etapa do procedimento apresentado na Figura 5.1.

5.1 – Etapa 1: Definição da região de estudo

A primeira etapa tem como objetivo a definição da região de estudo arbitrada pela necessidade de avaliação da gestão do RSU de uma determinada localidade. Cabe salientar que a definição de uma região com baixa geração de resíduos pode inviabilizar o processo, tendo muitas vezes a necessidade de um consórcio entre alguns municípios para a viabilização de recursos necessários para uma gestão de resíduos com opções de processamento.

A definição da região de estudo não consiste apenas a região da geração do RSU, contempla também a região de destinação do combustível alternativo, tendo-se a

necessidade de avaliar a localização de polos industriais para a inserção deste parâmetro no sistema.

5.2 – Etapa 2: Identificação do sistema atual

A segunda etapa deste procedimento visa à identificação do sistema atual de gestão do RSU da região escolhida na etapa anterior. A identificação do sistema consiste na estruturação de acordo com o modelo conceitual estabelecido no Capítulo 3, que contempla as atividades de: coleta, triagem e destinação, transporte, processamento, descarte e planta intermediária.

O detalhamento das atividades consiste além do entendimento da estrutura operacional, da identificação dos agentes públicos e/ou privados atuantes e das localizações de cada atividade. Na atividade de coleta, verificam-se os nós de suprimentos (*i*), e ainda, se no sistema atual existe alguma estação de transferência de resíduos e quais seriam as suas atividades.

A atividade de processamento (*p*), verifica todos os métodos de reciclagem, compostagem e combustão com recuperação energética que contemplam o sistema existente. E, por fim, a atividade de descarte (*t*), verifica o envio do RSU para o aterro sanitário, aterro controlado ou lixão.

Cabe salientar que a premissa utilizada neste trabalho para o descarte do RSU é de envio ao aterro sanitário. Caso o sistema a ser trabalhado contemple o descarte aos aterros controlados e aos lixões, os impactos ambientais e sociais seriam muito maiores do que este trabalho pode apresentar e avaliar.

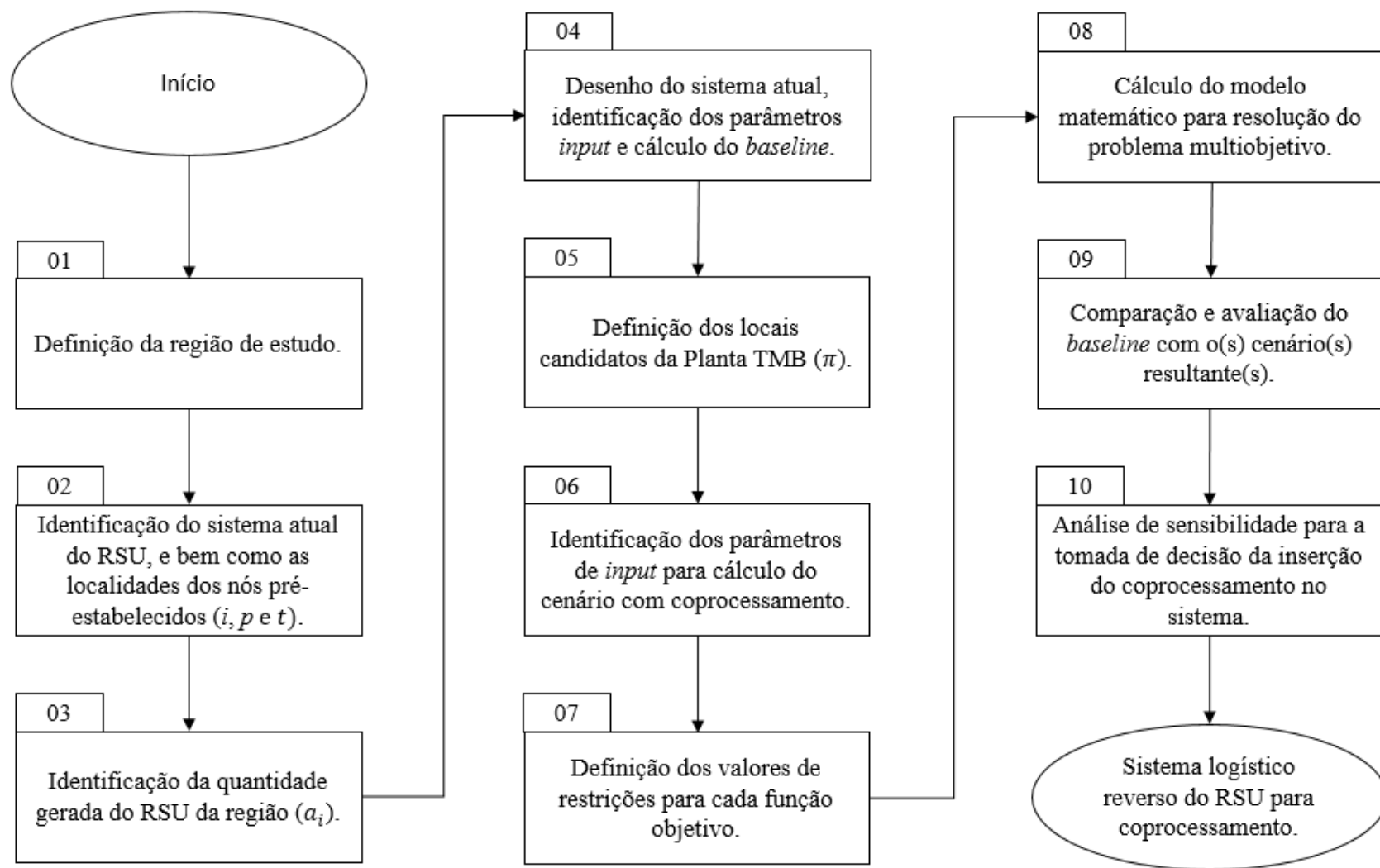


Figura 5.1: Procedimento de Inclusão e Análise do Coprocessamento no Sistema Logístico Reverso do RSU. **Fonte:** Elaborado pela autora.

5.3 – Etapa 3: Identificação da geração do resíduo sólido urbano

A terceira etapa deste procedimento refere-se à identificação da quantidade de geração do RSU (a_i) na região definida na primeira etapa. Caso a definição da região seja um consórcio de municípios, necessita-se identificar a geração em cada ponto de consolidação do resíduo em toneladas por dia.

Além disso, se identifica a informação de composição gravimétrica do RSU, que pode variar de região para região. Caso não seja possível obter esta informação, utiliza-se a composição gravimétrica do país de origem.

Estas informações são utilizadas tanto para elaboração do *baseline* quanto para o cálculo do modelo matemático do problema de localização-alocação da planta TMB.

5.4 – Etapa 4: Desenho do sistema atual e cálculo do *baseline*

A quarta etapa visa desenhar um esquema com nós e arcos do cenário atual do sistema logístico reverso do RSU por meio das informações adquiridas nas Etapas de 1 a 3, de acordo com o modelo conceitual definido no Capítulo 3. O desenho do esquema apoiará na visualização do contexto atual e definição do *baseline*.

Após a esquematização, identificam-se os parâmetros *input* para cálculo do *baseline*, que se dividem em parâmetros não específicos e específicos para cada estudo de caso. Os parâmetros de *input* não específicos são:

- $FeTrans$: Fator de emissão de GEE (em kg CO₂/km) no transporte;
- Fe_t : Emissão de GEE no descarte de resíduo e rejeito (em kg CO₂/t) no aterro sanitário $t \in T$; e
- ETr : Consumo de energia (em MJ/km) do diesel no transporte.

Os parâmetros de *input* específicos do *baseline* são:

- $CVtp_{ab}$: Custo unitário de transporte (em R\$/t) da origem $a \in \{I \cup \Pi \cup P\}$ para o destino $b \in \{\Pi \cup P \cup T\}$; e
- $CDat_t$: Custo de descarte (em R\$/t) no aterro sanitário $t \in T$.

A partir destas informações e de acordo com a formulação matemática do Capítulo 4 calculam-se os parâmetros de decisão econômicos e ambientais para a definição do cenário *baseline*. O resultado desta etapa será empregado na Etapa 9 deste procedimento para análise e comparação com os demais cenários que serão gerados.

5.5 – Etapa 5: Definição dos locais candidatos da planta TMB

A quinta etapa tem como objetivo a definição dos locais candidatos para a planta TMB. Para a definição dos locais candidatos deve-se levar em consideração informações como a necessidade de licenciamento para funcionamento e manuseio do RSU, espaço físico necessário para a implantação da planta, e muitas vezes a necessidade de concordância da população local.

Em análise na revisão bibliográfica identifica-se que Pires *et al.* (2011), Chang *et al.* (2012), Komilis & Minoglou (2013) e Wang *et al.* (2013) apresentam o sistema em que a estação de transferência está integrada junto a alguma planta de processamento ou aterro sanitário.

Esta iniciativa facilita a implantação da planta mesmo levando em consideração os critérios críticos contemplados anteriormente. Dessa forma, uma das possibilidades para localização da planta TMB seria integrando-a com algum método de processamento já existente, como também na região das indústrias que receberão o material processado, nos locais em que já se realizam as atividades de triagem e destinação do resíduo, ou ainda, próximos às localidades do aterro sanitário.

5.6 – Etapa 6: Identificação dos parâmetros de *input*

Após a definição do *baseline*, a sexta etapa tem como objetivo a identificação dos parâmetros de *input* para a composição do modelo matemático do cenário de inclusão do coprocessamento no sistema. Alguns parâmetros do modelo já foram identificados na quarta etapa para cálculo do *baseline*, que não serão abordadas novamente nesta etapa do procedimento.

Dentre os parâmetros pode se considerar a divisão em parâmetros não específicos e específicos para cada estudo de caso, dependendo da região. Os parâmetros de *input* não específicos são:

- CF_{π} : Custo do investimento (em R\$/dia) da planta TMB localizada em $\pi \in \Pi$;
- $CVpl_{\pi}$: Custo operacional (em R\$/t) da planta TMB localizada em $\pi \in \Pi$;
- $PC_{RDF/CF}$: Fator de diferença do poder calorífico do RDF em relação ao combustível fóssil (em %);
- f_{π} : Grau de eficiência da planta TMB $\pi \in \Pi$ para a produção do RDF; e
- $\bar{k}_{\pi}$: Capacidade máxima (em t/dia) da planta TMB na localidade $\pi \in \Pi$.

Os parâmetros de *input* específicos, que dependem de cada estudo de caso são:

- $CCF_p^{v=3}$: Custo do combustível fóssil (em R\$/t) utilizado na indústria $p \in P$;
- $DifFe_p^{v=3}$: Diferença da emissão de GEE na queima do combustível fóssil com o resíduo (em kg CO₂/t de RDF) na indústria $p \in P$;
- $E_p^{v=3}$: Consumo de energia (em MJ/t) com a utilização do combustível fóssil na indústria $p \in P$; e
- $\bar{g}_p^v$: Capacidade máxima (em t/dia) da planta $p \in P$ com tipologia $v \in V$.

Em relação ao custo do combustível fóssil ($CCF_p^{v=3}$) entende-se como parâmetro específico para cada estudo de caso, pois considera o custo entregue na fábrica. Dessa forma, este deve considerar, além do custo do produto, o custo do transporte da origem até a fábrica que pode variar de acordo com a distância percorrida entre os pontos.

5.7 – Etapa 7: Definição dos valores de restrições das funções objetivo

As etapas 7 e 8 deste procedimento consistem na aplicação do modelo matemático de localização-alocação de facilidade. O modelo proposto por este trabalho é multiobjetivo com quatro funções a serem otimizadas. Dessa forma tem-se a necessidade de definição de critérios de preferência, que neste caso, com a utilização do método *e-constraint*, são os valores de restrições das funções objetivo, e assim obter o resultado final.

A sétima etapa deste trabalho consiste na definição destas restrições, que são obtidos por meio da resolução do modelo matemático de forma individual para cada função objetivo. O cálculo do problema mono-objetivo apresenta-se na forma de maximização e minimização da função objetivo com o intuito de definir a escala máxima e mínima dos valores de restrição como soluções viáveis do problema multiobjetivo.

Neste trabalho que constiui de 4 funções objetivo, para cada função objetivo é aplicado o modelo matemático mono-objetivo de forma a maximizar e a minimizar o objetivo, resultando em 8 valores de restrições. A partir desses valores de restrições elaboram-se os cenários definindo os grupos de restrições para a resolução do problema multiobjetivo.

5.8 – Etapa 8: Cálculo do modelo matemático multiobjetivo

Para cada cenário definido na etapa anterior, com seus respectivos grupos de restrições estabelecidos, calcula-se o modelo matemático multiobjetivo. Aplica-se o modelo PLIM proposto no Capítulo 4 para cada cenário definido, resultando no sistema do RSU com a inclusão da planta TMB e do coprocessamento.

É definido na oitava etapa deste procedimento a(s) localização(ões) ótima(s) da(s) planta(s) TMB, assim como a alocação de cada ponto de oferta do resíduo para cada planta aberta. Além disso, os volumes de transferência do RSU de cada fluxo de transporte também são definidos por meio do modelo matemático de localização-alocação multiobjetivo.

Como descrito na etapa anterior, cada conjunto de valores de restrições estabelecidos terá um cenário de sistema resultante, tendo a necessidade de avaliação e comparação destes cenários resultantes na próxima etapa deste procedimento.

5.9 – Etapa 9: Comparação e avaliação do resultado com *baseline*

A nona etapa tem como objetivo avaliar os resultados gerados na etapa anterior e compará-los com os valores apresentados no *baseline* do sistema logístico reverso do RSU existente, definido na quarta etapa deste procedimento.

Nesta etapa é possível avaliar e comparar cada parâmetro de decisão de cada cenário proposto com o *baseline* do sistema, possibilitando analisar se a inclusão do coprocessamento como método de combustão no sistema logístico reverso do RSU é benéfico no âmbito econômico e/ou ambiental.

5.10 – Etapa 10: Análise de sensibilidade

Devido à complexidade da decisão a ser tomada pela grande quantidade de parâmetros em questão, a décima etapa se faz necessária para uma análise mais profunda e detalhada do resultado encontrado na etapa anterior.

Nesta etapa, realiza-se a análise de sensibilidade de cada parâmetro de decisão, avaliando o comportamento desde o sistema *baseline* até os cenários resultantes, além da avaliação da relação entre os parâmetros econômicos e ambientais.

