

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DANIEL ANIJAR DE MATOS

Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de
materiais através da Dinâmica de Sistemas

São Carlos
2012

DANIEL ANIJAR DE MATOS

Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de
materiais através da Dinâmica de Sistemas

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências: Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte.

Orientador: Prof. Titular Edson Martins de Aguiar

São Carlos
2012

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M433t Matos, Daniel Anijar de
Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da dinâmica de sistemas. / Daniel Anijar de Matos ; orientador Edson Martins de Aguiar. -- São Carlos, 2012.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Redes de reciclagem. 2. Gestão de resíduos. 3. Logística reversa. 4. Resíduos sólidos municipais. 5. Dinâmica de sistemas. 6. Modelos quantitativos. 7. Análise estratégica. 8. Tomada de decisão. 9. Cenários. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DANIEL ANIJAR DE MATOS**.

Título da tese: "Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da dinâmica de sistemas".

Data da defesa: 27/02/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Edson Martins de Aguiar (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Patroklos Georgiadis**
(University of Thessaloniki/Grécia)

Aprovado

Prof. Dr. **Orlando Fontes Lima Júnior**
(Universidade Estadual de Campinas)

APROVADO

Prof. Dr. **Renato da Silva Lima**
(Universidade Federal de Itajubá)

APROVADO

Prof. Dr. **Carlos Alberto Faria**
(Universidade Federal de Uberlândia)

aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
UNIVERSIDADE DE SÃO CARLOS
PROTÓTIPO Nº 123456789
Data: 27/02/2012

Dedico a meu pai

*Pela sua excepcionalidade como homem, cidadão e patriarca.
Por sua inteligência, modéstia e princípios.
Por ser um exemplo de liderança, orgulho, bondade e caridade.*

*Por lapidar meu crescimento como homem de sucesso
e contribuir progressivamente em minhas conquistas.*

AGRADECIMENTOS

Antes de iniciar meus agradecimentos para a realização desta pesquisa, devo fazer uma homenagem póstuma ao meu querido e estimado pai que lutou em favor dos meus ideais. Este trabalho é dedicado exclusivamente a ele, por tudo o que ele representa na minha vida.

Agradeço profundamente à minha mãe por ser esta fortaleza de sempre, conseguindo lidar com os seus problemas e ainda ajudar os filhos. Além de sua superproteção, ela continua o legado do meu pai e sempre incentiva no caminho por mim traçado.

Ademais, aos meus avós, tios e irmãos, por sustentarem o equilíbrio da família e se unirem em momentos difíceis. Cada um contribui com sua parcela inconscientemente atribuída à minha vida e carreira profissional.

Quero ressaltar minha gratidão aos amigos que permanecem em minha cidade natal, além daqueles em que resido atualmente. Merece destaque Thais Andrade, Camila Modenese, Daniela Rosim, Aline Bianco, Thais Guerreiro, Bruno Bertoncini, Marcela Araújo, Melissa Alessandra, entre outros. Estas que me deram suporte e sábios conselhos em momentos tanto pessoais quanto profissionais, além de me trazerem paz e alegria com suas presenças durante o processo de elaboração deste trabalho.

Sou grato à Universidade de São Paulo, da Escola de Engenharia de São Carlos pelo amparo para o desenvolvimento da minha pesquisa e auxílio em questões pessoais. Ressalto, em particular, o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes pela oportunidade a favor do meu enriquecimento intelectual.

Agradeço ao Professor Edson, cuja parceria de orientação desde o mestrado foi firmada, por ser um meio facilitador de tutoria e por abraçar a minha causa para cumprimentos de prazos. Além de que, receber seus alunos a qualquer momento e por sempre se dispor a sanar dúvidas e gerar ideias de grande valia para o aperfeiçoamento da pesquisa.

Registro minha gratidão ao Professor Patroklos Georgiadis pela co-orientação na pesquisa, por me acolher na Grécia e tornar meu estágio no exterior muito produtivo para o progresso da pesquisa no meu retorno. Sem contar com os residentes Popi, Mpampis e

Dimitrius, sendo os quais não poderia esquecer por deixar minha hospedagem em outro continente com tamanha harmonia e de fácil adaptação.

Agradeço também ao pessoal da prefeitura municipal de São Carlos, por possibilitar que o estudo fosse realizado para um de seus órgãos e por me oferecer toda e qualquer informação solicitada para a caracterização da pesquisa; entre seus representantes ressalta-se a Adriana Ferreira e sua estagiária por compilar a massiva quantidade de dados necessários.

Sou grato aos funcionários do departamento por me prestarem auxílio em assuntos diversos com toda a dedicação possível: Alexandre, Carlos (Toco), Elizabeth (Beth), Heloísa e Magaly. Agradeço também a meus colegas de convívio do departamento e aqueles que seguiram seus destinos, pois cada um contribuiu de alguma maneira para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

Quanto aos meus colegas de orientação, fica aqui registrada minha lembrança e estima por presenciarem minha habitual batalha e me auxiliarem em assuntos pessoais e da pesquisa: Ana Paula Magalhães, Joyce Poloni, Leandro Piassi e Luciana Spigolon.

Também agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela bolsa de estudos concedida para o país. Sem contar minha estima à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela grande iniciativa em oferecer o programa de estágio no exterior e pela bolsa atendida para o desenvolvimento e continuidade da pesquisa na Grécia.

RESUMO

MATOS, D. A. **Tomada de decisão em redes logísticas de reciclagem de materiais através da Dinâmica de Sistemas**. 2012. 193 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O objetivo precípua deste trabalho é estudar um modelo da cadeia de suprimento de ciclo fechado, que é baseado no comportamento sistêmico, por intermédio da Dinâmica de Sistemas como ferramenta de tomada de decisão. Primeiramente adapta-se este modelo à realidade brasileira e, em seguida, aplica-se em uma rede de reciclagem, no caso o programa municipal de coleta seletiva de São Carlos. A proposta consiste na aplicação de conceitos que acarretem em melhorias nos processos reversos e, com isso, viabilizando sua cadeia e incentivando a implementação destas atividades em redes logísticas tradicionais. Após uma vasta investigação de modelos quantitativos para a rede reversa, uma caracterização da organização é realizada. Com a definição da análise estratégica, o próximo passo foi o ajuste do modelo aos padrões brasileiros com a descrição do programa. Concluída a etapa de validação e parametrização do modelo, para coincidi-lo à sua execução na prática, foram atribuídos cenários para o planejamento da rede com o horizonte de cinco anos. A versatilidade da Dinâmica de Sistemas em incorporar fatores específicos de uma estrutura, além de sua simplicidade e flexibilidade para a elaboração do problema, comparado aos demais modelos quantitativos abordados, são premissas corroboradas no estudo. No mesmo sentido, através da simulação do modelo baseada em 30 cenários, o que se pôde constatar é que 16 cenários são atrativos/viáveis e sem o investimento no aumento da quantidade de material coletado, o cenário torna-se inviável e o programa não é autossuficiente. Ademais, das quatro variáveis decididas para análise, a “capacidade de coleta” possui fator decisivo para o desempenho do sistema, sem contar que tanto as variáveis “tempo de coleta” e “índice per capita” dependem da primeira para a evolução dos materiais coletados. Por fim, a variável “custo de transporte” afeta consideravelmente a performance do sistema.

Palavras-chave: Redes de Reciclagem; Gestão de Resíduos; Logística Reversa; Resíduos Sólidos Municipais; Dinâmica de Sistemas; Modelos Quantitativos; Análise Estratégica; Tomada de Decisão; Cenários.

ABSTRACT

MATOS, D. A. **Decision making in logistics networks recycling of materials through System Dynamics**. 2012. 193 p. Ph. D. Thesis – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012.

The principal aim of this work is to study a model of the closed-loop supply chain, which is based on systemic behavior, through the System Dynamics as a decision making tool. Firstly this model is adapted to the Brazilian issues and then it is applied in a recycling network, in this case it is the municipal solid waste of São Carlos city. The proposal involves the concepts application that leads to improve reverse processes, thereby performing the chain profitable and encouraging these activities implementation in “forward logistics networks”. After an extensive investigation of reverse chains quantitative models, an organization description is performed. Thereafter strategic analysis definition, the next step was setting the model into Brazilian patterns based on the program design. Accomplished the stage of model validation and parameterization, to match it for its implementation in practice, scenarios were assigned to the network horizon planning of five years. The System Dynamics versatility to incorporate specific factors in such structure, in addition to its simplicity and flexibility to formulate a problem compared to other quantitative models covered, they are assumptions corroborated in the study. To the same effect, through model simulation based on 30 scenarios, it was found that 16 scenarios are feasible and without an investment to the increase of collected material, those scenarios are unfeasible and the system is not self-sufficient. Furthermore, between the four variables decided to analyze, the “collection capacity” has decisive factor to the system performance, besides the “collection time” and “index per capita” variables depend on the first one to the increase of collected materials. Finally, the “cost transportation” variable affects substantially the system performance.

Key-words: Recycling Networks; Waste Management; Reverse Logistics; Municipal Solid Waste; System Dynamics; Quantitative Models; Strategic Analysis; Decision Making; Scenarios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de fluxo reverso para a reintrodução dos materiais na cadeia de produção com os 3 R's	34
Figura 2.2: Logística Reversa – Área de atuação e etapas reversas	35
Figura 2.3: Foco de atuação da Logística Reversa	36
Figura 2.4: Hierarquia da Logística Reversa	39
Figura 2.5: Estrutura de um modelo genérico de rede de recuperação	44
Figura 2.6: Elementos básicos de um modelo genérico de estoque e fluxo	55
Figura 3.1: Localização da área em estudo	74
Figura 3.2: Área de cobertura das cooperativas no município de São Carlos até 2009	77
Figura 3.3: Área de cobertura das cooperativas no município de São Carlos	80
Figura 3.4: Caminhão utilizado na coleta seletiva de São Carlos	81
Figura 3.5: Galpão-sede da Coopervida	81
Figura 3.6: Sacos de rafia utilizados na coleta seletiva da cooperativa coopervida	82
Figura 3.7: Mesa de separação 1	83
Figura 3.8: Mesa de separação 2	83
Figura 3.9: Prensas	84
Figura 3.10: Fluxograma da Coleta Seletiva de São Carlos desenvolvida pela cooperativa Coopervida	84
Figura 3.11: Histograma do Programa de Reciclagem de São Carlos ente 2004 a 2010	87

Figura 4.1: Cadeia de Suprimento de Ciclo Fechado em estudo	97
Figura 4.2: Diagrama do ciclo causal da cadeia de suprimento direta-reversa com remanufatura	101
Figura 4.3: Diagrama de estoque-fluxo	103
Figura 4.4: Diagrama de estoque-fluxo com parâmetros de custo	105
Figura 4.5: Resumo do fluxograma do modelo com as atividades principais mais os parâmetros de receita/custos	106
Figura 4.6: Diagrama do ciclo causal do crescimento do consumo de recicláveis	108
Figura 4.7: Diagrama do ciclo causal do crescimento dos trabalhadores	108
Figura 4.8: Diagrama do ciclo causal da legislação ambiental	110
Figura 4.9: Análise de cenários para o modelo	112
Figura 4.10: Diagrama de ciclo causal final	113
Figura 4.11: Diagrama de ciclo causal para o programa de custos	114
Figura 4.12: Diagrama de estoque-fluxo para a rede de reciclagem em estudo	115
Figura 4.13: Diagrama de estoque-fluxo para o programa de custo da rede de reciclagem em estudo	117
Figura 4.14: Diagrama de estoque-fluxo para a parametrização do modelo em estudo	119
Figura 4.15: Diagrama de estoque-fluxo para a parametrização do programa de custos em estudo	120
Figura 4.16: Diagrama de estoque-fluxo com cenários do modelo em estudo	123
Figura 5.1: Cenário 1 – Situação Atual x Atual Índice per Capita	126
Figura 5.2: Cenário 2 – Situação Atual x Aumento Índice per Capita	127

Figura 5.3: Cenário 3 – Situação Atual x Redução Índice per Capita	128
Figura 5.4: Cenário 4 – Situação Ótima x Atual Índice per Capita	128
Figura 5.5: Cenário 5 – Situação Ótima x Aumento Índice per Capita	129
Figura 5.6: Cenário 6 – Situação Ótima x Redução Índice per Capita	130
Figura 5.7: Cenário 7 – Situação Péssima x Atual Índice per Capita	131
Figura 5.8: Cenário 8 – Situação Péssima x Aumento Índice per Capita	131
Figura 5.9: Cenário 9 – Situação Péssima x Redução Índice per Capita	132
Figura 5.10: Cenário 10 – Situação Atual x Atual Tempo de Coleta	133
Figura 5.11: Cenário 11 – Situação Atual x Aumento Tempo de Coleta	133
Figura 5.12: Cenário 12 – Situação Atual x Redução Tempo de Coleta	134
Figura 5.13: Cenário 13 – Situação Ótima x Atual Tempo de Coleta	135
Figura 5.14: Cenário 14 – Situação Ótima x Aumento Tempo de Coleta	135
Figura 5.15: Cenário 15 – Situação Ótima x Redução Tempo de Coleta	136
Figura 5.16: Cenário 16 – Situação Péssima x Atual Tempo de Coleta	137
Figura 5.17: Cenário 17 – Situação Péssima x Aumento Tempo de Coleta	137
Figura 5.18: Cenário 18 – Situação Péssima x Redução Tempo de Coleta	138
Figura 5.19: Cenário 19 – Situação Atual x Atual Capacidade Coleta	139
Figura 5.20: Cenário 20 – Situação Atual x Aumento Capacidade Coleta	139
Figura 5.21: Cenário 21 – Situação Atual x Redução Capacidade Coleta	140
Figura 5.22: Cenário 22 – Situação Ótima x Atual Capacidade Coleta	140
Figura 5.23: Cenário 23 – Situação Ótima x Aumento Capacidade Coleta	141

Figura 5.24: Cenário 24 – Situação Ótima x Redução Capacidade Coleta	142
Figura 5.25: Cenário 25 – Situação Péssima x Atual Capacidade Coleta	142
Figura 5.26: Cenário 26 – Situação Péssima x Aumento Capacidade Coleta	143
Figura 5.27: Cenário 27 – Situação Péssima x Redução Capacidade Coleta	144
Figura 5.28: Cenário 28 – Situação Atual x Aumento Custo Transporte	145
Figura 5.29: Cenário 29 – Situação Ótima x Aumento Custo Transporte	145
Figura 5.30: Cenário 30 – Situação Péssima x Aumento Custo Transporte	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Motivos estratégicos para as empresas operarem os canais reversos	38
Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados	67
Tabela 3.1: Ranking de resíduos gerados das cidades próximas a São Carlos	75
Tabela 3.2: Resumo de dados do programa de reciclagem de São Carlos (2004 a 2010) ..	86
Tabela 3.3: Média mensal aproximada de material coletado no período de 2004 a 2010 ..	88
Tabela 3.4: Metas estabelecidas pela prefeitura municipal	88
Tabela 3.5: Resíduos Sólidos gerados na União Europeia em 2009	90
Tabela 3.6: Histórico de preços e volumes de venda de recicláveis na União Europeia	91
Tabela 3.7: Reciclagem de material per capita (kg/mês/habitante) em 2009 para alguns países pertencentes à União Europeia	91
Tabela 3.8: Geração e recuperação de recicláveis oriundos de RSU para os Estados Unidos em 2009	92
Tabela 3.9: Geração de resíduos per capita no estado de Washington (EUA) em 2007, 2008 e 2009	92
Tabela 3.10: Média mensal sobre recicláveis para algumas cidades do Brasil em 2010	93
Tabela 3.11: Cenário comparativo do mercado de reciclagem entre países desenvolvidos e o Brasil	93
Tabela 4.1: Exemplo para o método de minimização dos erros quadrados	120
Tabela 4.2: Matriz representando a análise de cenários com as prioridades	124

Tabela 5.1: Resumo dos cenários analisados 147

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AHP	Processo de Análise Hierárquica
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CLM	<i>Council of Logistics Management</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DS	Dinâmica de Sistemas
EUA	Estados Unidos da América
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MILP	<i>Mixed Integer Linear Program</i>
MINLP	<i>Mixed Integer Non-Linear Program</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
PLE	<i>Personal Learning Edition</i>
PMSC	Prefeitura Municipal de São Carlos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

REVLOG	<i>Reverse Logistics</i>
RSD	Resíduo Sólido Domiciliar
RSU	Resíduo Sólido Urbano
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	27
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO	28
1.3 – JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO	29
1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2 - REVISÃO TEÓRICA	33
2.1 – LOGÍSTICA REVERSA	33
2.1.1 – Conceituação	33
2.1.2 – Áreas de Atuação da Logística Reversa	34
2.1.3 – Logística Reversa de Pós-Consumo	35
2.1.4 – Objetivos Estratégicos da Logística Reversa.....	37
2.1.5 – Logística Reversa e o Gerenciamento de Resíduos Sólidos.....	39
2.2 – MODELOS QUANTITATIVOS PARA A REDE REVERSA	40
2.2.1 – Modelos de Análise Operacional ou Tática	40
2.2.1.1 – Modelos de Localização Inteira Combinada para a Rede Reversa	41
2.2.1.1.1 – Um Modelo Genérico de Rede de Recuperação	43
2.2.1.2 – Modelos de Localização Estocásticos para a Rede Reversa	47
2.2.1.3 – Modelos de Aproximação Contínua para a Rede Reversa	48

2.2.1.4 – Modelos de Análise Operacional ou Tática com a Logística Reversa	49
2.2.2 – Modelos de Análise Estratégica	52
2.2.2.1 – Introdução à Dinâmica de Sistemas	53
2.2.2.2 – Caracterização da Dinâmica de Sistemas	54
2.2.2.3 – Justificativa para a Utilização da Dinâmica de Sistemas	56
2.2.2.4 – Modelos de Dinâmica de Sistemas para Redes de Reciclagem	57
2.2.2.4.1 – Modelos Gerais de Reciclagem e Outros Tipos de Resíduos	57
2.2.2.4.2 – Modelos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos	60
2.2.2.4.3 – Modelos de Reciclagem de Plásticos	61
2.2.2.4.4 – Modelos de Reciclagem de Papéis	61
2.2.2.4.5 – Modelos de Reciclagem de Vidros	62
2.2.2.5 – Modelos de Teoria de Controle	62
2.2.2.6 – Modelos de Teoria dos Jogos	63
2.2.2.7 – Modelos de Técnicas de Simulação	64
2.2.3 – Resumo dos Modelos Apresentados	66
3 - PROGRAMA MUNICIPAL DE COLETA SELETIVA	73
3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	73
3.2 – HISTÓRICO DA COLETA SELETIVA EM SÃO CARLOS	75
3.3 – PROGRAMA FUTURO LIMPO	77
3.4 – COOPERATIVA DE CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS DE SÃO CARLOS – COOPERVIDA	78