Dessa forma, por meio desta etapa, por fim, resulta-se em uma solução que possa apoiar na tomada de decisão para inserção do método de coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU existente.

Este procedimento, junto com as contribuições de cada capítulo até então apresentados, é aplicado em um estudo de caso elaborado no próximo capítulo desta dissertação. O estudo de caso permite a visualização de forma prática das propostas teóricas apresentadas nesta dissertação, contribuindo para o melhor esclarecimento do trabalho como um todo.

6 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO: ESTUDO DE CASO NO CONSÓRCIO DA REGIÃO SERRANA II

Este capítulo tem como objetivo a aplicação do procedimento de inclusão e análise do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU. O procedimento proposto no capítulo anterior pode ser aplicado em qualquer região que se deseje estudar. Neste caso definiu-se o estudo de caso em uma região dentro do Estado do Rio de Janeiro, no consórcio da Região Serrana II.

O sistema logístico reverso do RSU desta região já foi tema de discussão no trabalho de conclusão de curso de Franca (2013) e na tese de doutorado de Guabiroba (2013). Além disso, foi realizada uma visita técnica na usina de tratamento do RSU do município de Cantagalo para aprendizado prático das atividades e estruturação dos processos da gestão de resíduos. O relatório desta visita encontra-se no Anexo I deste trabalho.

6.1 – Etapa 1: Definição da região de estudo

A região definida neste trabalho é o consórcio da Região Serrana II, onde se incluem os municípios de Areal, Comendador Levy Gasparian, Paraíba do Sul, Petrópolis, Sapucaia e Três Rios, localizados no Estado do Rio de Janeiro.

Estes municípios, de acordo com IBGE (2014), possuem uma área de 2.462 quilômetros quadrados e população de 451.561 habitantes, o que representa 5,6% e 2,8% da área e população do Estado do Rio de Janeiro, respectivamente. O município de Petrópolis é o que mais se destaca dentro do consórcio, representando cerca de 65% da população e 32% da área.

Além da região de geração do RSU, define-se como polo industrial para recebimento do RDF que será produzido na planta TMB, o polo cimenteiro do município de Cantagalo, em que abrigam as cimenteiras Lafarge, Votorantim e Holcim (SNIC, 2012). O município de Cantagalo juntamente com a cimenteira Lafarge possuem uma iniciativa pioneira no Brasil de coprocessamento do RSU como combustível alternativo no forno cimenteiro (CNI-ABCP, 2012).

6.2 – Etapa 2: Identificação do sistema atual

Detalha-se a seguir o sistema logístico reverso do RSU existente nos municípios do consórcio da Região Serrana II por meio das atividades de: coleta, planta intermediária, processamento, descarte e transporte. As atividades de triagem e destinação do RSU estão descritas nos tópicos de coleta e planta intermediária, onde são executadas.

6.2.1 – Coleta

Considera-se, neste trabalho, o processo de coleta a partir dos nós de suprimentos do RSU de cada município. O único município que apresenta coleta seletiva é o município de Petrópolis, em que na geração são triados em resíduos recicláveis e não recicláveis. Os resíduos recicláveis são destinados à planta intermediária e os não recicláveis ao aterro sanitário.

Nos demais municípios o sistema de coleta é indiferenciado, portanto os resíduos não passam por nenhum processo de valorização e são destinados diretamente para descarte no aterro sanitário, aterro controlado ou lixão. Para a implantação de algum processo de valorização os resíduos destes municípios precisam passar pelas atividades de triagem e destinação dos diferentes tipos de RSU.

6.2.2 – Planta intermediária

Os resíduos recicláveis triados na coleta seletiva em Petrópolis são destinados à unidade de triagem na Cooperativa Esperança, localizada no próprio município. Após esta atividade os resíduos recicláveis são encaminhados para agentes intermediários ou direto para às unidades recicladoras.

6.2.3 – Processamento

A atividade de processamento do RSU existente na Região Serrana II se resume a reciclagem, o qual foi mapeado em Guabiroba (2013). O resíduo tipo metal pode ser encaminhado para a Balprensa no município de Mesquita, o resíduo tipo vidro pode ser

encaminhado para a recicladora Owens-Illinois no município do Rio de Janeiro, o resíduo tipo plástico para o município de Três Rios, e o resíduo tipo papel para a empresa Klabin no município de Guapimirim, todos no estado do Rio de Janeiro.

Não são realizados outros processos de valorização do RSU nos municípios do consórcio, como os métodos de compostagem ou de combustão. Todos os demais resíduos não recicláveis são destinados diretamente ao aterro sanitário, aterro controlado ou aos lixões. Além disso, não foi possível obter informações de destinação dos rejeitos gerados nas unidades de reciclagem para o aterro sanitário.

6.2.4 – Descarte

O descarte do RSU nesta região é realizado em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, totalizando cinco localidades. Segundo Franca (2013), os municípios de Areal e Três Rios utilizam o lixão localizado em Três Rios, enquanto Comendador Levy Gasparian e Paraíba do Sul utilizam lixões localizados nos seus próprios municípios. O município de Petrópolis utiliza o aterro controlado no mesmo município para descarte, e Sapucaia é o único onde apresenta um aterro sanitário dentro do município.

O aterro sanitário de Sapucaia é de responsabilidade da empresa Furnas/Eletróbrás e administrado pela empresa Novatec, responsável pela sua operação. O aterro está localizado no quilômetro 124,4 da BR-393 e o terreno é pertencente à Fazenda Mangueira da Boa Esperança.

6.2.5 – Transporte

O transporte na atividade de coleta do resíduo reciclável é realizado pela COMDEP, empresa responsável pela gestão de RSU em Petrópolis. De acordo com Franca (2013), são disponibilizados para esta atividade de dois a três caminhões, dependendo da área do bairro. São caminhões médios de cabine dupla com as carrocerias do tipo baú de alumínio fechado ou carroceria aberta gradeada.

Já para o transporte nas transferências entre a planta intermediária, planta de processamento e descarte, não há informação do tipo exato de veículo utilizado. Dessa forma, Franca (2013) parte da premissa de utilização de um caminhão baú, modelo FORD F-400, com capacidade de 4 toneladas para cálculo dos cenários propostos em seu trabalho.

6.3 – Etapa 3: Identificação da geração do resíduo sólido urbano

A quantidade de RSU gerada (a_i) pelos municípios do consórcio da Região Serrana II pode ser observado na Tabela 6.1. A geração anual desta região chega a mais de 129 mil toneladas ao ano.

Tabela 6.1: Geração de RSU do Consórcio da Região Serrana II.

Município	Geração (t/dia)
Areal	8,34
Comendador Levy Gasparian	6,60
Paraíba do Sul	30,37
Petrópolis	236,28
Sapucaia	11,15
Três Rios	63,14
Total	355,88

Fonte: SEA/INEA (2013).

Observa-se que o município de Petrópolis é responsável por mais de 66% da geração de RSU do consórcio. Este percentual é um pouco maior do que a representatividade populacional do município. Isto se deve ao balanceamento da quantidade de população urbana e rural, sendo Petrópolis o município que tem uma representatividade maior da população urbana.

Tabela 6.2: Composição Gravimétrica do RSU no Brasil (em %).

Matéria Orgânica	Papel	Plástico	Vidro	Metal	Outros
51,4%	13,1%	13,5%	2,4%	2,9%	16,7%

Fonte: ABRELPE & PLASTIVIDA (2012).

A Tabela 6.2, apresenta a informação da composição gravimétrica do RSU no Brasil, pela ABRELPE & PLASTIVIDA (2012). Esta informação apoiará na definição

das quantidades a serem enviadas para cada atividade de valorização do RSU e bem como para o descarte no aterro sanitário.

6.4 – Etapa 4: Desenho do sistema atual e cálculo do *baseline*

Com as informações identificadas nas Etapas 1 a 3, estrutura-se de acordo com o modelo conceitual, o sistema logístico reverso do RSU do consórcio da Região Serrana II, apresentado na Figura 6.1.

Apesar do cenário existente contemplar o descarte do RSU em aterros controlados e lixões, utiliza-se apenas a destinação ao aterro sanitário em Sapucaia como premissa do *baseline* deste trabalho.

Esta medida foi tomada com o intuito de estar adequado à política nacional de resíduos sólidos, em que no início do ano de 2014 o descarte do resíduo nestas localidades foi proibido. De acordo com o programa do Lixão Zero, o consórcio planeja adaptar o aterro sanitário de Sapucaia para recebimento do RSU dos outros municípios.

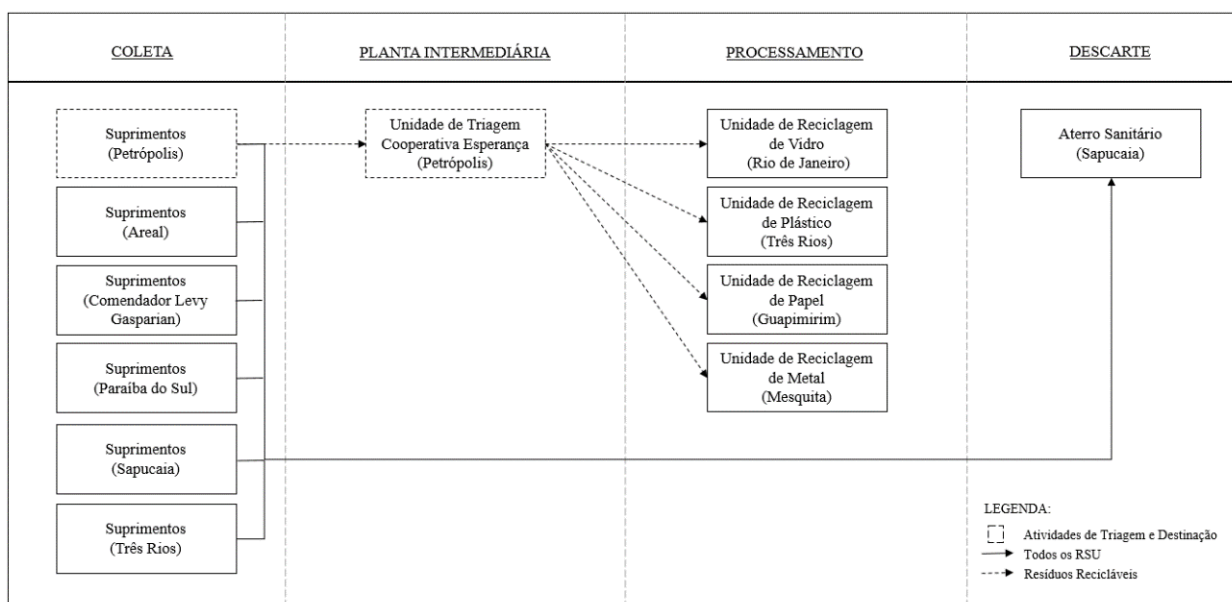


Figura 6.1: Sistema Logístico Reverso do RSU da Região Serrana II. **Fonte:** Elaborado pela autora.

Para o cálculo do *baseline* necessita-se a identificação de alguns parâmetros de *input* e definição de premissas para cálculo dos parâmetros econômicos e ambientais.

Iniciando-se pelo cálculo dos parâmetros econômicos, todos os parâmetros são específicos do estudo de caso.

- Custo de transporte unitário ($CVtp_{ab}$)

Para o cálculo do custo de transporte ($CTrans$) do sistema necessita-se identificar o custo unitário ($CVtp_{ab}$) de cada arco. Utiliza-se como base o manual de cálculo de custos e formação de preços do transporte rodoviário de carga do ano de 2013, divulgado pela Associação Nacional do Transporte de Carga e Logística (NTC). Avalia-se o custo fixo e variável de um caminhão pesado, transformando-o no valor unitário em reais por tonelada levando em consideração a densidade média do RSU e quilometragem mínima de operação. O cálculo detalhado pode ser visto no Anexo II.

- Custo de descarte unitário no aterro sanitário ($CDat_t$)

Para o cálculo do custo de descarte ($CDat$) necessita-se identificar o custo unitário de descarte no aterro sanitário ($CDat_t$). De acordo com Franca (2013), o $CDat_t$ no aterro sanitário do município de Sapucaia é de R\$ 90,49 por tonelada.

Para o cálculo dos parâmetros de emissão de GEE, neste estudo de caso, define-se a emissão de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Com o intuito de obter a informação do potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*), o valor de CH_4 será inserido no valor de CO_2 , multiplicando-o por 21, o que representa o impacto equivalente do metano em relação ao dióxido de carbono (Gendebien et al., 2003). Assim sendo, define-se a seguir os parâmetros ambientais para cálculo do *baseline*, em que todos os parâmetros de *input* são não específicos.

- Fator de emissão de GEE no transporte ($FeTrans$)

Para o cálculo da emissão de GEE na atividade de transporte ($GEETrans$), necessita-se da identificação do fator de emissão. De acordo com MMA (2014), o fator de emissão para caminhões pesados do CO_2 é de 0,797 kg/km e para CH_4 de 0,060 g/km, sendo o último com a necessidade de se transformar para a unidade kg/km para inserção no modelo matemático.

- Fator de emissão de GEE no descarte ao aterro sanitário (Fe_t)

Para o cálculo da emissão de GEE no descarte ao aterro sanitário (GEE_{Ater}) necessita-se a identificação do fator de emissão no aterro. Dessa forma, considerando como base o trabalho de Lino & Ismail (2012), utiliza-se o Fe_t do CO_2 a 30,46 kg por 1 tonelada de RSU e do CH_4 a 24,92 kg por 1 tonelada de RSU.

- Consumo de energia do diesel no transporte (E_{Tr})

Para o cálculo do consumo de energia no transporte necessita-se a identificação do parâmetro *input* E_{Tr} , que, de acordo com ORNL (2014), a energia liberada pelo diesel no transporte de veículo pesado corresponde a 36,4 MJ/l. Levando em consideração o rendimento de 2,4 km/l do combustível diesel pela NTC (2013), o E_{Tr} representa-se pelo valor de 15,17 MJ/km.

A partir das definições de premissas e parâmetros de *input*, elabora-se o *baseline* do sistema logístico reverso atual utilizando a formulação desenvolvida no Capítulo 4. O resultado pode ser observado na Tabela 6.3 e o detalhamento do cálculo no Anexo III deste trabalho.

Tabela 6.3: *Baseline* do Consórcio da Região Serrana II.

Parâmetro	Unidade	Baseline
Custo de transporte	R\$/dia	R\$ 12.463,60
Custo de descarte	R\$/dia	R\$ 25.383,06
B1 = Custo	R\$/dia	R\$ 37.846,67
GEE no transporte	kg de CO2-eq/dia	1.538,69
GEE no descarte	kg de CO2-eq/dia	155.339,08
B2 = Emissão de GEE	kg de CO2-eq/dia	156.877,77
B3 = Consumo de energia do CF	MJ/dia	29.240,98
B4 = Descarte	T/dia	280,51

Fonte: Elaborado pela autora.

6.5 – Etapa 5: Definição dos locais candidatos da planta TMB

Definem-se três localidades candidatos para a planta TMB. No município de Petrópolis, na unidade de triagem dos resíduos recicláveis da cooperativa Esperança; no município de Sapucaia, onde se localiza o aterro sanitário e no município de Cantagalo, onde se encontra o polo industrial.

As três localidades foram escolhidas no intuito de facilitar a obtenção de licença e aceitação da população local, já que existem agentes que operam com RSU nestas localidades. A partir das informações apresentadas até então, apresenta-se na Figura 6.2 os nós do sistema logístico reverso do RSU.

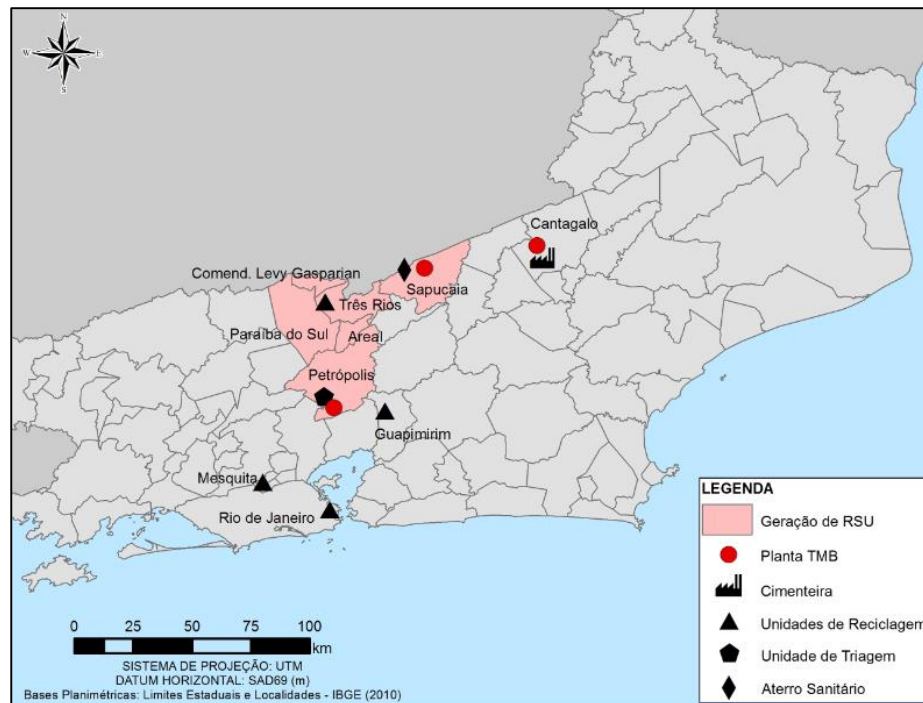


Figura 6.2: Nós do Sistema Logístico Reverso do RSU Atual. **Fonte:** Elaborado pela autora.

No mapa da Figura 6.2 pode se visualizar os três nós candidatos para a localização da planta TMB, bem como os demais nós do sistema. Os municípios do consórcio da Região Serrana II estão representados pela área rosa. Já os demais nós, como as unidades de reciclagem, a unidade de triagem, o aterro sanitário e o polo cimenteiro estão sendo apresentados por símbolos diversos no mapa do Estado do Rio de Janeiro.

6.6 – Etapa 6: Identificação dos parâmetros de *input*

Os parâmetros de *input* para composição do modelo matemático do cenário de inclusão do coprocessamento serão detalhados a seguir, iniciando-se pelos parâmetros não específicos.

- Custo do investimento na planta TMB (CF_{π})

A informação do custo de investimento da planta TMB foi baseada em EPEM (2014). Cabe salientar que o custo de investimento considerado foi de uma planta TMB com uma planta de compostagem agregada, uma vez que são similares para ambos a maior parte dos processos.

Dentre os 18 artigos da revisão bibliográfica que analisam temporalmente a gestão de RSU, apresentam-se análises em períodos entre 4 a 30 anos. No entanto, 11 destes artigos realizam análises em uma estrutura temporal de 15 anos.

Dessa forma, amortiza-se o investimento total da planta no período de 15 anos, levando em consideração uma decisão estratégia de longo prazo. Como metodologia utilizou-se o sistema de amortização Price, em que todas as prestações mensais são iguais, resultando no valor diário de R\$ 4.337,97 pela taxa anual de juros de longo prazo de 5,5% do BNDES do mês de março de 2015. O detalhamento do cálculo de amortização pode ser verificado no Anexo IV.

- Custo operacional da planta TMB ($CVpl_{\pi}$)

Da mesma forma que o custo de investimento, o custo operacional unitário foi baseado em EPEM (2014). Dessa forma, o valor utilizado para $CVpl_{\pi}$ no modelo matemático é de R\$ 96,00 por tonelada.

- Fator de diferença do poder calorífico do RDF com o CF ($PC_{RDF/CF}$)

O poder calorífico do CF e do RDF é distinto. Para o cálculo do valor do combustível fóssil (VCf), que deixa de ser utilizado com a substituição do RDF, necessita-se inserir no modelo um fator de diferença do poder calorífico entre estes dois combustíveis.

Levando em consideração o poder calorífico do RDF de 6.000kJ/kg e do CF de 34.000kJ/kg (Camargo *et al.*, 2006; FEAM, 2010), o poder calorífico do RDF representa 17,65% em comparação ao CF. Este fator deve ser multiplicado pelo valor unitário resultando no valor corrigido do CF.

- Grau de eficiência da planta TMB (f_{π})

Para o cálculo de todas as variáveis de decisão que utilizam o RDF, que são o valor do combustível fóssil (VCf), a emissão de GEE na indústria ($GEEInd$) e o consumo de energia pelo CF na indústria ($EInd$), necessita-se da inclusão do parâmetro de eficiência para transformação do RSU em RDF na planta TMB.

De acordo com Reza *et al.* (2013), para a produção de 1 tonelada de RDF demanda 2,5 toneladas RSU. Dessa forma, f_{π} é igual a 0,4. Este fator deve ser multiplicado com a quantidade de RSU para resultar na quantidade de RDF a ser gerado.

- Capacidade máxima da planta TMB ($\bar{k}_{\pi}$)

Da mesma forma que o custo de investimento e o custo operacional da planta TMB, a capacidade máxima foi baseada em EPEM (2014), sendo o valor de $\bar{k}_{\pi}$ de 150 toneladas por dia.

A seguir, detalham-se os parâmetros de *input* específicos deste estudo de caso.

- Custo do combustível fóssil ($CCF_p^{v=3}$)

O combustível fóssil mais utilizado na indústria cimenteira brasileira é o coque de petróleo, que em 2012 representou cerca de 75% do consumo total de combustível (CNI-ABCP, 2012). De acordo com Souza (2011), o custo unitário do coque de petróleo transportado ao município de Cantagalo é de R\$ 378,58 por tonelada.

No entanto, conforme detalhado anteriormente, levando em consideração a diferença do poder calorífico dos combustíveis ($PC_{RDF/CF}$), o custo do coque de petróleo é de R\$ 66,81 por tonelada considerando a utilização de 1 tonelada equivalente de RDF.

- Diferença da emissão de GEE entre combustível fóssil e RDF ($DifFe_p^{v=3}$)

Considerando o trabalho de Reza *et al.* (2013), a diferença de emissões dos GEE entre os combustíveis na queima no forno cimenteiro $DifFe_p^{v=3}$ para CO₂ é de 3.599 kg

por tonelada de RDF, e para CH₄ de 7,1 kg por tonelada de RDF. Estes valores já contemplam a diferença do poder calorífico do RDF com o CF.

- Consumo de energia com a utilização do CF ($E_p^{v=3}$)

A diminuição da energia produzida pelo combustível fóssil equivale a energia liberada pelo RDF enviado para a indústria cimenteira. Dessa forma, $E_p^{v=3}$ representa-se pelo valor de 6.000MJ/t (FEAM, 2010).

- Capacidade máxima da indústria ($\bar{g}_p^{v=3}$)

Para a substituição do CF com o RDF na indústria cimenteira, CNI-ABCP (2012) indica que a quantidade limite de substituição corresponde a 13% do poder calorífico do forno.

Assim, levando em consideração a diferença de poder calorífico entre os combustíveis e o consumo de coque no polo cimenteiro de Cantagalo, em que se estimam em 261 mil toneladas anuais (Lafarge, 2009), o valor da capacidade máxima de consumo do combustível alternativo é de 526,77 toneladas por dia.

Após a definição de todos os parâmetros de *input* do modelo matemático, nas Etapas sete e oito calcula-se o problema de localização-alocação de facilidade para inserção do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU.

6.7 – Etapa 7: Definição dos valores de restrições das funções objetivo

Nesta etapa do procedimento definem-se os valores das restrições para posterior inserção no problema multiobjetivo. Para tanto, pelo método *e-constraint*, calcula-se cada função objetivo separadamente, a fim de verificar os valores máximos e mínimos que servirão como limites do espaço de soluções do problema multiobjetivo.

Calculam-se os problemas mono-objetivo das funções F_1 , F_2 , F_3 e F_4 na forma de minimização e maximização dos objetivos. Em seguida, utilizando os parâmetros dos resultados obtidos, calculam-se as demais funções objetivo. Os resultados deste modelo apresentam-se na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Resultado do Problema Mono-objetivo e Cálculo das Demais Funções.

	F1: Custo		F2: GEE		F3: Energia		F4: Descarte	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
F1: Custo	67.436	97.460	67.436	93.123	67.436	93.123	77.879	93.123
F2: GEE	-35.713	159.306	-35.713	159.306	-35.713	159.306	-34.424	159.306
F3: Energia	-184.856	75.392	-184.856	75.392	-184.856	75.392	-160.356	75.392
F4: Descarte	186	281	186	281	186	281	186	281

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se pelos resultados que as funções objetivo se comportam de forma semelhante e para este estudo de caso não são conflitantes. Dessa forma, definem-se os menores valores de cada função objetivo como restrição, já que todos são funções de minimização.

Assim, estabelece-se o cenário para cálculo do problema multiobjetivo utilizando a função F_1 como função objetivo e as funções F_2 , F_3 e F_4 sendo inseridas no modelo como valores de restrições, conforme a Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Restrições para Resolução do Problema Multiobjetivo.

Valores de Restrições		
Restrição F2: GEE	$\leq$	-35.713
Restrição F3: Energia	$\leq$	-184.856
Restrição F4: Descarte	$\leq$	186

Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir a Etapa 8, calcula o problema multiobjetivo inserindo as restrições no modelo.

6.8 – Etapa 8: Cálculo do modelo matemático multiobjetivo

Na Etapa 8 deste procedimento calcula-se o problema multiobjetivo de acordo com o cenário de restrições estabelecidos na etapa anterior. O problema resulta na abertura de duas plantas TMB, que são nos municípios de Petrópolis e Sapucaia. A planta TMB localizada no município de Sapucaia tem preferência na alocação da oferta, com a sua capacidade máxima sendo utilizada pelo modelo. O resultado do problema multiobjetivo com suas respectivas variáveis de decisão apresentam-se na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Resultado do Problema Multiobjetivo.

Função Objetivo	Minimização F1
Custo de transporte	R\$ 17.479
Custo de investimento	R\$ 8.676
Custo operacional	R\$ 26.929
Custo de descarte	R\$ 16.867
Valor do combustível fóssil	-R\$ 2.515
F1: Custo (R\$/dia)	R\$ 67.436
Emissão de GEE no transporte	2.158
Emissão de GEE no descarte	103.223
Emissão de GEE na indústria	-141.093
F2: Emissão GEE (kg CO2/dia)	-35.713
Consumo de energia pelo CF no transporte	41.008
Consumo de energia pelo CF na indústria	-225.864
F3: Cons. de energia pelo CF (MJ/dia)	-184.856
F4: Descarte no aterro sanitário (t/dia)	186

Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir compara-se o resultado obtido com o *baseline* definido na Etapa quatro.

6.9 – Etapa 9: Comparação e avaliação do resultado com *baseline*

A nona etapa deste trabalho compara o resultado obtido na etapa anterior com os valores de *baseline* estabelecidos na Etapa 4 deste procedimento. A comparação dos resultados de cada função objetivo pode ser observada na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Comparação - Baseline x Cenário com Coprocessamento.

Função Objetivo	Baseline	Cenário c/ Coprocessamento
F1: Custo (R\$/dia)	R\$ 37.847	R\$ 67.436
F2: Emissão GEE (kg CO2/dia)	156.878	-35.713
F3: Cons. de energia (MJ/dia)	29.241	-184.856
F4: Descarte no aterro sanitário (t/dia)	281	186

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que o cenário resultante apresenta abertura de duas plantas TMB nos municípios de Petrópolis e Sapucaia, representando aumento de 78% no custo do sistema. No entanto, apresenta diminuição de 123% da emissão de GEE, diminuição de

732% no consumo energético do CF e diminuição de 34% de descarte no aterro sanitário, comparando com o sistema existente.