3.4.1 – Caracterização da Coleta Seletiva em São Carlos	79
3.4.2 – Dados Sobre o Programa de Coleta Seletiva de São Carlos	85
3.4.3 – Informações Relevantes e Dados Operacionais Sobre o Programa de Coleta Seletiva de São Carlos	88
3.4.3.1 – Dados Operacionais	89
3.5 – QUADRO COMPARATIVO EUROPA X AMÉRICA	90
3.5.1 – União Europeia	90
3.5.2 – Estados Unidos	92
3.5.3 – Brasil	93
4 - MÉTODO	95
4.1 – DEFINIÇÃO DO MODELO QUANTITATIVO PARA A REDE REVERSA ...	95
4.2 – MODELO GERAL COM A DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A CADEIA DE SUPRIMENTO DE CICLO FECHADO	96
4.2.1 – Definição do Problema em Estudo	97
4.2.2 – Abordagem Metodológica da Dinâmica de Sistemas	98
4.2.2.1 – Variáveis do Modelo	99
4.2.3 – Diagrama de Ciclo Causal	99
4.2.4 – Formulação Matemática	102
4.3 – VALIDAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO GERAL	106
4.4 – DESENVOLVIMENTO DO MODELO ESPECÍFICO PARA A PESQUISA ...	107
4.4.1 – Cenários da Legislação Ambiental	111

4.4.2 – Diagrama de Ciclo Causal Final	113
4.4.3 – Diagrama de Estoque-Fluxo	114
4.4.4 – Validação e Simulação da Rede de Reciclagem em Estudo	117
4.4.5 – Parametrização do Modelo da Rede de Reciclagem em Estudo	117
4.4.6 – Diagrama de Estoque-Fluxo com Cenários	122
5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	125
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	125
5.2 – CENÁRIOS	126
5.2.1 – Cenários da Legislação Ambiental x Índice per Capita	126
5.2.2 – Cenários da Legislação Ambiental x Tempo de Coleta	132
5.2.3 – Cenários da Legislação Ambiental x Capacidade de Coleta	138
5.2.4 – Cenários da Legislação Ambiental x Custo de Transporte	144
5.3 – RESUMO DOS CENÁRIOS ANALISADOS	146
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
6.1 – CONCLUSÕES	151
6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	154
REFERÊNCIAS	157
APÊNDICE A	181
A.1 – PARÂMETROS DO CENÁRIO BÁSICO	181
A.2 – VARIÁVEIS DO MODELO	182

A.2.1 – Variáveis de Estoque	182
A.2.2 – Variáveis de Fluxo	182
A.2.3 – Conversores e Constantes	183
A.2.4 – Parâmetros de Receita/Custos	186
APÊNDICE B	189
B.1 – EQUAÇÕES DO MODELO	189
B.1.1 – Variáveis de Estoque	189
B.1.2 – Variáveis de Fluxo	190
B.1.3 – Conversores e Constantes	191
B.2 – PARÂMETROS DE RECEITA/CUSTOS DO CENÁRIO BÁSICO	192
B.3 – EQUAÇÕES DE RECEITA, CUSTO E LUCRO	193

1 - INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os padrões não sustentáveis de produção e consumo, aliados ao crescente aumento da população, conduzem à geração de resíduos urbanos e industriais em quantidades cada vez maiores. Como consequência, o descarte desses resíduos provoca alterações no meio ambiente, as quais podem causar impactos ambientais de diferentes magnitudes com deterioração das condições de vida e comprometimento da população, ou seja, da saúde pública.

Mais especificamente, no que se referem aos resíduos sólidos urbanos (RSU ou resíduos sólidos domiciliares – RSD), estes, em sua maioria, apresentam alto fator de reaproveitamento, o que poderia contribuir com a reintrodução deste material na cadeia de suprimento, tanto por recuperação como para a reciclagem. Contudo, ainda o meio de disposição final em aterros, geralmente controlados, é tido como o mais vantajoso para municípios, o que aumentaria a capacidade destes aterros, visto que produtos com alto teor de aproveitamento direcionariam para redes de reciclagem.

Somente para constar, a geração de RSU no Brasil em 2010 foi de 167 mil toneladas/dia, com o índice per capita de 378 quilos/habitante/ano (ABRELPE, 2010), ou seja, em média praticamente um quilo de resíduo por dia por habitante – dependendo do local em que mora e de seu poder aquisitivo. Aproximadamente 55% dos resíduos é matéria orgânica e 55% ainda são lançados em locais inadequados como lixões (CEMPRE, 2010).

Em contrapartida, de acordo com último levantamento em 2008, apenas 13% dos RSU foram reciclados no Brasil. A título de comparação, países desenvolvidos como Suécia, EUA e Espanha reciclam 40%, 25% e 25% de seus RSU's, respectivamente (CEMPRE, 2010).

Diante dos dados apresentados, este problema local se remete ao fato da inviabilidade econômica das atividades reversas, sem contar que, sem o correto planejamento e estratégia, impede empresas de inserir tais processos de retorno, recuperação e/ou reciclagem em sua estrutura de rede, fator este decisivo para adotar os processos reversos no cotidiano empresarial.

Sem os incentivos necessários, tanto órgãos privados quanto os públicos não se remetem às práticas sustentáveis. Assim, a defasagem é visível nas cidades brasileiras quando é apresentado, de acordo com último levantamento em 2010, que apenas 8% (443) dos municípios possuem programas de coleta seletiva (do total de 5.554) (CEMPRE, 2010a). Além disso, poucos são aqueles que atendem 100% da sua área.

Seguindo o mesmo raciocínio, a ilusão do que é transmitido na mídia e veículos de comunicação de que se recicla 95% do alumínio no país, claramente não reflete a realidade brasileira quanto à homogeneidade na reciclagem dos materiais. Tanto este número quanto seu poder rentável são muito expressivos, porém, o que se atinge com os demais, por exemplo, a somatória da reciclagem de papel, vidro e plástico é o que equivale a mesma quantidade do alumínio.

Diante desse fato, este alto índice de reciclagem, além dos outros materiais, estão mais associados ao valor atrativo que as matérias-primas possuem e, aos altos níveis de pobreza e desemprego que assolam o país, do que fatores culturais relacionados à educação e conscientização ambiental.

Por tudo isso, a contribuição em desenvolver alternativas que viabilizem a inclusão de atividades reversas pode reverter o quadro atual que envolve os aspectos econômicos, sociais e, acima de tudo, os ambientais. Ademais, a carência de modelos que auxiliem na tomada de decisão para o correto funcionamento, agregados às imposições governamentais e pressões da sociedade, são os pontos decisivos para atingir os anseios de reciclagem esperada em uma nação que apresenta grande atratividade para o setor.

1.2 – OBJETIVOS DO TRABALHO

Definiu-se como o objetivo principal desta pesquisa:

- Adaptar um modelo baseado no comportamento sistêmico – por intermédio da Dinâmica de Sistemas (DS) como ferramenta de tomada de decisão – à realidade brasileira, mais

especificamente, uma rede de reciclagem. Por fim, pretende-se aplicar o conhecimento aprendido em um programa municipal de coleta seletiva.

Quanto aos objetivos específicos, estes podem ser descritos como:

- Apresentar um levantamento bibliográfico dos principais modelos quantitativos que atendam ao gerenciamento da cadeia de suprimento reversa e, também, referenciar e categorizar os trabalhos em sua respectiva temática, priorizando a busca às pesquisas mais recentes;
- Estabelecer referencial teórico para que não somente projetos públicos de incentivo à coleta seletiva municipal, mas também entidades privadas possam utilizar o método e aplicação para a análise de sua rede e contribuir com a melhora das atividades inerentes à cadeia reversa. Ademais, contribuir para a comunidade científica em trabalhos futuros para aprimorar esta linha de pesquisa.

1.3 – JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

Inúmeras são as publicações que tratam da logística tradicional, lidando com aspectos voltados ao controle de estoques, distribuição e demanda dos produtos, entre outros. Além disso, os modelos quantitativos para esta logística vêm merecendo destaque há décadas, sendo um assunto abordado em abundância na literatura internacional.

Porém, não se pode fazer a mesma afirmação para a logística reversa, pois, ainda assim, apesar da relevância atual que a logística reversa parece ter, a literatura disponível para uma análise quantitativa desta rede compondendo os setores de coleta, transporte, número de armazéns e sua localização é relativamente escassa. Muito menos para o caso das operações que compõem a análise de cenários e planejamento a longo prazo para antecipar às escolhas estratégicas na rede.

Quando se pensa na cadeia de suprimento de ciclo fechado, ou seja, cadeia esta que integra as atividades da logística tradicional com a reversa, o problema torna-se menos abundante e até difícil de ser encontrado em pesquisas. Pode-se dizer que esta temática apresenta modelos complexos com a atribuição de inúmeras variáveis, por possuir uma rede extensa, fator este que pode tornar um empecilho para pesquisadores se aprofundarem mais sobre o assunto.

Se considerarmos que, em âmbito internacional, os modelos quantitativos para a rede reversa apresentam lento crescimento, devido ao fato de serem bastante recentes as abordagens, o que se pode dizer quanto à vertente nacional é de que a temática ainda se encontra em processo embrionário. Em contrapartida, atenta-se que as abordagens qualitativas para cadeias de produtos quaisquer, ou até mesmo, programas de reciclagem, são facilmente encontradas em buscas na internet e pesquisas científicas e apresentam bom conteúdo descritivo.

Conforme mencionado anteriormente, propostas para uma melhoria na cadeia reversa são necessárias para a atrativa implementação de suas atividades. Uma correta gestão dos resíduos sólidos e sua destinação final, não dependem apenas de rígidas atribuições na legislação e conscientização/colaboração da sociedade, mas sim, exclusivamente, de metodologias e ferramentas que contribuam com a viabilidade e autossuficiência da rede. Seria impróprio dizer que o ganho na imagem corporativa e a questão ambiental são os fatores principais direcionadores para o início e manutenção das atividades reversas; ainda assim o fator econômico é a peça fundamental para o projeto da rede reversa.

Dessa forma, a metodologia considerada na pesquisa se remete ao estudo de sistemas dinâmicos, mais especificamente à aplicação com a DS. Esta ferramenta, inicialmente criada na década de 60 por Forrester (1961), foi aplicada em problemas industriais, e, com o tempo, se estendeu por diversas áreas do conhecimento, provando assim sua versatilidade e praticidade em adotá-la no meio que melhor lhe convém.

Por isso, a escolha e o tratamento com a DS para problemas da cadeia reversa se torna pertinente visto que a ferramenta procura planejar as alternativas estratégicas através de um horizonte a longo prazo, compondo cenários para facilitar o tomador de decisão em escolher a estratégia mais adequada para o sucesso da rede, sendo que, conforme explicado anteriormente, o retorno financeiro é a meta principal a se atender.

Uma análise da cadeia de uma organização se torna imprescindível para seus anseios e indispensável, quaisquer que seja o material, ou para qualquer setor que almeja otimizar sua cadeia. Em se tratando das alternativas para aplicação do estudo, percebe-se a necessidade de incentivar ações que promovam a satisfação da maior parte de agentes envolvidos, direta ou indiretamente, tais como: população, meio ambiente, município, cooperativas, entre outros.

Pensando assim, um programa municipal de coleta seletiva, além de abranger estes agentes, envolve diversos materiais recicláveis em apenas uma rede de reciclagem, podendo

servir de incentivo para redes privadas de um único material e até mesmo de outros programas de coleta seletiva. Sem contar que um estudo local é uma maneira da pesquisa contribuir para a melhoria da qualidade de vida da sociedade envolvida.

Destaca-se também que, com a pesquisa e o modelo aplicados para um programa de coleta seletiva, fica estabelecida a proposta de incentivar cidades que não possuam coleta seletiva na sua criação, além de permitir que os já existentes tenham suporte em aprimorar suas atividades que possuam algum entrave significativo. Por fim, o estudo serve de incentivo a pesquisadores da área em estender o assunto, além de melhorá-lo e aplicá-lo em outros setores que sejam inovadores e promovam algum benefício para a sociedade.

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, constam deste trabalho mais cinco capítulos divididos da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica sobre os assuntos a serem abordados na pesquisa, em forma de itens, que são a Logística Reversa e os modelos quantitativos para a rede reversa, apresentando suas definições e características.

No capítulo 3 é explorado o objeto de estudo da pesquisa – o programa municipal de coleta seletiva – identificando o local e levantando as principais informações e dados que sejam necessários para a aplicação do método definido.

No capítulo 4 é descrito o método utilizado na pesquisa; nele está determinado e caracterizado o modelo quantitativo que será utilizado para simular e avaliar o caso referente à rede de reciclagem do programa municipal de coleta seletiva referente ao capítulo 3.

O capítulo 5 apresenta a análise dos resultados obtidos por simulação do modelo, adaptado em concordância com o método elaborado no capítulo 4.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais, além de conclusões obtidas com esta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas e informações complementares à pesquisa em forma de apêndices.

2 - REVISÃO TEÓRICA

2.1 – LOGÍSTICA REVERSA

2.1.1 – Conceituação

Usualmente, se pensa em Logística como o gerenciamento do fluxo de materiais desde seu ponto de aquisição até seu ponto de consumo. Entretanto, existe também o fluxo reverso, que parte do ponto de consumo até o de origem, fluxo este que também precisa ser gerenciado. Surge assim, a necessidade de programar uma Logística Reversa (LACERDA, 2002).

Entre as várias definições, Leite (2003, p.16-17) reúne esses conceitos de Logística Reversa e os traduz como

[...] a área da logística empresarial que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas correspondentes, do retorno de bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, por meio de canais de distribuição reversos, agregando-lhes valores de diversas naturezas: econômico, ecológico, legal, logístico, de imagem corporativa, entre outros.

Para Fleischmann (2000) Logística Reversa é o processo de planejamento, implementação e controle eficiente/efetivo de fluxo de entrada e armazenagem de mercadorias secundárias e informação relacionada, oposta à direção da cadeia de suprimento tradicional com o propósito de recuperar valor e disposição adequada.

A Logística Reversa acrescenta três movimentações potenciais à logística da cadeia de suprimentos – reutilização dos produtos, recuperação de produtos e reciclagem de materiais – que podem significar a redução de recursos em um sistema e representar um caminho para retorno e reuso de resíduos gerados. Essa é uma importante ferramenta no gerenciamento

integrado dos resíduos sólidos permitindo a reintrodução dos materiais na cadeia de produção. É exposto na Figura 2.1 o esquema do fluxo reverso.

Também, torna-se oportuno ressaltar que a Logística Reversa somente está associada ao gerenciamento de resíduos sólidos, desta forma não pode receber a mesma nomenclatura e tampouco definição. Outra diferenciação está entre a Logística Reversa e a Logística Verde, isto é, esta última considera aspectos ambientais para todas as atividades logísticas e foca especificamente na logística tradicional, ou seja, do produtor ao cliente (BRITO, 2004).

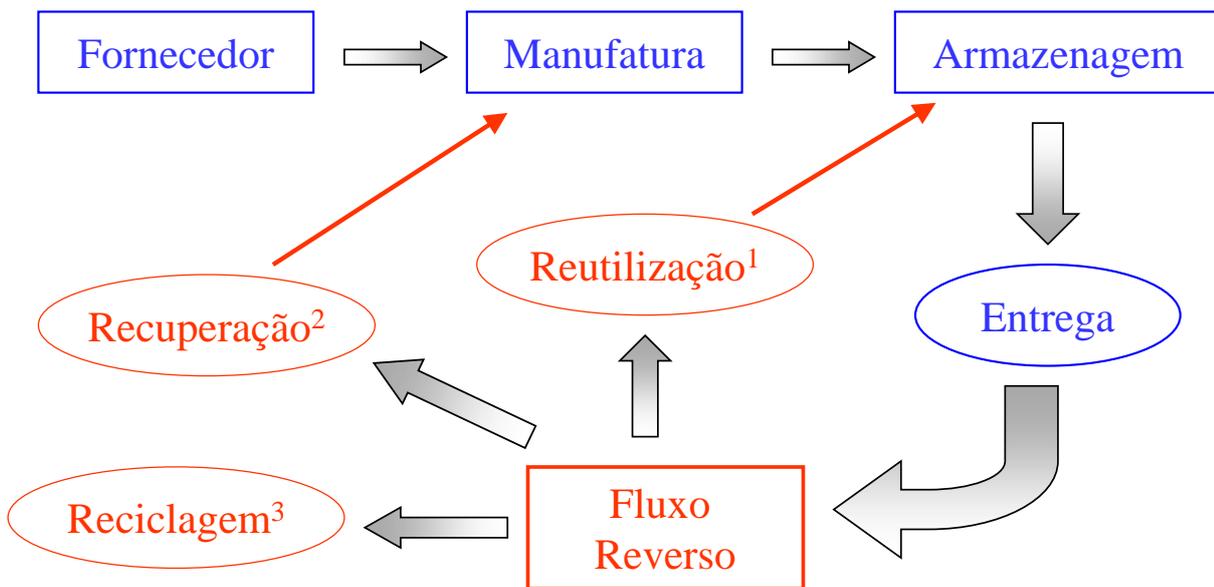


Figura 2.1: Esquema de fluxo reverso para a reintrodução dos materiais na cadeia de produção com os 3 R's. Fonte: Marques, Ferreira e Aguiar, 2002, p. 5.

2.1.2 – Áreas de Atuação da Logística Reversa

A Logística Reversa, segundo a definição de Leite (2003), atua em duas grandes áreas – Logística Reversa de Pós-Venda e de Pós-Consumo – as quais, apesar de inúmeras interdependências entre as referidas áreas, podem ser diferenciadas pelo estágio ou fase do ciclo de vida útil do produto retornado (quando se esgota a possibilidade de reutilização do produto).

¹ “Processo de aproveitamento de um resíduo sem sua transformação” (ABNT NBR 15114/2004).

² “Processo de aproveitamento de um resíduo que sofre algum tipo de transformação” (ABNT NBR 15114/2004).

³ “Processo de aproveitamento de um resíduo após ter sido submetido à transformação” (ABNT NBR 15114/2004).