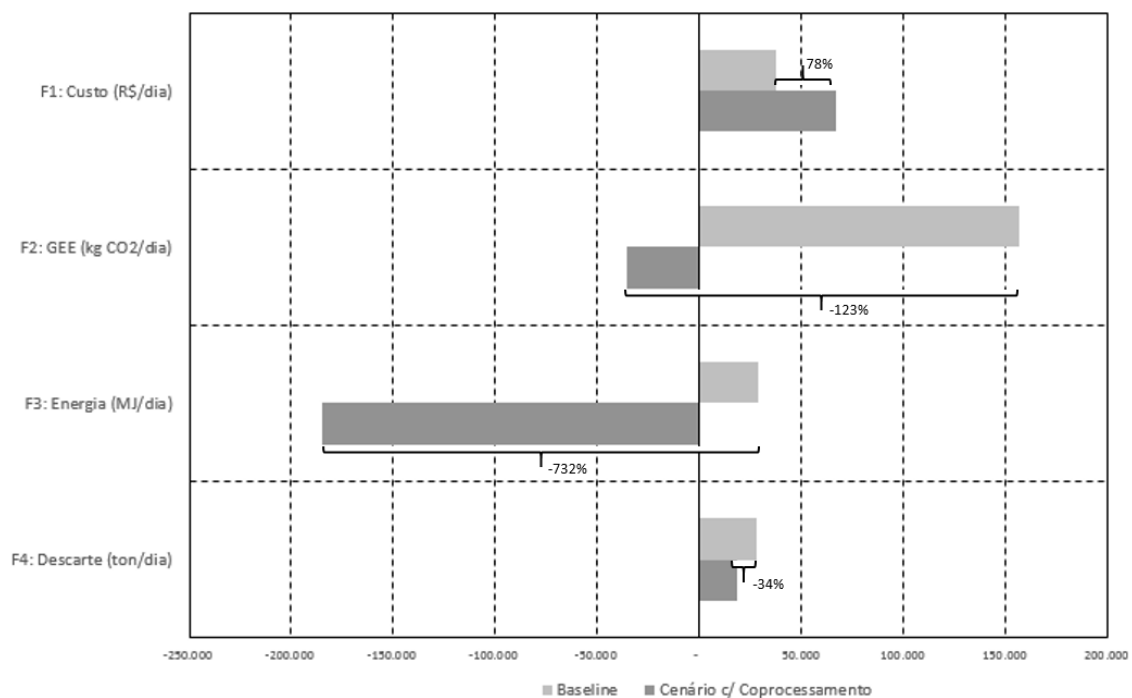


Figura 6.3: Comparação *Baseline* x Cenário com Coprocessamento. **Fonte:** Elaborado pela autora.

Na Figura 6.3, apresenta-se a diferença do resultado de cada uma das funções objetivo. Ressalta-se que foi necessário multiplicar por 100 os resultados da função objetivo F_4 , para encaixá-los na mesma ordem de grandeza dos demais resultados, com o intuito de melhorar a visualização do gráfico.

6.10 – Etapa 10: Análise de sensibilidade

A décima e última etapa do procedimento refere-se à análise de sensibilidade dos resultados obtidos até então. Para tanto, avalia-se a priori o resultado de cada função objetivo no nível dos parâmetros de decisão. Os resultados apresentam-se na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Comparação Detalhada - Baseline x Cenário com Coprocessamento.

Função Objetivo	Baseline	Cenário c/ Coprocessamento
Custo de transporte	R\$12.464	R\$ 17.479
Custo de investimento	-	R\$ 8.676
Custo operacional	-	R\$ 26.929
Custo de descarte	R\$ 25.383	R\$ 16.867
Valor do combustível fóssil	-	-R\$ 2.515
F1: Custo (R\$/dia)	R\$ 37.847	R\$ 67.436
Emissão de GEE no transporte	1.539	2.158
Emissão de GEE no descarte	155.339	103.223
Emissão de GEE na indústria	-	-141.093
F2: Emissão GEE (kg CO2/dia)	156.878	-35.713
Consumo de energia pelo CF no transporte	29.241	41.008
Consumo de energia pelo CF indústria	-	-225.864
F3: Cons. de energia pelo CF (MJ/dia)	29.241	-184.856
F4: Descarte no aterro sanitário (t/dia)	281	186

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação aos parâmetros econômicos, houve um aumento de 40% no custo de transporte devido a maior movimentação do RSU, porém diminuição de 34% no custo de descarte devido à maior valorização dos resíduos pelo coprocessamento. Os custos de investimento e operacional da planta TMB representam 53% do custo total do sistema com coprocessamento.

Em relação aos parâmetros ambientais, devido à maior movimentação dos resíduos, houve aumento de 40% na emissão de GEE no transporte e consumo de energia pelo CF no transporte. No entanto, este é compensado pela diminuição de 34% do envio dos resíduos aos aterros sanitários e pela diminuição de emissão de GEE e consumo de energia proveniente do CF na indústria.

Percebe-se que os custos de investimento e operacional da planta TMB tem grande representatividade no resultado do custo do sistema. Assim, entende-se a necessidade de avaliar um novo cenário no intuito de analisar o *trade-off* do aumento do envio do RSU ao aterro e diminuição do custo da planta TMB.

Dessa forma, avalia-se um novo cenário que possibilita que a planta TMB seja utilizada como estação de transferência para envio do RSU ao aterro sanitário, e não

necessariamente que 100% do resíduo seja inserido no processo de tratamento. Para tanto, no modelo matemático aumenta-se a capacidade de recebimento em uma planta TMB, porém limita-se a quantidade de resíduo a ser processado à capacidade real de tratamento, fazendo com que a quantidade sobressalente seja destinada em seguida ao aterro sanitário.

Apresenta-se na Tabela 6.9 a comparação do *baseline* com o resultado dos dois cenários, definindo-se como cenário 1 (C1) o sistema originalmente otimizado e como cenário 2 (C2) o sistema considerando parte da planta TMB atuando como estação de transferência.

Tabela 6.9: Comparação Detalhada - Baseline x C1 x C2.

Função Objetivo	Baseline	C1	C2
Custo de transporte	R\$12.464	R\$ 17.479	R\$ 15.727
Custo de investimento	-	R\$ 8.676	R\$ 4.338
Custo operacional	-	R\$ 26.929	R\$ 14.400
Custo de descarte	R\$ 25.383	R\$ 16.867	R\$ 21.125
Valor do combustível fóssil	-	- R\$ 2.515	- R\$ 1.257
F1: Custo (R\$/dia)	R\$ 37.847	R\$ 67.436	R\$ 54.333
Emissão de GEE no transporte	1.539	2.158	1.942
Emissão de GEE no descarte	155.339	103.223	129.281
Emissão de GEE na indústria	-	- 141.093	- 70.547
F2: Emissão GEE (kg CO2/dia)	156.878	- 35.713	60.676
Consumo de energia pelo CF no transporte	29.241	41.008	36.897
Consumo de energia pelo CF na indústria	-	- 225.864	- 112.932
F3: Cons. de energia pelo CF (MJ/dia)	29.241	-184.856	- 76.035
F4: Descarte no aterro sanitário (t/dia)	281	186	233

Fonte: Elaborado pela autora.

O C2 resulta na abertura da planta TMB no município de Sapucaia, fazendo com que o custo do sistema diminua 19% e a quantidade de descarte para o aterro sanitário aumente 25%, em comparação ao C1.

Em comparação com o *baseline*, houve aumento do custo no sistema de 44%, porém os parâmetros ambientais continuam se compensando, com diminuição de 61% da emissão de GEE, diminuição de 360% no consumo de energia pelo CF e diminuição de 17% no envio do RSU para descarte. A comparação entre o *baseline* e os cenários

pode ser visualizado na Figura 6.4. Da mesma forma que a Figura 6.3 o resultado da função objetivo F_4 foi multiplicado por 100.

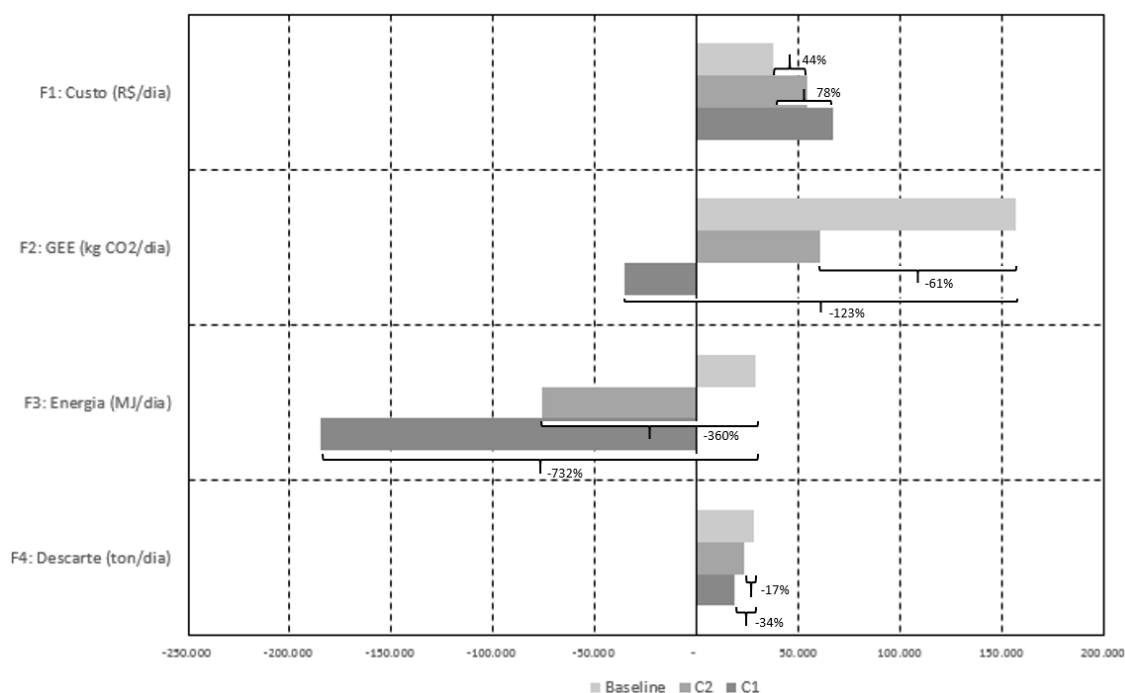


Figura 6.4: Comparação *Baseline* x C1 x C2. **Fonte:** Elaborado pela autora.

Avaliando a Figura 6.4, percebe-se que o C2 pode ser uma possibilidade de implantação intermediária até chegar ao objetivo do cenário 1 para que o aumento no custo do sistema não ocorra de forma repentina.

Outro fator que merece atenção é a dificuldade progressiva de descarte do RSU aos aterros sanitários ao longo dos próximos anos devido ao aumento do custo de descarte proveniente do surgimento de nova legislação de cunho ambiental e pelo aumento do custo da utilização do solo. Este cenário já pode ser evidenciado nos países desenvolvidos.

Dessa forma, avaliam-se os resultados com o ajuste no *baseline* com o aumento do custo de descarte de forma progressiva, levando em consideração a tendência do histórico de custos médios apresentados por IPEA (2012) no período de 5, 10 e 15 anos.

A evolução projetada dos custos de descarte apresenta-se na Figura 6.5, sendo o custo projetado para o ano de 2020 de R\$ 118,70 por toneladas, para o ano de 2025 de R\$ 146,91 por tonelada e para o ano de 2030 no valor de R\$ 175,11 por tonelada.

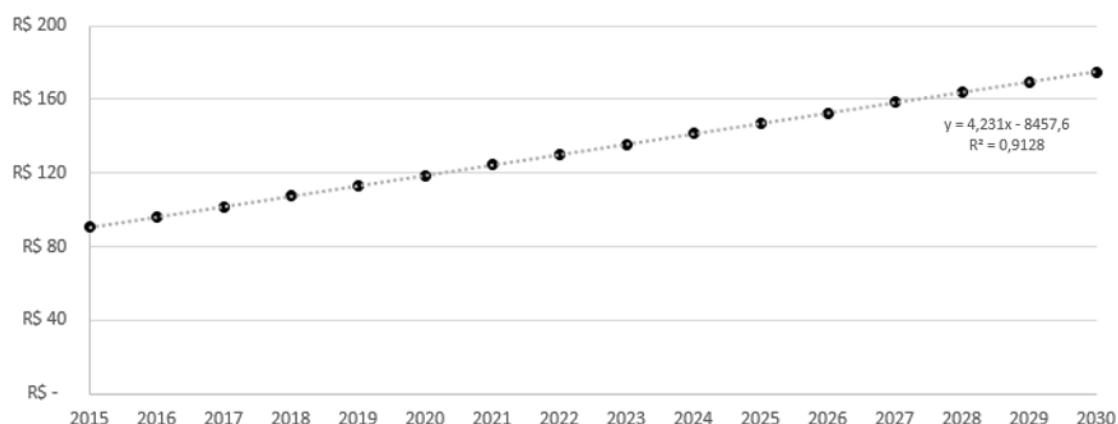


Figura 6.5: Evolução do Custo de Descarte em R\$/t. **Fonte:** Elaborado pela autora.

Apresenta-se na Tabela 6.10 a comparação do *baseline* (B1) com o *baseline* ajustado em 3 cenários (B2, B3 e B4) com o resultado dos dois cenários (C1 e C2), definindo-se como *baseline* 1 (B1) como o original, *baseline* 2 (B2) com o custo de descarte no período de 5 anos, o *baseline* 3 (B3) com o custo de descarte em 10 anos e o *baseline* 4 (B4) em 15 anos.

Tabela 6.10: Comparação Detalhada – B1 x B2 x B3 x B4 x C1 x C2.

Função Objetivo	B1	B2	B3	B4	C1	C2
CTrans	R\$12.464	R\$ 12.464	R\$ 12.464	R\$ 12.464	R\$ 17.479	R\$ 15.727
CI	-	-	-	-	R\$ 8.676	R\$ 4.338
COper	-	-	-	-	R\$ 26.929	R\$ 14.400
CDat	R\$ 25.383	R\$ 33.296	R\$ 41.209	R\$ 49.120	R\$ 16.867	R\$ 21.125
VCf	-	-	-	-	- R\$ 2.515	- R\$ 1.257
F1: Custo (R\$/dia)	R\$ 37.847	R\$ 45.760	R\$ 53.673	R\$ 61.583	R\$ 67.436	R\$ 54.333
GEETrans	1.539	1.539	1.539	1.539	2.158	1.942
GEEAter	155.339	155.339	155.339	155.339	103.223	129.281
GEEInd	-	-	-	-	- 141.093	- 70.547
F2: GEE (kg CO2/dia)	156.878	156.878	156.878	156.878	- 35.713	60.676
ETrans	29.241	29.241	29.241	29.241	41.008	36.897
EInd	-	-	-	-	- 225.864	- 112.932
F3: Energia (MJ/dia)	29.241	29.241	29.241	29.241	-184.856	- 76.035
F4: Descarte (t/dia)	281	281	281	281	186	233

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se com esta análise que apenas com o aumento do custo de descarte, em 15 anos o custo do sistema total aproxima-se do custo da implantação do cenário 1, sendo a diferença do custo de 9%.

Observa-se que em todos os cenários, se for levando em consideração os parâmetros ambientais, os resultados apresentam-se favoráveis para a implantação do coprocessamento do sistema logístico reverso do RSU. Além da diminuição considerável da quantidade de descarte do resíduo no aterro sanitário, a diminuição da emissão de GEE e de consumo de energia pelo CF são ainda mais relevantes.

Além disso, neste estudo de caso observa-se um aumento considerável no custo do sistema, mesmo levando em consideração a diminuição do custo do combustível fóssil na indústria e a diminuição de descarte no aterro sanitário. No entanto, em análise detalhada dos parâmetros de custo, verifica-se que há possibilidade de cenário intermediário, e com a projeção do aumento de custo ao longo dos próximos anos os custos dos sistemas podem se equivaler.

Dessa forma, cabe entender o quanto o peso do fator ambiental é relevante para a possibilidade de um subsídio da diferença de custos até que em alguns anos este modelo se torne viável de forma econômica e ambiental.

7 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do coprocessamento é uma alternativa interessante para valorização do RSU e aumento da sustentabilidade do sistema logístico reverso. A diminuição do envio do RSU ao aterro sanitário é uma consequência direta deste processo. Além disso, a diminuição da emissão de GEE no sistema e a diminuição do consumo energético proveniente dos combustíveis fóssil fortalecem as vantagens ambientais para a inclusão deste processo no sistema.

Entretanto, o estudo de caso exposto nesta dissertação, apresentou um resultado onde há um aumento de 78% no custo total do sistema, mesmo levando em consideração a diminuição do custo do combustível fóssil na indústria. Após análise detalhada dos custos da planta TMB e do custo de descarte, verificou-se que a diferença de custos no sistema diminuiu ao passar dos anos, além de ter a possibilidade de implantar o processo de forma progressiva.

Neste contexto, esta dissertação teve o seu objetivo cumprido, que visa definir um procedimento para analisar a inclusão do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU e verificar se o cenário estruturado é recomendável em relação ao cenário existente.

Este objetivo foi cumprido por meio das resoluções das problemáticas do trabalho, no qual se inicia pela falta de integração nos campos de estudo da logística reversa e gestão de resíduos. O trabalho considerou uma abordagem diferenciada que integra os conceitos destes dois temas, simplificando as terminologias e visualizando as similaridades nas estruturas de atividades e na hierarquização dos métodos de valorização do RSU, representando a primeira contribuição inovadora deste trabalho.

A partir desta conceitualização foi possível sintetizar os artigos encontrados na revisão bibliográfica narrativa, identificando-os e classificando-os de acordo com a estrutura estabelecida anteriormente. Através deste trabalho, elaborou-se o modelo conceitual do sistema logístico reverso do RSU para coprocessamento, mais uma contribuição desta dissertação.

A revisão bibliográfica narrativa mostrou-se uma metodologia adequada para elaboração deste trabalho. No entanto, entende-se que a principal limitação foi a consideração apenas de literatura originados no Brasil, Estados Unidos, Canadá, México, União Europeia, China e Índia. Dessa forma, recomenda-se para estudos futuros a consideração de um número maior de estudos em ambientes diversificados, podendo apresentar estruturas da logística reversa do RSU diferentes dos analisados neste estudo.

Com o modelo conceitual estabelecido e análise dos modelos matemáticos apresentados na revisão bibliográfica, definiu-se o método a ser utilizado para a resolução do problema de localização-alocação de facilidade multiobjetivo. Através da PLIM e do método *e-constraint*, desenvolveu-se o modelo matemático para a inclusão do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU, outra contribuição desta dissertação.

Para futuros trabalhos sugere-se a adoção de outros métodos matemáticos para a resolução do problema multiobjetivo. Acredita-se que a utilização de métodos evolutivos podem também trazer resultados interessantes em função da característica das informações do resíduo que não são tão precisas, podendo assim realizar uma comparação nos resultados entre métodos diversos.

Além disso, a definição e inclusão de parâmetros sociais para estruturação do sistema logístico reverso do RSU pode ser uma abordagem diferente para futuros trabalhos, uma vez que a maioria das literaturas não abrangem estes parâmetros.

Com o resultado de cada capítulo e o desenvolvimento do objeto de estudo ao longo deste trabalho, elaborou-se o procedimento de inclusão e análise do coprocessamento no sistema logístico reverso do RSU. Este procedimento serve como metodologia para outros trabalhos que visam a verificação deste mesmo tema em alguma determinada região.

No entanto, para futuros trabalhos cabe avaliar a necessidade de utilização de uma ferramenta de otimização mais robusta em função da quantidade de informações de

geração do RSU e pontos candidatos de localidade da planta TMB, já que a ferramenta utilizada neste trabalho não suporta a otimização de modelos de alta complexidade.

O resultado do Capítulo 5 pode ser considerado como a principal contribuição deste trabalho, no qual abrange todas as demais contribuições até então mencionadas. A partir deste procedimento, desenvolveu-se o estudo de caso no qual se pode verificar os resultados de forma prática.

Por fim, este trabalho destaca-se pelo apoio que pode conceder ao Estado para a tomada de decisão estratégica da estruturação do sistema logístico reverso do RSU de seus municípios, almejando uma gestão de resíduos de forma sustentável e economicamente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE, 2013, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil.
- ABRELPE, ISWA, 2013, *Resíduos Sólidos: Manual de Boas Práticas no Planejamento*, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais e International Solid Waste Association, São Paulo, Brasil.
- ABRELPE, PLASTIVIDA, 2012, *Caderno Informativo Resíduo Sólido Urbano – Recuperação Energética*, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais e Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos, São Paulo, Brasil.
- Akasaka, Y., D'Agosto, M.A., *In press* 2015, “Modelo Conceitual do Sistema Logístico Reverso do Resíduo Sólido Urbano”, *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*.
- Aragónes-Béltran, P., Pastor-Ferrando, J.P., García-García, F., Pascual-Agulló, A., 2010, “An Analytic Network Process Approach for Siting a Municipal Solid Waste Plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain)”, *Journal of Environmental Management*, v. 91 (Jan), pp. 1071-1086.
- Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F.J., 2010, “Environmental Assessment of Alternative Municipal Solid Waste Management Strategies. A Spanish Case Study”, *Waste Management*, v. 30, n. 11 (Abr), pp. 2383-2395.
- Brasil, 2010, Lei 12305 – *Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Casa Civil, Presidência da República do Brasil.
- Brizio, E., Genon, G., 2008, “Perspective and Limits for Cement Kilns as a Destination for RDF”, *Waste Management*, v. 28, n. 11 (Jan), pp. 2375-2385.
- Camargo, M., Kobayoshi, M., Carvalho, M.F.H., 2006, *Produção de Coque de Petróleo e sua Estratégia de Negociação*, XIII SIMPEP, Bauru, São Paulo – Brasil.
- Chang, N.B., Davila, E., 2007, “Minimax Regret Optimization Analysis for a Regional Solid Waste Management System”, *Waste Management*, v. 27, n. 6 (Jun), pp. 820-832.
- Chang N., Qi, C., Islam, K., Hossain, F., 2012, “Comparisons between Global Warming Potential and Cost-benefit Criteria for Optimal Planning of a Municipal Solid Waste Management System”, *Journal of Cleaner Production*, v. 20, n. 1 (Ago), pp. 1-13.
- Chen, B., Li, P., 2011, “FSILP: Fuzzy-Stochastic-Interval Linear Programming for Supporting Municipal Solid Waste Management”, *Journal of Environmental Management*, v. 92 (Jan), pp. 1198-1209.
- Cheng, H., Hu, Y., 2010, “Municipal Solid Waste (MSW) as a Renewable Source of Energy: Current and Future Practices in China”, *Biosresource Technology*, v. 101, n. 11 (Jan), pp. 3816–3824.
- Chi, J.D.Y., Fu, D.Z.C., Huang, Q., Ni, M., 2014, “Energy-Environment-Economy Assessment of Waste Management Systems from a Life Cycle Perspective: Model Development and Case Study”, *Applied Energy*, v. 114 (Out), pp. 400-408.
- CNI-ABCP, 2012, *Indústria Brasileira de Cimento: Base para a Construção do Desenvolvimento*, Confederação Nacional da Indústria e Associação Brasileira de Cimento Portland, Brasília, Brasil.
- Deb, K., 2001, *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization, JohnWiley & Sons, Chichester, England.

- De Brito, M.P., Dekker, R., 2003, *A Framework for Reverse Logistics*, Erasmus Research, Institute of Management Report Series Research In Management, Erasmus University, Rotterdam.
- Dekker, R., Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E., VanWassenhove, L.N., 1997, “Quantitative Models for Reverse Logistics: a Review”, *European Journal of Operational Research*, v. 103, n. 1 (Jun)pp. 1-17.
- Dutta, A., Chattopadhyay, S., Ray, S., 2009, “Municipal Solid Waste Management in Kolkata, India – A review”, *Waste Management*, v. 29, n. 4 (Dez), pp. 1449-1458.
- EC, 2010, *Being Wise with Waste: the EU's Approach to Waste management*, European Commission, Luxembourg.
- EPA, 1974, *Decision-Makers Guide in Solid Waste Management*, Environmental Protection Agency, Washington, DC, Estados Unidos.
- EPA, 1995, *Decision-Makers Guide in Solid Waste Management – Vol. II*, Environmental Protection Agency, Washington, DC, Estados Unidos.
- EPA, 2011, *Municipal Solid Waste in the United States: 2011 Facts and Figures*, Environmental Protection Agency, Washington, DC, Estados Unidos.
- EPEM, 2014, *Database of Waste Management Technologies*, Disponível em: <<http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/costdata-00.htm>>, Acesso em 13nov2014.
- Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., Tjandra, S.A., 2008, “A Multicriteria Facility Location Model for Municipal Solid Waste Management in North Greece”, *European Journal of Operational Research*, v. 187, n. 3 (Nov), pp. 1402-1421.
- EUBIONET, 2003, *Biomass Co-firing: an Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions*, European Bioenergy Networks, Finlândia.
- EUROSTAT, 2014, *Municipal Waste Statistic*, Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment_by_country>, Acesso em 30out2014.
- Farahani, R.Z., SteadieSeifi, M., Asgari, N., 2010, “Multiple Criteria Facility Location Problems: a Survey”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 34, n. 7 (Out), pp. 1689-1709.
- FEAM, 2010, *Análise Técnica e Ambiental da Utilização de Resíduos Sólidos Urbanos na Produção de Cimento (Coprocessamento)*, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, Brasil.
- Feo, D., Malvano, C., 2009, “The Use of LCA in Selecting the Best MSW Management System”, *Waste Management*, v. 29, n. 6 (Jan) , pp. 1901-1915.
- Fernández-Nava, Y., Río, J., Rodríguez-Iglesias, J., Castrillón, L., Marañón, E., 2014, “Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Options: A Case Study of Asturias (Spain)”, *Journal of Cleaner Production*, v. 81 (Jun), pp. 178-189.
- Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P., 2000, “A Characterization of Logistics Networks for Product Recovery”, *Omega The International Journal of Management Science*, v. 28 (Fev), pp. 653–666.
- Franca, L.S., 2013, *Uma Proposta para a Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos na Região Serrana II, Considerando as Práticas de Reciclagem e Compostagem*, Tese de Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Galante, G., Aiello, G., Enea, M., Panascia, E., 2010, “A Multi-objective Approach to Solid Waste Management”, *Waste Management*, v. 30, n. 8-9 (Mar), pp. 1720-1728.

- Garcia, V.J., 2005, *Metaheurísticas Multiobjetivo para o Problema de Restauração do Serviço em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*, D.Sc., Tese em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil.
- Gendebien, A., Leavens, A., Blackmore, K., Godley, A., Lewin, K., Whiting, K.J., Davis, R., 2003, *Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3) Final Report*, European Commission, Directorate General Environment.
- Guabiroba, R.C.S., 2013, *Procedimento para Definição de Consórcio Públicos Responsáveis pela Coleta de Resíduos Recicláveis Domiciliares com Base em Medidas de Eficiência*, Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Hale, B., Miranda, M.L., 1997, "Waste Not, Want Not: the Private and Social Costs of Waste-to-Energy Production", *Energy Policy*, v. 25, n. 6, pp. 587-600.
- Hong-tao, W., Bao-guo, T., Ji-tao, S., Yan, Z., Ji-ming, H., 2007, "Approach of Technical Decision-Making by Element Flow Analysis and Monte-Carlo Simulation of Municipal Solid Waste Stream", *Journal of Environmental Science*, v. 19, n. 5 (Dez), pp. 633-640.
- Huang, G.H., Xu, Y., Qin, X.S., Cao, M.F., 2009_a, "SRCCP: A Stochastic Robust Chance-Constrained Programming Model for Municipal Solid Waste Management Under Uncertainty", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n.6 (Mar), pp. 352-363.
- Huang, G.H., Jing, S., Xi, B.D., Li, Y.P., Qin, X.S., Huo, S.L., Jiang, Y., 2009_b, "A Hybrid Inexact Optimization Approach for Solid Waste Management in the City of Foshan, China", *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 2 (Nov), pp. 389-402.
- Huang, G.H., Sun, Y., Li, Y.P., 2010, "ICQSWM: An inexact chance-constrained quadratic solid waste management model", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, n. 10 (Nov), pp. 641-657.
- Huang, G.H., Li, Y.P., Dai, C., 2011, "A Two-Stage Support-Vector-Regression Optimization Model for Municipal Solid Waste Management – A Case Study of Beijing, China", *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 12 (Ago), pp. 3023-3037.
- Huang, G.H., Zhu, H., 2011, "SLFP: A Stochastic Linear Fractional Programming Approach for Sustainable Waste Management", *Waste Management*, v. 31, n. 12 (Set), pp. 2612-2619.
- Huang, G.H., Wang, S., Yang, B.T., 2012, "An Interval-Valued Fuzzy-Stochastic Programming Approach and Its Application to Municipal Solid Waste Management", *Environmental Modelling & Software*, v. 29, n.1 (Nov), pp. 24-36.
- Hui, Y., Li'ao W., Fenwei, S., Gang, H., 2006, "Urban Solid Waste Management: Challenges and Opportunities", *Waste Management*, v. 26, n. 9 (Nov), pp.1052-1062.
- IBAM, 2001, *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*, Instituto Brasileiro de Administração Municipal, Brasil.
- IBGE, 2014, *Informações sobre os Municípios Brasileiros*, Disponível em <<http://www.cidades.ibge.gov.br>>, Acesso em 17nov2014.
- Ionescu, G., Rada, E.C., Ragazzi, M., Marculescu, C., Badea, A., Apostol, T., 2013, "Integrated Municipal Solid Waste Scenario Model using Advanced Pretreatment and Waste to Energy Processes", *Energy Conservation and Management*, v. 76 (Ago), pp. 1083-1092.