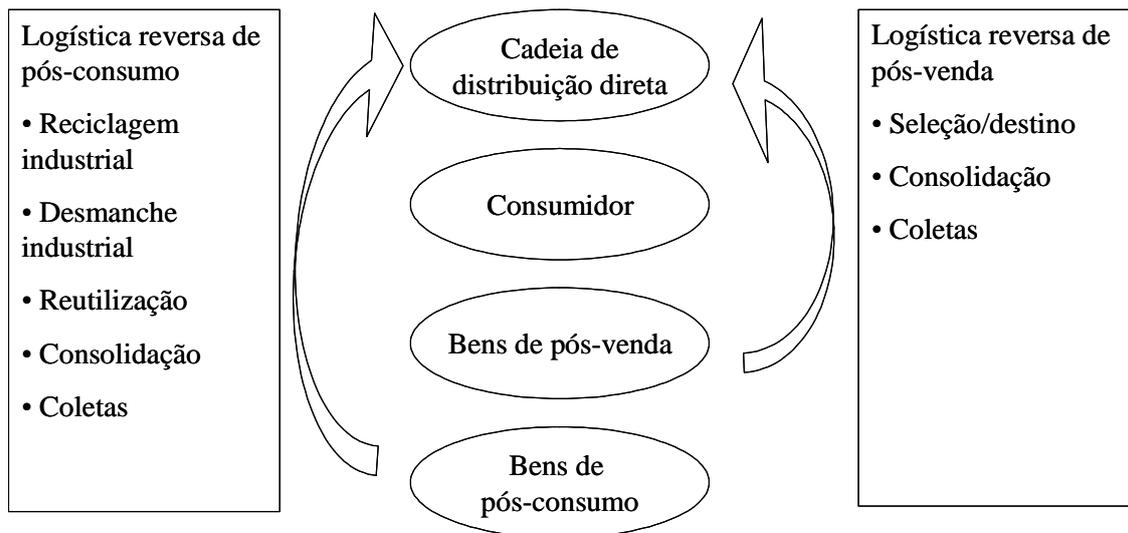


Figura 2.2: Logística Reversa – Área de atuação e etapas reversas.
Fonte: Leite, 2003.

Esta pesquisa irá tratar somente do fluxo reverso dos bens de pós-consumo, aqueles produtos em fim de vida útil ou usados com a possibilidade de reutilização.

2.1.3 – Logística Reversa de Pós-Consumo

A Logística Reversa de Pós-Consumo equaciona e operacionaliza o fluxo de materiais e de informação correspondentes de bens de pós-consumo descartados pela sociedade, que retornam ao ciclo produtivo pelos específicos canais de distribuição reversos. O objetivo estratégico desta logística reversa é agregar valor a um produto que não é mais utilizado pelo usuário original, mas que possui condições de ser reutilizado, ou a um produto descartado por ter atingido o fim de sua vida útil. Os produtos de pós-consumo poderão se originar de bens duráveis ou descartáveis e fluir por canais reversos de reuso, desmanche, reciclagem até a destinação final (LEITE, 2003).

Também, segundo Leite (2003), a Logística Reversa de Pós-Consumo planeja, opera e controla o fluxo de retorno de produtos, peças ou componentes que foram usados pelos consumidores e devem ser reaproveitados quer na remanufatura quer na reciclagem. São classificados conforme seu estado de vida ou origem:

- Em condições de uso: representado na Figura 2.3, são os produtos que entram no canal reverso de “Reutilização” e assim têm sua vida útil estendida. Estes produtos são comercializados no mercado de segunda mão até esgotarem sua vida útil. Quando isso ocorre, passa a ser um produto classificado como “Fim de vida útil”.

- Fim de vida útil (ver Figura 2.3): estes produtos são desmontados, remanufaturados e remontados para serem novamente comercializados. Dependendo do tipo e da condição em que o produto retornado se encontra, ele é reciclado e usado como matéria-prima ou descartado (destinado aos aterros sanitários⁴, lixões⁵ e incineração⁶ com recuperação energética), ao invés de ser remanufaturado.

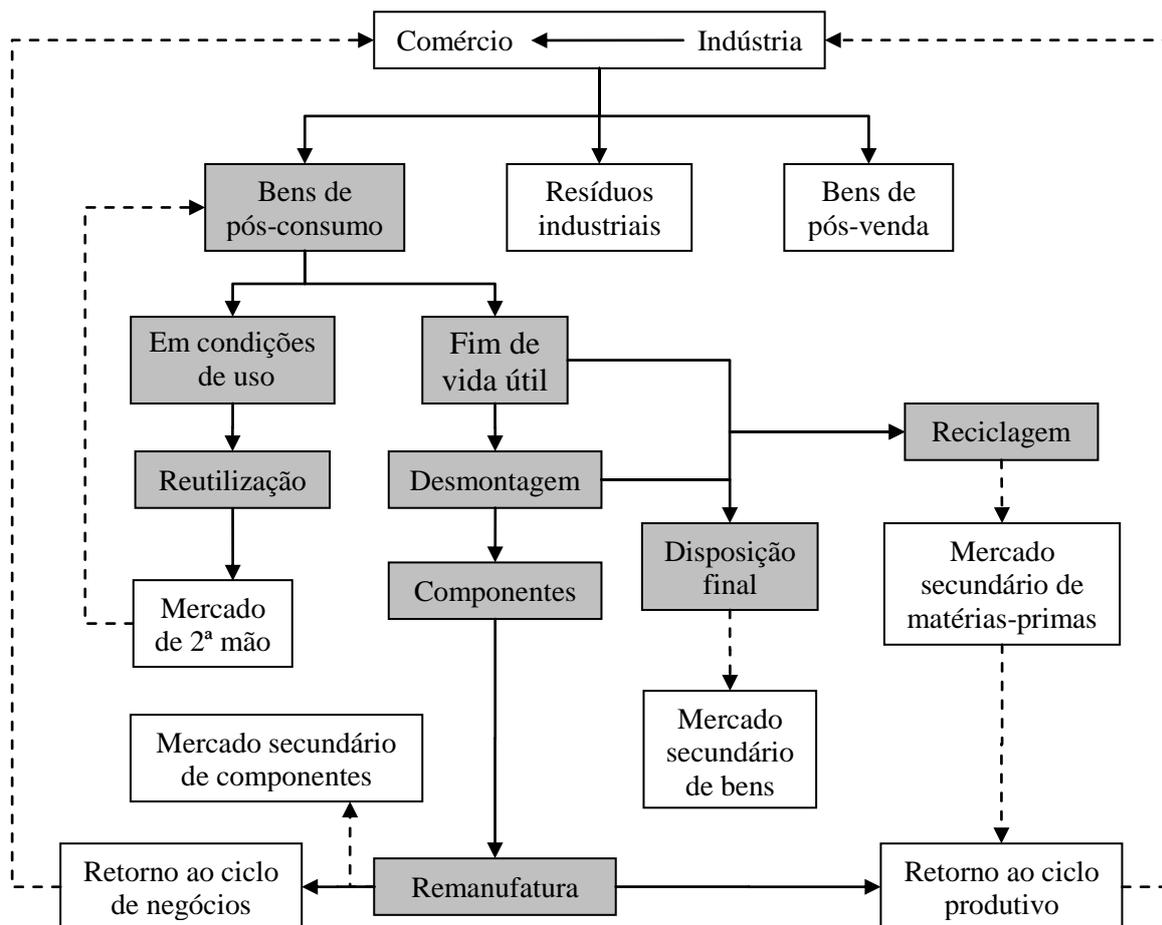


Figura 2.3: Foco de atuação da Logística Reversa.
Fonte: Leite, 2003, p.19 (Adaptado).

⁴ Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos: “Técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário” (ABNT NBR 8419/ 1992).

⁵ “Caracterizados pela simples descarga de resíduos a céu aberto sem qualquer uso de tecnologia” (LEITE, 2003).

⁶ “Processo de oxidação à alta temperatura que destrói ou reduz o volume ou recupera materiais ou substâncias” (ABNT NBR 11175/ 1990).

2.1.4 – Objetivos Estratégicos da Logística Reversa

A Logística Reversa agrega valor de alguma natureza às empresas, seja pelo retorno de bens ao ciclo de negócios (bens de pós-venda, por exemplo, carros) ou ao ciclo produtivo (bens de pós-consumo, por exemplo, latas de alumínio). Entretanto, o objetivo estratégico econômico não é o único da Logística Reversa; dois novos fatores incentivam as decisões empresariais em adotá-la: o fator competitividade e o fator ambiental (LEITE, 2003).

No que tange às vantagens competitivas, as mesmas podem ser alcançadas quando a empresa oferece um serviço diferenciado ao cliente, como no caso de algumas redes varejistas que possuem centros de distribuição reversos que dão suporte ao crescimento de devolução e troca dos produtos, satisfazendo as exigências dos seus clientes. Os varejistas acreditam que os clientes valorizam as empresas que possuem políticas mais liberais de retorno de produtos. Essa vantagem é bem percebida quando os varejistas ou fornecedores assumem os riscos pela existência de produtos danificados o que é uma tendência que se reforça pela existência de legislação de defesa dos consumidores, garantindo-lhes o direito de devolução e troca (LACERDA, 2002).

Outro contexto sobre o retorno de produtos condiz com aqueles usados pelos clientes, no qual as companhias assumem o controle de ‘pegar de volta’ seu produto e recuperá-lo; esta preocupação de cuidar da necessidade de disposição dos resíduos de seus clientes causa, por parte dos últimos, a impressão de uma ‘imagem verde’ para a empresa devido ao fato de inserir aspectos ambientais em suas atividades (FLEISCHMANN, 2000).