- IPEA, 2012, *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos – Relatório de Pesquisa*, Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, Brasil.
- IPTS, 2003, *Energy Consumption and CO₂ Emissions from the World Iron and Steel Industry*, European Communities e Institute for Prospective Technological Studies.
- Komilis, D., Miniglou, M., 2013, “Optimizing the Treatment and Disposal of Municipal Solid Wastes using Mathematical Programming – A Case Study In a Greek Region”, *Resources, Conservation and Recycling*, v. 80 (Ago), pp. 46-57.
- Lafarge, 2009, Press Release: *Lafarge desenvolve primeiro projeto de coprocessamento de resíduo urbano no Brasil*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Levis, J.W., Barlaz, M.A., DeCarolís, J.F., Ranjithan, S.R., 2013, “A Generalized Multistage Optimization Modeling Framework for Life Cycle Assessment-Based Integrated Solid Waste Management”, *Environmental Modelling & Software*, v. 50 (Set), pp. 51-65.
- Li, Y.P., Huang, G.H., Yang, Z.F., Nie, S.L., 2008, “An Integrated Two-Stage Optimization Model for the Development of Long-term Waste-Management Strategies”, *Science of the Total Environment*, v. 392, n. 2-3 (Nov), pp. 175-186.
- Li, Y.P., Dai, C., Huang, G.H., 2011_a, “A Two-Stage Support-Vector-Regression Optimization Model for Municipal Solid Waste Management – A Case Study of Beijing, China”, *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 12, pp. 3023-3037.
- Li, Y.P., Cui, L., Chen, L.R., Huan, G.H., Li, W., Xie, Y.L., 2011_b, “An Interval-Based Regret-Analysis Method for Identifying Long-term Municipal Solid Waste Management Policy under Uncertainty”, *Journal of Environmental Management*, v. 92 (Fev), pp. 1484-1494.
- Li’ao, W., Ting’quan, P., Chuan, H., Hui, Y., 2009, “Management of Municipal Solid Waste in the Three Gorges Region”, *Waste Management*, v. 29, n. 7 (Mar), pp. 2203-2208.
- Lino, F.A.M., Ismail, K.A.R., 2012, “Analysis of the Potential of Municipal Solid Waste in Brazil”, *Environmental Development*, n. 4, pp. 105-113.
- Lu, H.W., Huang, G.H., Xu, Y., He, L., 2012, “Inexact Two-Phase Fuzzy Programming and Its Application to Municipal Solid Waste Management”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 25, n. 8 (Set), pp. 1529-1536.
- Mavrotas, G., Skoulaxinou, S., Gakis, N., Katsouros, V., Georgopoulou, E., 2013, “A Mult-objective Programming Model for Assessment the GHG Emissions in MSW Management”, *Waste Management*, v. 33, n. 9 (Jun), pp. 1934-1949.
- McKay, G., Choy, K.K.H., Ko, D.C.K., Cheung, W.H., Fung, J.S.C., Hui, D.C.W., Porter, J.F., 2004. “Municipal Solid Waste Utilization for Integrated Cement Processing with Waste Minimization: A Pilot Scale Proposal”, *Process Safety and Environmental Protection*, v. 82 (Mai), pp. 200-207.
- Mckinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., Whiteing, A., 2010, *Green Logistics. Improving the environmental sustainability of logistics*, Pittsburg, Kogan Page Limited.
- Messineo, A., Panno, D., 2008, “Municipal Waste Management In Sicily: Practice and Challenges”, *Waste Management*, v. 28, n. 7 (Jul), pp. 1201-1208.
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., Giusti, A., Yi, L., 2009, “Municipal Solid Waste Management in Pudong New Area, China”, *Waste Management*, v. 29, n. 3 (Out), pp. 1227-1233.

- MMA, 2014, *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*, Relatório Ano-Base 2012, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brasil.
- Moedinger, F., Rada, E.C., Ragazzi, M., Ionescu, G., Raboni, M., Torretta, V., 2014, "Municipal Solid Waste Treatment by Integrated Solutions: Energy and Environmental Balances", *Energy Procedia*, n. 50, pp. 1037-1044.
- Morrissey, A.J., Browne, J., 2004, "Waste Management Models and their Application to Sustainable Waste Management", *Waste Management*, v. 24, n. 3 (Set), pp. 297-308.
- Murtz, D., Morf, L., 2007, *The Concept of Co-processing Waste Material in the Energy-Intensive Industries*, University of Applied Sciences Northwestern Switzerland.
- NTC, 2013, *Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Carga*, Associação Nacional do Transporte de Carga e Logística, São Paulo, Brasil.
- Ogryczak, W., 1997, "On the Lexicographic Minimax Approach to Location Problems", *European Journal of Operational Research*, v. 100, n. 3, pp. 566-585.
- Oliveira, L.N., Rosa, L.P., 2003, "Brazilian Waste Potential: Energy, Environmental, Social and Economic Benefits", *Energy Policy*, v. 31, n. 14, pp. 1481-1491.
- ORNL, 2014, *Transportation Energy Data Book*, U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Disponível em: <<http://cta.ornl.gov/data/chapter2.shtml>>, Acesso em 09dez2014.
- Pires, A., Chang, N., Martinho, G., 2011, "An AHP-based Fuzzy Interval TOPSIS Assessment for Sustainable Expansion of the Solid Waste Management System in Setúbal Peninsula, Portugal", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 56, n. 1 (Ago), pp. 7-21.
- Pokharel, S., Mutha, A., 2009, "Perspective in Reverse Logistics: A Review", *Resources, Conservation and Recycling*, v.53, n. 1 (Jun), pp.175-182.
- Ravindra, K., Kaur, K., Mor, S., 2015, "System Analysis of Municipal Solid Waste Management in Chandigarh and Minimization Practices for Cleaner Emissions", *Journal of Cleaner Production*, v. 89 (Out), pp. 251-256.
- Reza, B., Soltani, A., Ruparathna, R., Sadiq, R., Hewage, K., 2013, "Environmental and Economic Aspects of Production and Utilization of RDF as Alternative Fuel in Cement Plants: a Case Study of Metro Vancouver Waste Management", *Resources, Conservation and Recycling*, n. 81, pp. 105-114.
- Robba, M., Costi, P., Minciardi, R., Rovatti, M., Sacile, R., 2004, "An Environmentally Sustainable Decision Model for Urban Solid Waste Management", *Waste Management*, v. 24, n. 3 (Abr), pp. 277-295.
- Robba, M., Minciardi, R., Paolucci, M., Sacile, R., 2008, "Multi-objective Optimization of Solid Waste Flows: Environmentally Sustainable Strategies for Municipalities", *Waste Management*, v. 28, n. 11 (Nov), pp. 2202-2212.
- Roca, E., Herva, M., Neto, B., 2014, "Environmental Assessment of the Integrated Municipal Solid Waste Management System in Porto (Portugal)", *Journal of Cleaner Production*, v. 70 (Fev), pp. 183-193.
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S., 1998. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*, Reverse Logistics Executive Council, Pittsburg, PA.
- SEA/INEA, 2013, *Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro: Relatório Síntese 2013*, Secretaria Estadual do Ambiente e Instituto Estadual do Ambiente, Governo do Estado do Rio de Janeiro, RJ.

- Semiao, V., Magrinho, A., Didelet, F., 2006, "Municipal Solid Waste Disposal in Portugal", *Waste Management*, v. 26, n. 12, pp. 1477-1489.
- SMA/CEA, 2011, *Guia Pedagógico do Lixo*, 6ª Edição, Secretaria do Meio Ambiente e Coordenadoria de Educação Ambiental, São Paulo, Brasil.
- SNIC, 2012, *Relatório Anual, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Souza, C.D.R., 2011, *Análise da Cadeia de Valor Aplicada a Cadeias Logísticas Reversas, uma Contribuição ao Reaproveitamento de Pneus Inservíveis*, M.Sc. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Srivastava, A.K., Nema, A.K., 2012, Fuzzy Parametric Programming Model for Multi-objective Integrated Solid Waste Management under Uncertainty, *Expert System with Applications*, v. 39, n. 5, pp. 4657-4678.
- SRHU/MMA, 2011, *Guia de Elaboração dos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano*, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, Brasil.
- Stehlík, P., Tabasová, A., Kropác, J., Kermes, V., Nemet, A., 2012, "Waste-to-Energy Technologies: Impact on Environment", *Energy*, v. 44, n. 1 (Fev), pp. 146-155.
- Su, J., Xi, B.D., Liu, H.L., Warith, M.A., 2008, "An Inexact Multi-Objective Dynamic Model and Its Application in China for the Management of Municipal Solid Waste", *Waste Management*, v. 28, n. 12 (Jun), pp. 2532-2541.
- Su, J., Xi, B.D., Huang, G.H., Qin, X.S., Jiang, Y.H., Huo, S.L., Ji, D.F., Yao, B., 2010, "An Integrated Optimization Approach and Multi-Criteria Decision Analysis for Supporting the Waste-Management System of the City of Beijing, China", *Engineering Application of Artificial Intelligence*, v. 23, n. 4 (Fev), pp. 620-631.
- Talyan, V., Dahiya, R.P., Sreekrishnan, T.R., 2008, "State of Municipal Solid Waste Management in Delhi, the Capital of India", *Waste Management*, v. 28, n. 7 (Ago), pp. 1276-1287.
- Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J.A.E.E., vanWassenhove, L.N., 1995, "Strategic Issues in Product Recovery Management", *California Management Review*, v. 37, n. 2, pp. 114-135.
- Vego, G., Kucar-Dragicevic, S., Koprivanac, N., 2008, "Application of multi-criteria decision making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia", *Waste Management*, v. 28, n. 11 (Nov), pp. 2192-2201.
- Wang, Z., Song, Q., Li, J., 2013, "Environmental Performance of Municipal Solid Waste Strategies based on LCA Method: A Case Study of Macau", *Journal of Cleaner Production*, v. 57 (Jun), pp. 92-100.
- Warith, M.A., Mohareb, A.K., Diaz, R., 2008, "Modelling Greenhouse Gas Emission for Municipal Solid Waste Management Strategies in Ottawa, Ontario, Canada", *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 11 (Set), pp. 1241-1251.
- WORLD BANK, 2014, *World Development Indicators: Urbanization*, Disponível em: <<http://wdi.worldbank.org/table/3.12#>>, Acesso em 03apr2015.
- Yeomans, J.S., 2007, "Solid Waste Planning Under Uncertainty Using Evolutionary Simulation-Optimization", *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 41 (Jul), pp. 38-60.
- Zhang, D.Q., Tan, S.K., Gersberg, R.M., 2010, "Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges", *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 8 (Abr), pp. 1623-1633.
- Zhang, Y., Huang, G.H., He, L., 2014, "A Multi-Echelon Supply Chain Model for Municipal Solid Waste Management System", *Waste Management*, v. 34, n. 2 (Nov), pp. 553-561.

- Zhang, X., Huang, G., 2013, "Optimization of Environmental Management Strategies through a Dynamic Stochastic Possibilistic Multiobjective Program", *Journal of Hazardous Material*, v. 246-247 (Dez), pp. 257-266.
- Zhen-shan, L., Lei, Y., Xiao-Yan, Q., Yu-Mei, S., 2009, "Municipal Solid Waste Management in Beijing City", *Waste Management*, v. 29, n. 9 (Abr), pp. 2596-2599.

ANEXOS

Anexo I – Relatório da visita técnica a unidade de tratamento do RSU no município de Cantagalo

Este relatório propõe descrever a visita realizada no dia 04 de setembro de 2014 na usina de tratamento do RSU no município de Cantagalo, estado do Rio de Janeiro.

1. Sobre a usina de tratamento

A usina de tratamento foi criada no ano de 1999 no município de Cantagalo. Localizada no bairro de Novo Horizonte, a 8 quilômetros do centro, a usina é responsável pelo recebimento e tratamento de 100% do RSU produzido no município de Cantagalo e nos distritos de Floresta, Paraíba, Euclidelândia e Boa Sorte, onde existem aproximadamente 20 mil habitantes.

A usina é gerenciada pela empresa Utilix e tem capacidade máxima de recebimento e tratamento de 450 toneladas ao mês. Além de receber o RSU, a usina também recebe:

- Resíduos sólidos de saúde (RSS): São coletados em hospitais e depois incinerados na própria usina.
- Resíduos eletrônicos: São coletados em pontos de coleta periodicamente e destinados a unidade de reciclagem eletrônica no município de Carmo.
- Óleo de cozinha: São coletados em pontos de coleta periodicamente e destinados a unidade de tratamento em Duque de Caxias, no Rio de Janeiro.
- Pilhas e Baterias: São coletados nos 20 pontos de coleta espalhados pelo município e são destinados a Essencis Brasil.
- Lâmpada: Este resíduo deve ser entregue na usina pelos moradores e são destinados para a empresa Apliquim Brazil Recycle.

Este trabalho foca no processo de tratamento e destinação do RSU. A usina recebe atualmente um volume médio de 290 toneladas de resíduo ao mês em que são classificados em 3 categorias: reciclável com valor econômico de venda, reciclável sem

valor econômico de venda e rejeitos. A seguir será descrito o processo desde a coleta até a destinação de cada um dos tipos de RSU.

2. Processo de tratamento e destinação do RSU

Neste capítulo será descrito o passo-a-passo do caminho percorrido pelo resíduo desde a sua geração nas residências até a destinação pela usina. O fluxograma deste processo pode ser observado no Anexo I deste trabalho.

2.1 Coleta do RSU

A coleta do resíduo no município de Cantagalo é realizada diariamente de acordo com a programação de coleta domiciliar gerido pela prefeitura. A coleta é realizada em 3 rotas distintas e 100% do volume coletado é destinado a usina de tratamento.

A coleta, assim como a gestão da usina, é de responsabilidade da empresa Utilix, contratada pelo município de Cantagalo. O tipo de viatura utilizado para a realização da coleta tem uma carroceria basculante montada sobre o chassi do veículo de peso bruto total (PBT) de 9 toneladas. São utilizados 3 veículos com carroceira de 6 a 6,5 m³ e cada veículo carrega por viagem cerca de 1,9 toneladas de RSU.

O veículo compactador utilizado na maioria dos centros urbanos para a coleta de resíduo domiciliar não é utilizado em Cantagalo, pois apesar de otimizar a viagem compactando o resíduo e aumentando a capacidade carregada, este tipo de veículo acaba amassando e misturando o resíduo de forma a dificultar no processo de triagem.

A comunidade de Cantagalo é orientada a separar o RSU em úmido e seco, para facilitar o processo de triagem. A coleta destes dois tipos de resíduos é feita ao mesmo tempo de acordo com os horários programados pela prefeitura.

Nas Figuras 1 e 2 podem ser visualizados a entrada da usina de tratamento do RSU e o local de descarregamento do RSU, respectivamente.



Figura 1



Figura 2

2.2 Triagem, prensa e tritura do RSU

Após o recebimento na usina, o primeiro processo que o RSU passa é a triagem. Na triagem, o resíduo é separado em resíduo reciclável com valor econômico de venda, resíduo reciclável sem valor econômico de venda e rejeitos.

O processo de triagem é feito através de uma esteira rolante de forma manual pelos funcionários da Utilix, que pode ser visualizado nas Figuras 3 e 4.



Figura 3



Figura 4

Os rejeitos como o isopor, fraldas, espumas, vidros não recicláveis e entre outros, representam de 15% a 30% do total dos RSU recebidos na usina dependendo do mês. Estes são armazenados e destinados ao aterro sanitário que fica localizado na

cidade de Santa Maria Madalena, a 48 km de Cantagalo, sob administração da empresa MTR Tratamento de Resíduos Ltda.

A destinação para o aterro é realizada com carroceria do tipo *roll on* montado em chassi que comporta em média 14 toneladas de rejeito por viagem. São transportados de 6 a 7 viagens por mês de rejeito para o aterro sanitário. Estes veículos são de propriedade de terceiros que são contratados pela prefeitura para este serviço e a destinação ao aterro sanitário também é paga pela prefeitura.

Os resíduos recicláveis com valor econômico de venda, que são o vidro, papel, plástico e metal, representam de 35% a 39% do total dos RSU recebidos na usina dependendo do mês. Após separados na triagem estes resíduos vão para o processo de prensa, que pode ser visualizado nas Figuras 5 e 6.

Estes resíduos serão revendidos pela Utilix para empresas recicladoras localizadas nos Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais. O transporte para a destinação final é de responsabilidade da empresa compradora e a venda dos resíduos recicláveis representam cerca de 3% do faturamento total da Utilix, que contempla a operação de coleta e gestão da usina.



Figura 5



Figura 6

Os resíduos recicláveis sem valor econômico de venda, representam de 31% a 50% do total dos RSU recebidos na usina dependendo do mês. Após a triagem estes resíduos vão para o processo de trituração, com o objetivo de diminuir a granulometria.

2.3 Compostagem

Os resíduos recicláveis sem valor econômico de venda, após o processo de trituração, são armazenados em baias que passam pelo processo de compostagem, que por aeração forçada se transformam em composto orgânico após 60 a 90 dias.

No processo de compostagem há perda de água de aproximadamente 36% do volume inicial. A baia com o resíduo pode ser visualizada na Figura 7.



Figura 7

2.4 Peneira

O composto orgânico produzido pela compostagem se divide em duas partes no processo de peneiração: o adubo orgânico e bagaço de compostagem. A parte fina do composto é o adubo orgânico e a parte com granulometria maior é o bagaço de compostagem. Na Figura 8 pode se visualizar o processo de peneiração e nas Figuras 9 e 10 o bagaço de compostagem e o adubo orgânico respectivamente.



Figura 8



Figura 9



Figura 10

O adubo orgânico é doado aos produtores rurais cadastrados e controlados pela prefeitura. Cerca de 14% a 30% do volume produzido na compostagem se transforma em adubo orgânico, e a análise química deste produto é realizada por uma empresa terceira contratada pela Utilix de 6 em 6 meses.

O bagaço de compostagem representa cerca de 26% a 50% do volume produzido na compostagem que é destinado ao processo de coprocessamento da cimenteira Lafarge localizada também em Cantagalo.

Os mesmos veículos que fazem a coleta do RSU no município de Cantagalo, são utilizados para o transporte de adubo orgânico para os produtores rurais e para o transporte de bagaço de compostagem para a cimenteira. O adubo orgânico é transportado cerca de 6 a 8 viagens por mês, com média de 5 toneladas por viagem. O bagaço de compostagem é transportado cerca de 7 a 9 viagens por mês, com média de 4 toneladas por viagem.

3. Fluxograma do processo de tratamento e destinação do RSU

A seguir, e como resultado da visita, foi elaborado um fluxograma com o detalhamento do passo-o-passo do processo dentro da usina de tratamento, conforme descrito anteriormente.

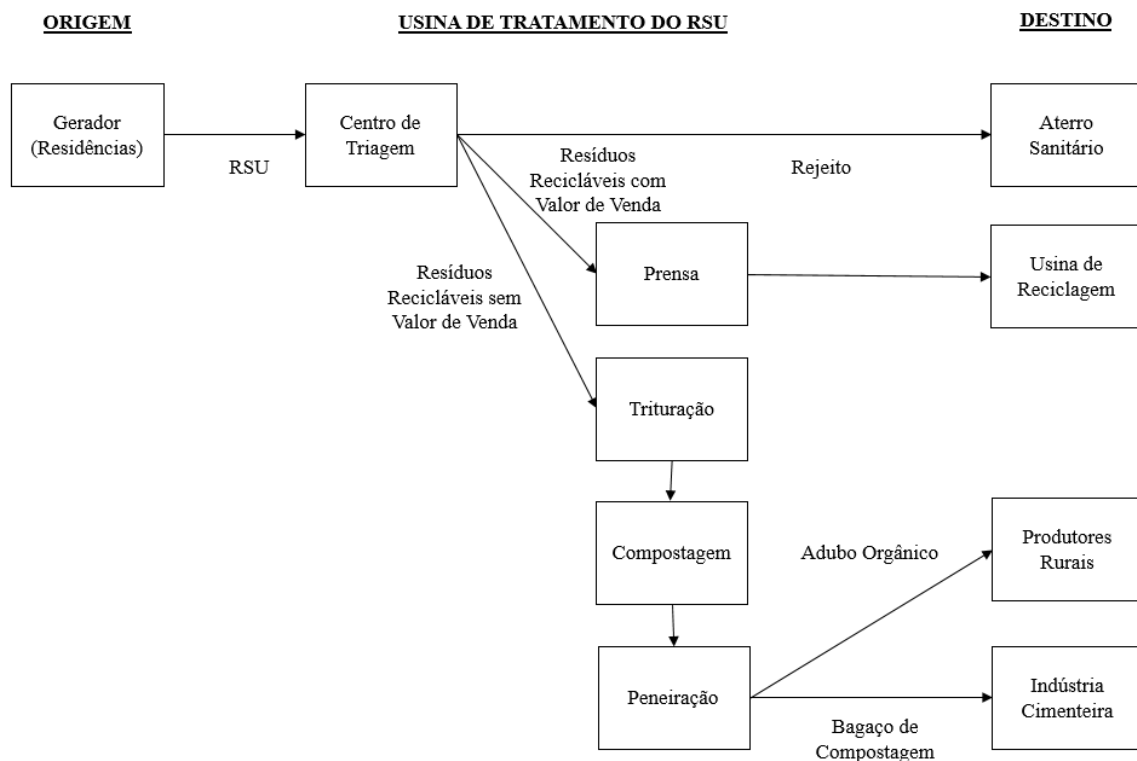


Figura 11: Fluxograma do sistema do RSU no município de Cantagalo. **Fonte:** Elaborado pela autora.

Durante a visita foi possível observar que todos os processos e estruturação da usina são simples, porém bastante eficientes. Este é um exemplo de parceria entre entidade pública e iniciativa privada de gestão do RSU, que tem como objetivo a diminuição do impacto ambiental.

Anexo II – Cálculo do custo de transporte

Neste anexo apresenta-se o detalhamento do cálculo do custo fixo e variável do veículo para a definição do custo de transporte a ser utilizado nesta dissertação.

Tabela 1: Cálculo do Custo Fixo.

CÁLCULO DOS CUSTOS FIXOS MENSAIS (a + b + c + d + e + f + g + h)		R\$ 13.023,81
a – REMUNERAÇÃO DO CAPITAL	$[(1+2+3) \times 4]:12$ meses	R\$ 3.536,40
01 – Valor do Cavalo Mecânico	230.252,00	
02 – Rodoar	1.239,00	
03 – Valor do Semi-Reboque	90.000,00	
04 – Taxa Anual de Remuneração do Capital	13,2%	
b – SALÁRIO DE MOTORISTA	$(1+2) \times (1+3)$	R\$ 4.314,95
01 – Salário de Motorista	2.133,02	
02 – Participação nos Lucros	33,33	
03 – Encargos Sociais	99,18%	
c – SALÁRIO DO MECANICO	$[(1+2) \times (1+3)]:4$	R\$ 703,67
01 – Salário do Mecânico	1.733,08	
02 – Participação nos Lucros	33,33	
03 – Encargos Sociais	99,18%	
04 – Número de Veículos Atendidos por Mecânico	5	
d – REPOSIÇÃO DO CAVALO MECÂNICO	$\{[1-(2 \times 3)+4] \times 5\}:6$	R\$ 1.316,78
01 – Valor do Cavalo Mecânico	230.252,00	
02 – Quantidade de Pneus	6	
03 – Valor do Pneu	1.712,08	
04 – Rodoar	1.239,00	
05 – Taxa de Reposição do Cavalo Mecânico	50%	
06 – Vida Útil do Cavalo Mecânico (em meses)	84	
e – RESPOSIÇÃO DO SEMI-REBOQUE	$(1 \times 2):5$	R\$ 734,40
01 – Valor do Semi-Reboque s/pneus	90.000,00	
02 – Taxa de Reposição do Semi-Reboque	73%	
03 – Vida Útil do Semi-Reboque (em meses)	90	
f – LICENCIAMENTO	$(1+2+3):12$ meses	R\$ 227,31
01 – DPVAT	110,36	
02 – IPVA	2.400,63	
03 – Taxa de Licenciamento	131,72	
04 – Taxa de Vistoria Tacógrafo	85,00	
g – SEGURO	$[1+2+3+(4:12 \text{ meses})] \times (\text{um}+5)$	R\$ 2.380,03
01 – Seguro do Casco do Cavalo Mecânico (mensal)	1.582,49	
02 – Seguro do Semi-Reboque (mensal)	458,46	
03 – Seguro de Resp. Civil Facultativa (mensal)	170,51	
04 – Custo da Apólice	60,00	
h – CRÉDITO DE IMPOSTOS	$[-1 \times (2+3)]$	- R\$ 189,73
01 – Gastos que incluem impostos creditáveis	2.051,18	
02 – Alíquota Pis	1,65%	
03 – Alíquota Cofins	7,60%	

Fonte: Adaptado de NTC (2013).

Tabela 2: Cálculo do Custo Variável.

CÁLCULO DOS CUSTOS VARIÁVEL POR KM (a + b + c + d + e + f)			R\$ 2,12
a – MANUTENÇÃO	$[(1+2+3) \times 4]/5$		R\$ 1,04
01 – Valor do Veículo s/ Pneus		219.979,52	
02 – Valor do Rodoar		1.239,00	
03 – Valor do Semi-reboque		90.000,00	
04 – Taxa sobre Peças, Acessórios e Manutenção		1,0%	
05 – Quilometragem percorrida mensalmente		3.000,00	
b – COMBUSTÍVEL	1:2		R\$ 0,99
01 – Preço do Combustível, por litro		2,3860	
02 – Rendimento do Combustível (km/litro)		2,4000	
c – LUBRIFICANTES	$\{[1 \times (2+3)]:4\} + [(5 \times 6):7]$		R\$ 0,04
01 – Preço do Óleo do Câster, por litro		17,12	
02 – Capacidade de Óleo do Câster		33,00	
03 – Reposição de Óleo do Câster antes da Próxima Troca		9,00	
04 – Quilometragem de Troca de Óleo do Câster		30.000	
05 – Preço do Óleo de Câmbio /Diferencial, por litro		21,11	
06 – Capacidade de Óleo do Diferencial		50,00	
07 – Quilometragem de Troca de Óleo do Diferencial		53.000	
d – LAVAGEM E LUBRIFICAÇÃO	1:2		R\$ 0,09
01 – Preço de Lavagem e Lubrificação do Veículo		342,30	
02 – Quilometragem de Lavagem do Veículo		4.000	
e – PNEU	$\{[(1 \times 3) \times (1+5)] + (2 \times 3 \times 4)\} : 6$		R\$ 0,18
01 – Valor do Pneu (Veículo)		1.712,08	
02 – Valor da Recapagem (Veículo)		323,73	
03 – Quantidade de Pneus (Veículo)		20	
04 – Quantidade de Recapagens (Veículo)		2	
05 – Coeficiente de Perda de Pneu Novo		7,00%	
06 – Quilometragem de Vida Útil do Pneu		275.000	
f – CRÉDITOS DE IMPOSTOS	$[-1 \times (2+3)]$		-R\$ 0,22
01 – Gastos que incluem impostos creditáveis		2,3413	
02 – Alíquota Pis		1,65%	
03 – Alíquota Cofins		7,60%	

Fonte: Adaptado de NTC (2013).

Anexo III – Cálculo do *baseline* detalhado

Neste anexo apresenta-se o detalhamento do cálculo dos parâmetros para a definição do *baseline* da Região Serrana II. A Tabela 1 e 2 representam o cálculo do parâmetro econômico.

Tabela 1: Custo de Transporte (CTrans).