“Empresas modernas utilizam-se da Logística Reversa, diretamente ou por meio de terceirizações com empresas especializadas, como forma de ganho de competitividade no mercado”, conforme os dados na Tabela 2.1, extraída de pesquisa realizada nos Estados Unidos em empresas de diversos setores (LEITE, 2003, p. 24).

Tabela 2.1: Motivos estratégicos para as empresas operarem os canais reversos.

Motivo estratégico	Porcentagem de empresas respondentes
Aumento de competitividade	65,2%
Limpeza de canal – estoques	33,4%
Respeito às legislações	28,9%
Revalorização econômica	27,5%
Recuperação de ativos	26,5%

Fonte: Rogers e Tibben-Lembke⁷ (1998, p. 18 apud LEITE, 2003, p. 24) (Adaptado).

A questão ambiental é, também, um importante incentivo da Logística Reversa; não seria benéfico pensar em processos de produção e consumo que não considerem os impactos que eles produzem no meio ambiente. Um dos mais sérios problemas é o dos resíduos da produção e o lixo (resíduos sólidos) gerado pela população, que a cada dia é mais e mais composto principalmente por restos de embalagens e de produtos industrializados (BARBIERI; DIAS, 2002).

O aumento da consciência ambiental dos consumidores e as tendências legislativas ambientais levam as empresas a serem cada vez responsáveis por todo o ciclo de vida do seu produto. Desta forma, o desenvolvimento da Logística Reversa é um atraente incentivo para a sustentabilidade dos recursos, permitindo que mais bens e serviços sejam produzidos, aliado ao menor impacto sobre o meio ambiente.

Por fim, segundo Brito (2004), o *framework* da Logística Reversa, ou seja, sua estrutura conceitual básica é identificada em cinco fundamentais questões, a saber: as razões de retorno (*why-returning*), as forças direcionadoras (*why-receiving*), o tipo de produtos e suas características (*what*), os processos e as opções de recuperação (*how*) e os atores envolvidos e suas funções (*who*).

⁷ ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. (1998). **Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices**. Universidade of Nevada, Reno. Disponível em: <<http://www.rlec.org/reverse.pdf>> .Acesso em 12 de junho de 2006.

Diante do exposto pelo autor (*op. cit.*), o que se pretende ressaltar é que a questão do tipo *why* apresenta os aspectos que impulsionam a implementação da Logística Reversa nas empresas, em que os direcionadores são os fatores econômicos (ganhos diretos e/ou indiretos), a legislação ambiental (antecipação às leis de recuperação e retorno do produto na cadeia) e a consciência ambiental dos consumidores (a preocupação da imagem da companhia com o impacto de seu produto).

Fleischmann *et al.* (1997) ainda complementam que as motivações econômicas e ambientais são geralmente interligadas; por exemplo, o aumento dos custos de disposição faz a redução dos resíduos mais econômica e, os clientes conscientes ambientalmente representam novas oportunidades de mercado. Idealmente, poderia se pensar em combinar ambas as vantagens econômicas e ambientais sugerindo o conceito de economia ‘sustentável’.

2.1.5 – Logística Reversa e o Gerenciamento de Resíduos Sólidos

A Logística Reversa, para Carter e Ellram⁸ (1998 *apud* MARQUES; FERREIRA; AGUIAR, 2002, p. 5) deve obedecer a uma hierarquia, em que a redução de matéria-prima deve ser o principal objetivo. Esta redução refere-se à minimização dos resíduos e energia. Através da redução de matéria-prima, o fluxo normal e o reverso de materiais seriam minimizados. Uma vez esgotada a opção de redução de matéria-prima, deve-se tentar a maximização da reutilização, seguida da reciclagem. A disposição final em aterros sanitários, sem qualquer forma de recuperação, deve ser a última opção. Esta hierarquia é resumida na Figura 2.4.



Figura 2.4: Hierarquia da Logística Reversa.

Fonte: Adaptado de Carter e Ellram (1998 *apud* MARQUES; FERREIRA; AGUIAR, 2002, p. 5).

⁸ CARTER, C. R.; ELLRAM, L. M. (1998). **Reverse Logistics**: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics*, vol.19, n.1, p.85-103.

Para as empresas que apresentam preocupação quanto à responsabilidade ambiental, esta hierarquização para redução de recursos é importante elemento para seu planejamento estratégico, levando-as a estabelecerem programas e regras de gestão de resíduos e proporcionarem melhorias em seus canais de distribuição reversos, podendo e devendo minimizar os impactos negativos de seus produtos e processos no meio ambiente.

2.2 – MODELOS QUANTITATIVOS PARA A REDE REVERSA

Na literatura, a abordagem quantitativa para assuntos de gerenciamento de distribuição na Logística Reversa pode ser comumente dividida em nível tático ou operacional e estratégico. Como exemplos estão modelos de localização-distribuição, modelos de rota de veículos e modelos de roteamento dinâmico e programação.

Abaixo são apresentados os modelos de tomada de decisão encontrados na pesquisa bibliográfica sendo relatadas suas principais características:

2.2.1 – Modelos de Análise Operacional ou Tática

Na tradicional logística direta, os modelos quantitativos relacionados à Pesquisa Operacional apresentam muitos níveis de problemas de decisão, tais como modelos de localização de instalações, modelos de roteamento e programação, ou modelos estocásticos de estoque. Por isso, os respectivos modelos matemáticos têm demonstrado ser uma ferramenta poderosa para apoiar esses tipos de decisões e, mais geralmente, por entender os sistemas subjacentes (FLEISCHMANN, 2000).

Devido a recente pesquisa na área, um conjunto semelhante de modelos no contexto da Logística Reversa ainda não foi completamente estabelecido. Embora o número de contribuições individuais ter crescido rapidamente nos últimos anos, um compreensivo procedimento ainda está faltando. Comparado ao extenso estudo em aspectos qualitativos, o estudo quantitativo da Logística Reversa é recente em nível internacional (FLEISCHMANN, 2000).

Através do estudo da bibliografia no assunto, Fleischmann *et al.* (2003) abordam três modelos referentes a configuração da rede logística reversa: Programação Linear Inteira Combinada (MILP – *Mixed Integer Linear Program*), Programação Estocástica e Aproximação Contínua. Baseado nesses modelos, a meta é analisar a robustez das redes logísticas com respeito aos diversos fluxos de retorno.

2.2.1.1 – Modelos de Localização Inteira Combinada para a Rede Reversa

O modelo mais difundido que aborda problemas de rede logística em vários contextos, diz respeito a modelos de localização de instalações baseados em MILP. Através de décadas, uma extensiva parte da literatura sobre o assunto tem estabelecido modelos que variam desde simples localizações de fábricas até complexos modelos multi-nível e multi-*commodity* (FLEISCHMANN *et al.*, 2003). Deste modo, a seguir é apresentada uma série de estudos de caso, em ordem cronológica, para a aplicação com o MILP além de suas derivações para a Logística Reversa.

Spengler *et al.* (1997) examinam redes de reciclagem para subprodutos respectivos à indústria de aço alemã. Segundo os autores (*op. cit.*) a produção de uma tonelada de aço resulta em mais que 0.5 toneladas de resíduos, no qual sua reciclagem satisfaz as leis ambientais vigentes e reduz os custos de disposição final. Um modelo modificado de localização de armazém multi-nível por MILP foi analisado para otimizar diversos cenários.

Barros, Dekker e Scholten (1998) reportam o estudo do desenho de uma rede logística para a reciclagem de areia resultante do processo de reciclagem de resíduos de construção na Holanda. Com isso é proposto um modelo de localização de instalação capacitada multi-nível formulada com um MILP que é resolvido via iterações por programação linear.

Krikke, Van Harten e Schuur (1999) reportam um estudo de caso a respeito da implementação de um processo de remanufatura em uma empresa na Holanda, cujo produto são máquinas copiadoras. Baseado em um modelo MILP a solução ótima de custos mínimos operacionais é comparado com um número de soluções gerenciais pré-selecionadas.

Lim e Kim (1999) consideram um problema de locação de fábricas na qual as capacidades das fábricas a serem instaladas são determinadas por aquisição e/ou disposição de múltiplos tipos de instalações. O problema é formulado através de um MILP resolvido por um algoritmo heurístico.

Jayaraman, Guide Jr. e Srivastava (1999) analisam a rede logística de uma companhia de remanufatura de equipamento eletrônico nos Estados Unidos. As atividades desta empresa circundam a coleta de produtos usados (núcleo ou memória central do equipamento) dos clientes, remanufatura destes produtos coletados e sua distribuição. O método desenvolve um modelo de localização de armazéns por MILP para múltiplos produtos, que é resolvido por otimização para diferentes cenários de suprimento e demanda.

Quanto à reciclagem de carpetes, Realff, Ammons e Newton (1999) expõem esta temática com um estudo de caso realizado nos Estados Unidos. Estima-se que a completa recuperação dos materiais derivados de carpetes usados promoveria o benefício anual de \$ 750 milhões e, simultaneamente, evitaria ao país o custo de aterro sanitário de \$ 100 milhões. Um modelo por MILP é desenvolvido para apoiar a tomada de decisão para o desenho da infra-estrutura de produção reversa.

Além disso, para abordagens de modelos de localização-alocação, Schultmann, Engels e Rentz (2003) desenvolvem uma abordagem híbrida para estabelecer uma cadeia de suprimento de ciclo fechado para baterias consumidas, que combina um modelo de otimização para o planejamento da rede de suprimento reversa e um modelo de fluxo que permita a simulação de potenciais pontos de reciclagem para este produto. A pesquisa é conduzida na Alemanha, visto que neste país as leis prescrevem medidas para coleta e reciclagem de baterias gastas ou consumidas.