Tipo do Fluxo	Origem	Destino	CVtp (R\$/t)	Volume (t/dia)	CTrans
Origem i - Destino t	Areal	Sapucaia	21,98	8,34	183,35
Origem i - Destino t	Comendador L.G.	Sapucaia	27,37	6,60	180,66
Origem i - Destino t	Paraíba do Sul	Sapucaia	27,80	30,37	844,40
Origem i - Destino t	Sapucaia	Sapucaia	5,39	11,15	60,08
Origem i - Destino t	Três Rios	Sapucaia	24,09	63,14	1.520,79
Origem i - Destino t	Petrópolis	Sapucaia	42,30	160,91	6.806,13
Origem i - Destino ii	Petrópolis	UT Petrópolis	5,39	75,37	406,14
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Vidro	36,48	5,67	206,86
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Plástico	34,65	31,90	1.105,17
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Papel	28,94	30,95	895,63
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Metal	37,13	6,85	254,39
CTrans Total				R\$	12.463,60

Legenda: UT – unidade de triagem; Rec – reciclagem.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2: Custo de Descarte (CDat).

Destino	Volume (t/dia)	CDat (R\$/t)	CDat
Sapucaia	280,51	R\$ 90,49	R\$ 25.383,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo B_1 representada pela Equação $B_1 = CTrans + CDat$, o custo total do sistema *baseline* é de R\$ 37.846,67 por dia. A seguir detalha-se pela Tabela 3 e 4 o *baseline* relativo à emissão de GEE.

Tabela 3: Emissão de GEE no Transporte (GEETrans).

Tipo do Fluxo	Origem	Destino	Distância [km]	GEETrans
Origem i - Destino t	Areal	Sapucaia	40,80	22,64
Origem i - Destino t	Comendador L.G.	Sapucaia	50,80	22,30
Origem i - Destino t	Paraíba do Sul	Sapucaia	51,60	104,25
Origem i - Destino t	Sapucaia	Sapucaia	10,00	7,42
Origem i - Destino t	Três Rios	Sapucaia	44,70	187,75
Origem i - Destino t	Petrópolis	Sapucaia	78,50	840,25
Origem i - Destino ii	Petrópolis	UT Petrópolis	10,00	50,14
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Vidro	67,70	25,54
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Plástico	64,30	136,44
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Papel	53,70	110,57
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Metal	68,90	31,41

FeTrans_CO2 (kg/km)	0,797
FeTrans_CH4 (g/km)	0,06
GEETrans Total	1.538,69

Legenda: UT – unidade de triagem; Rec – reciclagem.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4: Emissão de GEE no Aterro Sanitário (GEEAter).

Destino	Volume (t/dia)	Fe_t_CO ₂	Fe_t_CH ₄	GEEAter
Sapucaia	280,51	30,46	24,92	155.339,08

Fonte: Elaborado pela autora.

A emissão de GEE no *baseline* representada pela Equação $B_2 = GEETrans + GEEAter$, resulta na emissão de 156.877,77 quilos de dióxido de carbono equivalente diariamente. Por fim, nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se os parâmetros de consumo energético e descarte no aterro sanitário respectivamente.

Tabela 5: Consumo de Energia pelo CF no Transporte (ETrans).

Tipo do Fluxo	Origem	Destino	Distância [km]	ETrans
Origem i - Destino t	Areal	Sapucaia	40,80	430,16
Origem i - Destino t	Comendador L.G.	Sapucaia	50,80	423,85
Origem i - Destino t	Paraíba do Sul	Sapucaia	51,60	1.981,07
Origem i - Destino t	Sapucaia	Sapucaia	10,00	140,95
Origem i - Destino t	Três Rios	Sapucaia	44,70	3.567,93
Origem i - Destino t	Petrópolis	Sapucaia	78,50	15.967,93
Origem i - Destino ii	Petrópolis	UT Petrópolis	10,00	952,85
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Vidro	67,70	485,32
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Plástico	64,30	2.592,84
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Papel	53,70	2.101,25
Origem ii - Destino p, v=1	UT Petrópolis	Rec. Metal	68,90	596,83
ETr (MJ/km)				15,17
ETrans Total				29.240,98

Legenda: UT – unidade de triagem; Rec – reciclagem.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6: Descarte do RSU (DesAter).

Tipo do Fluxo	Origem	Destino	Volume (t/dia)
Origem i - Destino t	Areal	Sapucaia	8,34
Origem i - Destino t	Comendador L.G.	Sapucaia	6,60
Origem i - Destino t	Paraíba do Sul	Sapucaia	30,37
Origem i - Destino t	Sapucaia	Sapucaia	11,15
Origem i - Destino t	Três Rios	Sapucaia	63,14
Origem i - Destino t	Petrópolis	Sapucaia	160,91
DesAter Total			280,51

Fonte: Elaborado pela autora.

O consumo de energia do *baseline* representada pela Equação $B_3 = ETrans$, resulta em 29.240,98 MJ/dia. E o volume de descarte do *baseline* em 280,51 t/dia.

Anexo IV – Cálculo de amortização do custo de investimento da planta TMB

Neste anexo apresenta-se o detalhamento do cálculo da amortização pelo sistema Price realizada no período de 15 anos do custo de investimento da planta TMB, levando em consideração o financiamento de 3,65 milhões de Euros à 0,46% ao mês.

Tabela 1: Cálculo de Amortização pelo Sistema Price.

Tabela 17: Cálculo de Amortização pelo Sistema Price.													
Valor do investimento em Euros				3,65 milhões									
Taxa de câmbio				3,20									
Valor do investimento em Reais				11,68 milhões									
Meses de amortização				180									
Taxa de juros ao mês				0,46%									
Pagamento mensal				R\$ 95.435,35		Dias úteis		22		Pagamento diário		R\$ 4.337,97	
Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)		
0			11.680,00	13	51.169,73	44.265,62	11.120,04	26	48.458,47	46.976,87	10.525,78		
1	53.533,33	41.902,01	11.638,10	14	50.966,85	44.468,50	11.075,57	27	48.243,16	47.192,18	10.478,59		
2	53.341,28	42.094,07	11.596,00	15	50.763,03	44.672,32	11.030,90	28	48.026,87	47.408,48	10.431,18		
3	53.148,35	42.287,00	11.553,72	16	50.558,28	44.877,06	10.986,02	29	47.809,58	47.625,77	10.383,55		
4	52.954,54	42.480,81	11.511,24	17	50.352,60	45.082,75	10.940,94	30	47.591,29	47.844,06	10.335,71		
5	52.759,83	42.675,52	11.468,56	18	50.145,97	45.289,38	10.895,65	31	47.372,01	48.063,34	10.287,65		
6	52.564,24	42.871,11	11.425,69	19	49.938,39	45.496,96	10.850,15	32	47.151,72	48.283,63	10.239,36		
7	52.367,74	43.067,60	11.382,62	20	49.729,86	45.705,48	10.804,45	33	46.930,42	48.504,93	10.190,86		
8	52.170,35	43.265,00	11.339,36	21	49.520,38	45.914,97	10.758,53	34	46.708,10	48.727,25	10.142,13		
9	51.972,05	43.463,30	11.295,89	22	49.309,94	46.125,41	10.712,41	35	46.484,77	48.950,58	10.093,18		
10	51.772,85	43.662,50	11.252,23	23	49.098,53	46.336,82	10.666,07	36	46.260,41	49.174,94	10.044,01		
11	51.572,73	43.862,62	11.208,37	24	48.886,15	46.549,20	10.619,52	37	46.035,03	49.400,32	9.994,61		
12	51.371,69	44.063,66	11.164,30	25	48.672,80	46.762,55	10.572,76	38	45.808,61	49.626,74	9.944,98		

Tabela 1 – Continuação: Cálculo de Amortização pelo Sistema Price.

Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)
39	45.581,15	49.854,20	9.895,12	67	38.771,14	56.664,21	8.402,49	95	31.030,89	64.404,46	6.705,97
40	45.352,65	50.082,69	9.845,04	68	38.511,43	56.923,92	8.345,57	96	30.735,70	64.699,65	6.641,27
41	45.123,11	50.312,24	9.794,73	69	38.250,53	57.184,82	8.288,38	97	30.439,16	64.996,19	6.576,27
42	44.892,51	50.542,84	9.744,19	70	37.988,43	57.446,92	8.230,94	98	30.141,26	65.294,09	6.510,98
43	44.660,86	50.774,49	9.693,41	71	37.725,13	57.710,22	8.173,23	99	29.841,99	65.593,35	6.445,39
44	44.428,14	51.007,21	9.642,41	72	37.460,63	57.974,72	8.115,25	100	29.541,36	65.893,99	6.379,49
45	44.194,36	51.240,99	9.591,16	73	37.194,91	58.240,44	8.057,01	101	29.239,34	66.196,00	6.313,30
46	43.959,50	51.475,85	9.539,69	74	36.927,97	58.507,37	7.998,50	102	28.935,95	66.499,40	6.246,80
47	43.723,57	51.711,78	9.487,98	75	36.659,81	58.775,53	7.939,73	103	28.631,16	66.804,19	6.179,99
48	43.486,56	51.948,79	9.436,03	76	36.390,43	59.044,92	7.880,68	104	28.324,97	67.110,38	6.112,88
49	43.248,46	52.186,89	9.383,84	77	36.119,80	59.315,54	7.821,37	105	28.017,38	67.417,97	6.045,47
50	43.009,27	52.426,08	9.331,41	78	35.847,94	59.587,41	7.761,78	106	27.708,38	67.726,96	5.977,74
51	42.768,98	52.666,36	9.278,75	79	35.574,83	59.860,52	7.701,92	107	27.397,97	68.037,38	5.909,70
52	42.527,60	52.907,75	9.225,84	80	35.300,47	60.134,88	7.641,79	108	27.086,13	68.349,22	5.841,35
53	42.285,10	53.150,24	9.172,69	81	35.024,85	60.410,49	7.581,38	109	26.772,86	68.662,48	5.772,69
54	42.041,50	53.393,85	9.119,30	82	34.747,97	60.687,38	7.520,69	110	26.458,16	68.977,19	5.703,71
55	41.796,78	53.638,57	9.065,66	83	34.469,82	60.965,53	7.459,72	111	26.142,01	69.293,33	5.634,42
56	41.550,93	53.884,42	9.011,77	84	34.190,40	61.244,95	7.398,48	112	25.824,42	69.610,93	5.564,81
57	41.303,96	54.131,39	8.957,64	85	33.909,69	61.525,66	7.336,95	113	25.505,37	69.929,98	5.494,88
58	41.055,86	54.379,49	8.903,26	86	33.627,70	61.807,65	7.275,14	114	25.184,86	70.250,49	5.424,63
59	40.806,62	54.628,73	8.848,63	87	33.344,41	62.090,94	7.213,05	115	24.862,88	70.572,47	5.354,06
60	40.556,24	54.879,11	8.793,75	88	33.059,83	62.375,52	7.150,68	116	24.539,42	70.895,93	5.283,16
61	40.304,71	55.130,64	8.738,62	89	32.773,94	62.661,41	7.088,02	117	24.214,48	71.220,87	5.211,94
62	40.052,03	55.383,32	8.683,24	90	32.486,74	62.948,61	7.025,07	118	23.888,05	71.547,30	5.140,39
63	39.798,19	55.637,16	8.627,60	91	32.198,23	63.237,12	6.961,83	119	23.560,13	71.875,22	5.068,52
64	39.543,18	55.892,16	8.571,71	92	31.908,39	63.526,96	6.898,30	120	23.230,70	72.204,65	4.996,31
65	39.287,01	56.148,34	8.515,56	93	31.617,23	63.818,12	6.834,49	121	22.899,76	72.535,59	4.923,78
66	39.029,66	56.405,68	8.459,16	94	31.324,73	64.110,62	6.770,38	122	22.567,30	72.868,04	4.850,91

Tabela 1 – Continuação: Cálculo de Amortização pelo Sistema Price.

Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)	Mês	Juros (R\$)	Amort. Saldo Devedor (R\$)	Saldo Devedor (R\$ mil)
123	22.233,33	73.202,02	4.777,71	143	15.222,77	80.212,57	3.241,12	163	7.540,82	87.894,52	1.557,38
124	21.897,82	73.537,53	4.704,17	144	14.855,13	80.580,21	3.160,54	164	7.137,97	88.297,37	1.469,08
125	21.560,77	73.874,58	4.630,29	145	14.485,81	80.949,54	3.079,59	165	6.733,28	88.702,07	1.380,38
126	21.222,18	74.213,17	4.556,08	146	14.114,79	81.320,56	2.998,27	166	6.326,73	89.108,62	1.291,27
127	20.882,03	74.553,31	4.481,53	147	13.742,07	81.693,28	2.916,58	167	5.918,31	89.517,04	1.201,75
128	20.540,33	74.895,02	4.406,63	148	13.367,64	82.067,71	2.834,51	168	5.508,02	89.927,32	1.111,82
129	20.197,06	75.238,29	4.331,39	149	12.991,50	82.443,85	2.752,06	169	5.095,86	90.339,49	1.021,48
130	19.852,22	75.583,13	4.255,81	150	12.613,63	82.821,72	2.669,24	170	4.681,80	90.753,55	930,73
131	19.505,80	75.929,55	4.179,88	151	12.234,03	83.201,32	2.586,04	171	4.265,85	91.169,50	839,56
132	19.157,79	76.277,56	4.103,60	152	11.852,69	83.582,66	2.502,46	172	3.847,99	91.587,36	747,97
133	18.808,18	76.627,17	4.026,98	153	11.469,60	83.965,74	2.418,49	173	3.428,21	92.007,14	655,97
134	18.456,97	76.978,37	3.950,00	154	11.084,76	84.350,59	2.334,14	174	3.006,51	92.428,83	563,54
135	18.104,16	77.331,19	3.872,67	155	10.698,15	84.737,19	2.249,41	175	2.582,88	92.852,47	470,69
136	17.749,72	77.685,63	3.794,98	156	10.309,78	85.125,57	2.164,28	176	2.157,31	93.278,04	377,41
137	17.393,66	78.041,69	3.716,94	157	9.919,62	85.515,73	2.078,76	177	1.729,78	93.705,57	283,70
138	17.035,97	78.399,38	3.638,54	158	9.527,67	85.907,68	1.992,86	178	1.300,30	94.135,05	189,57
139	16.676,64	78.758,71	3.559,78	159	9.133,93	86.301,42	1.906,56	179	868,85	94.566,50	95,00
140	16.315,66	79.119,68	3.480,66	160	8.738,38	86.696,97	1.819,86	180	435,42	94.999,93	0,00
141	15.953,03	79.482,32	3.401,18	161	8.341,02	87.094,33	1.732,76				
142	15.588,74	79.846,61	3.321,33	162	7.941,83	87.493,51	1.645,27				

Fonte: Elaborado pela autora.