Ademais, Min, Ko e Ko (2006) propõem a solução de problema logístico reverso de determinar o número de localização de centros de retorno (pontos de consolidação reversos), através de um modelo de programação inteira combinada não-linear e um algoritmo genético, em que sua aplicação é validada com produtos retornados de vendas *on-line*.

Para um eficiente desenho da rede logística reversa, Lieckens e Vandaele (2006) explicam que modelos tradicionais, ou seja, aqueles formulados como MILP oferecem a minimização de investimentos, processos, transporte, disposição e custos de penalidade, enquanto o suprimento, a demanda e a restrição de capacidade são satisfeitas. Entretanto os autores (*op. cit.*) mostram que este modelo pode ser melhorado combinando modelos de fila (tempo de espera e posições do estoque); Assim, como há questões não-lineares, Lieckens e Vandaele (2006) definem o problema como um modelo de programação inteira combinada não-linear e aplicam em uma rede e produto singulares.

Para Fleischmann *et al.* (2003), o modelo de localização por MILP surge como o início para abordagens quantitativas em relação à rede reversa. Como pôde ser constatado com o levantamento bibliográfico acima, diversos autores têm seguido este raciocínio e apresentado modelos de localização MILP adaptados ao contexto da Logística Reversa. Estes modelos exibem muitas similaridades com os tradicionais de localização multi-nível, em que a característica particular da logística reversa aparece somente como modificações secundárias.

Nesse sentido, o subitem em seguida descreve um modelo geral para a rede reversa com a formulação do MILP. Nota-se que Fleischmann *et al.* (1997) adotam as nomenclaturas ‘recuperação’ para especificar que a atividade, realmente, gera novo ganho. Convém também distinguir que ‘recuperação do material’ significa reciclagem e ‘recuperação do valor adicionado’ entende-se por reparo e remanufatura.

2.2.1.1.1 – Um Modelo Genérico de Rede de Recuperação

Como base para uma sistemática análise quantitativa de redes de recuperação, Fleischmann (2001) formulou um modelo geral de rede de acordo com características e modelos em uma revisão literária do assunto. Atualmente, os modelos avaliáveis de rede de recuperação têm muita similaridade com modelos clássicos de localização de depósitos. Assim, inicia-se do final da rede clássica e procede-se incorporando características específicas de rede de recuperação.

Recorda-se que redes de recuperação formam uma ligação logística entre dois mercados, a saber: um mercado de disposição em que o recuperador coleta produtos usados e mercado de reuso em que se vendem produtos recuperados; isso define o limite da rede. Ainda consideram-se três níveis intermediários de instalações, que são: centros de separação em que as atividades de separação e inspeção são executadas, fábricas para o reprocessamento da nova produção e armazéns de distribuição. Além disso, Fleischmann (2001) distingue dois tipos de disposição final para os materiais coletados que podem ser reaproveitados – recuperação e disposição. A recuperação pode não ser possível por todos os produtos usados coletados, o qual é revelado durante a inspeção nos centros de separação. A estrutura geral dessa rede é exposta na Figura 2.5.

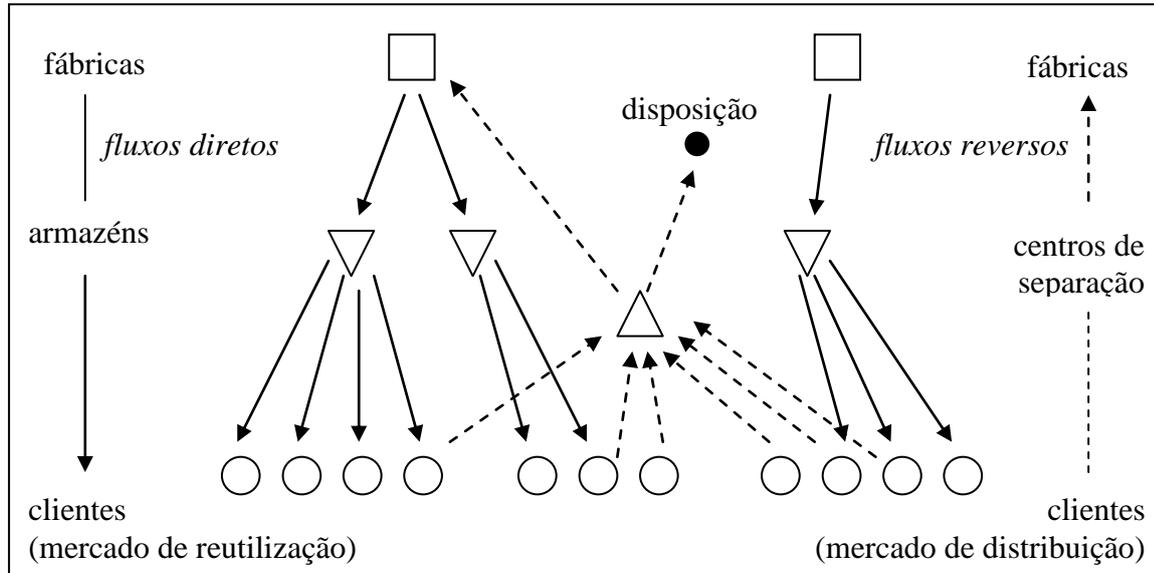


Figura 2.5: Estrutura de um modelo genérico de rede de recuperação.

Fonte: Fleischmann, 2001, p. 64.

Com este procedimento, o problema da configuração da rede considerada procura decidir o número de instalações, suas localizações e a alocação para os correspondentes fluxos. De acordo com o problema de otimização MILP, são definidas potenciais localizações de instalação como variáveis binárias e os fluxos como variáveis de decisão contínuas. O objetivo então é minimizar a somatória dos investimentos e custos operacionais. Para atingir esta meta, duas principais restrições precisam ser levadas em consideração, que são condições lógicas como a conservação do fluxo e instalações abertas. Primeiro, qualquer solução deve concordar com as condições dos mercados de disposição e de reuso. Segundo, devem ser encontradas restrições técnicas e econômicas de opções de disposição. A seguinte notação é usada para formalizar o problema da configuração da rede examinada.

Índices Fixos:

$I = \{1, \dots, N_p\}$ conjunto de potenciais localizações das fábricas

$I_0 = I \cup \{0\}$, em que 0 denota a opção de disposição

$J = \{1, \dots, N_w\}$ conjunto de potenciais localizações dos armazéns

$K = \{1, \dots, N_c\}$ conjunto de localizações de clientes em mercados de disposição e reuso

$L = \{1, \dots, N_r\}$ conjunto de potenciais localizações de separação

Variáveis:

X_{ijk}^f = fluxo direto; fração da demanda do cliente k ser servido da fábrica i e armazém j ;
 $i \in I, j \in J, k \in K$

X_{kli}^r = fluxo reverso; fração de retorno do cliente k ser retornado pelo centro de separação
 l para a fábrica i ; $k \in K, l \in L, i \in I_0$

U_k = fração insatisfeita da demanda do cliente k ; $k \in K$

W_k = fração não coletada de retorno do cliente k ; $k \in K$

Y_i^p = indicador de abertura da planta i ; $i \in I$

Y_j^w = indicador de abertura do armazém j ; $j \in J$

Y_l^r = indicador de abertura do centro de separação l ; $l \in L$

Custos:

c_{ijk}^f = unidade de custo variável da demanda de serviço do cliente k desde a fábrica i e
 armazém j , incluindo transporte, produção e custo de manutenção; $i \in I, j \in J, k \in K$

c_{kli}^r = unidade de custo variável de retorno desde o cliente k pelo centro de separação l
 para a fábrica i ; incluindo transporte e custo de manutenção menos custo de
 economia da produção na planta i ; $k \in K, l \in L, i \in I$

c_{kl0}^r = unidade de custo variável de disposição de retornos desde o cliente k pelo centro de
 separação l , incluindo coleta, transporte e custo de manutenção e disposição; $k \in K$,
 $l \in L$

c_k^u = unidade de custo de penalidade por não servir a demanda do cliente k ; $k \in K$

c_k^w = unidade de custo de penalidade por não coletar o retorno do cliente k ; $k \in K$

f_i^p = custo fixo de abertura da planta i ; $i \in I$

f_j^w = custo fixo de abertura do armazém j ; $j \in J$

f_l^r = custo fixo de abertura do centro de separação l ; $l \in L$

Parâmetros:

d_k = demanda do cliente k no mercado de reuso; $k \in K$

r_k = retorno do cliente k no mercado de disposição; $k \in K$

γ = fração mínima de disposição

Assim, formula-se o modelo genérico de rede de recuperação como:

$$\begin{aligned} \min ! \quad & \sum_{i \in I} f_i^p Y_i^p + \sum_{j \in J} f_j^w Y_j^w + \sum_{l \in L} f_l^r Y_l^r + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ijk}^f d_k X_{ijk}^f + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I_0} c_{kli}^r r_k X_{kli}^r \\ & + \sum_{k \in K} c_k^u d_k U_k + \sum_{k \in K} c_k^w r_k W_k \end{aligned}$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^f = 1 - U_k \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{l \in L} (\sum_{i \in I} X_{kli}^r + X_{kl0}^r) = 1 - W_k \quad \forall k \in K$$

$$\gamma \sum_{i \in I_0} X_{kli}^r \leq X_{kl0}^r \quad \forall k \in K, l \in L$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} r_k X_{kli}^r \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{ijk}^f \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{j \in J} X_{ijk}^f \leq Y_i^p \quad \forall i \in I, k \in K$$

$$\sum_{i \in I} X_{ijk}^f \leq Y_j^w \quad \forall j \in J, k \in K$$

$$\sum_{i \in I_0} X_{kli}^r \leq Y_l^r \quad \forall k \in K, l \in L$$

$$Y_i^p, Y_j^w, Y_l^r \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L$$

$$0 \leq X_{ijk}^f, X_{kli}^r, U_k, W_k \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K$$

Nota-se que este modelo é bastante geral e pode capturar uma grande variedade das situações enquadradas na Logística Reversa. Por exemplo, estruturas de ciclo-aberto e ciclo-fechado podem ser representadas e são refletidas através de diferentes parâmetros.

2.2.1.2 – Modelos de Localização Estocásticos para a Rede Reversa

De acordo com Fleischmann *et al.* (2003), o crescimento incerto do suprimento é frequentemente indicado como uma característica principal das redes reversas. Por isso, no modelo MILP esta incerteza é tratada em geral por médias de análises de cenários. Neste caso um modelo é resolvido repetidamente por um conjunto de cenários e a solução com o melhor ‘desempenho global’ é obtida, de acordo com alguma medida multi-critério. Em contraste, as abordagens de programação estocásticas incorporam o aspecto de incerteza mais claramente.

Um programa linear inteiro-combinado estocástico busca minimizar os custos esperados em cima de um determinado conjunto de cenários com probabilidades associadas, sujeito às restrições lineares e integralmente. Na definição do modelo, é necessário especificar qual variável de decisão precisa ser fixada antes da realização de um cenário e qual pode ser ajustada depois.

No contexto do desenho da rede logística, os modelos de programação estocástica capturam o impacto da incerteza da demanda e as variações do preço. Em adição, tipicamente estes modelos assumem que as decisões de localização são fixadas para um horizonte de planejamento mais extenso, enquanto que os fluxos de transporte podem ser ajustados em um curto prazo, de acordo com as realizações da demanda. Para uma introdução geral de programação estocástica, pode-se constatar o trabalho de Birge e Louveaux (1997).

Entre as pesquisas que tratam do assunto, Realff, Ammons e Newton (2004) retratam a reciclagem de carpetes com um estudo de caso realizado nos Estados Unidos. O modelo de localização de instalação por MILP é estendido para um caso de multi-cenário, envolvendo diferentes níveis de volumes de suprimento e preços de material.

Ademais, Listes e Dekker (2005) utilizam o trabalho de Barros, Dekker e Scholten (1998) que trata de um caso real na Holanda com a rede de reciclagem de areia proveniente de resíduos de construção. Nesta aplicação o modelo original por MILP é estendido para um

modelo de programação estocástica que maximiza o lucro esperado através da incerteza da demanda e suprimento.

Por fim, os modelos de programação estocásticos requerem uma probabilidade para ser especificado em cada cenário. Em aplicações práticas, estas probabilidades frequentemente são difíceis de definir, por isso alguns autores têm sugerido a utilização de outros critérios otimizados mais relevantes (FLEISCHMANN *et al.*, 2003).

2.2.1.3 – Modelos de Aproximação Contínua para a Rede Reversa

Os modelos de localização baseados por MILP possibilitam a adaptação para uma variedade de diferentes cenários. Mesmo assim, as análises por este modelo são limitadas e, mais importante, as inter-relações entre os vários parâmetros não são nítidas. Portanto, conclusões no comportamento de um dado sistema real muitas vezes conta com experimentos numéricos extensivos ao invés de argumentos analíticos (FLEISCHMANN *et al.*, 2003).

Pelo exposto acima, os autores (*op. cit.*) mencionam que diversos autores têm considerado expressões de custo contínuo como base para abordagens alternativas em investigar os custos logísticos e otimizar a rede logística. Daganzo⁹ (1999 *apud* FLEISCHMANN *et al.*, 2003, p. 80) formulou a “metodologia de aproximação contínua”, que consiste na representação da demanda por uma função de densidade contínua, como o oposto à representação de demanda discreta nas abordagens do MILP tradicional. Desta forma, se a densidade da demanda e outros parâmetros do sistema variam lentamente, os custos logísticos podem ser aproximados por médias escolhidas apropriadamente.

Para a representação deste modelo em estudo, o raciocínio é o mesmo seguido por Fleischmann *et al.* (2003) em aplicar a abordagem de “aproximação contínua” para a análise da rede logística reversa. Considera-se o conjunto de proposições análogo ao Modelo de Rede de Recuperação (apresentado anteriormente), entretanto, restringindo apenas o escopo da rede reversa. A idéia central deste modelo é expressar os custos em problemas de parâmetros ‘locais’ e aproximar os custos globais integrando toda a área de serviço.

⁹ DAGANZO, C. F. (1999). **Logistics Systems Analysis**. Berlin: Springer , 3rd edition.

A fim de uma maior abrangência e relevância no assunto, serão apresentadas pesquisas mais recentes (datadas da última década) e que relacionam a abordagem de modelos quantitativos para a análise operacional ou tática, além daquelas que agregam novas técnicas, com a temática da logística reversa, conforme é exposto no item a seguir.

2.2.1.4 – Modelos de Análise Operacional ou Tática com a Logística Reversa

Tuzkaya e Gülsün (2008) investigam o problema de avaliar a localização de centros de retorno de produtos em uma rede logística reversa. Este problema é resolvido via um integrado processo de rede – técnica *Fuzzy* – na qual a escolha da localização é similar à abordagem de solução ideal. Finalmente, um exemplo numérico é dado para demonstrar a utilidade da metodologia aplicada.

Qin e Ji (2010) empregam a programação *Fuzzy* para projetar a rede de recuperação de produtos em uma cadeia reversa a fim de lidar com incertezas em práticas de recuperação. Para resolver os modelos propostos, foi estruturado um algoritmo inteligente híbrido que integra simulação *fuzzy* e algoritmo genético. Por fim, diversos exemplos numéricos são apresentados para ilustrar a eficácia dos algoritmos e modelos propostos.

Wadhwa, Madaan e Chan (2009) propõem um modelo de tomada de decisão multicritério baseado na aplicação *Fuzzy*, uma vez que fornece uma estrutura para lidar com a complexidade de sistemas logísticos reversos e determina as decisões estratégicas para a seleção de reprocessamento. Para a validação do modelo, dados reais de um equipamento original de uma companhia que lida com produtos de alto e médio valores (linha marrom) são disponíveis para a análise.

Hanafi, Kara e Kaebernick (2008) buscam encontrar uma efetiva estratégia de coleta que considera simultaneamente impactos ambientais e de custos. Para atingir isso, é apresentada uma estratégia de coleta integrada que combina o método de previsão “*Fuzzy Colored Petri Net*” e o modelo de rede de coleta para produtos em fim de vida, especialmente resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. Para testar a estratégia de coleta, é apresentado um estudo de caso na coleta de resíduos de telefones móveis na Austrália.

Min e Ko (2008) propõem um modelo MILP integrado a um algoritmo genético que pode resolver o problema da logística reversa envolvendo a localização e alocação de instalações de recuperação para fornecedores logísticos terceirizados. A utilidade do modelo

proposto e algoritmo foram validados em um exemplo ilustrativo aplicados em fornecedores logísticos terceirizados oferecendo ganho de valor aos serviços prestados.

Pishvae, Rabbani e Torabi (2011) propõem um modelo de otimização robusta para lidar com a incerteza inerente de dados de entrada em um problema da cadeia de suprimento de ciclo fechado. Dessa forma, é desenvolvido um modelo MILP com a teoria de otimização robusta e resultados computacionais que mostram a superioridade do modelo robusto proposto, tanto na incerteza dos dados quanto na robustez das respectivas soluções contra aquelas soluções obtidas por um modelo determinístico.

Easwaran e Üster (2010) desenvolvem uma formulação matemática em um problema de rede logística de ciclo fechado de multiprodutos com canais direto e reverso integrados procurando minimizar processos, transportes e custos fixos de localização. A metodologia consiste em primeiramente aplicar o modelo MILP e, após, utilizar um método baseado na decomposição de Bender.

Beamon e Fernandes (2004) estudam uma cadeia de suprimento de ciclo fechado na qual fabricantes produzem novos produtos e produtos usados remanufaturados. Em adição, é desenvolvido um modelo MILP para a tomada de decisão em relação à alocação, investimento e custos operacionais e, por fim, é realizada uma análise de sensibilidade do modelo.

Lu e Bostel (2007) propõem um modelo MILP na qual simultaneamente considera os fluxos direto e reverso e suas mútuas iterações. Além disso, a pesquisa agrega um algoritmo baseado na heurística Lagrangeana e o modelo é testado sob dados adaptados para problemas clássicos. Tais abordagens são desenvolvidas em um estudo de atividades de remanufatura.

Demirel e Gökçen (2008) desenvolvem um novo modelo MILP para sistemas de remanufatura, que inclui os fluxos direto e reverso, no qual é validado usando um conjunto de dados experimentais refletindo situações práticas de negócios. O modelo proposto fornece valores ótimos de produção e transporte enquanto resolve problemas de localização de instalações. Além disso, uma análise de sensibilidade é apresentada.

Pati, Vrat e Kumar (2008a) constroem um modelo MILP para uma estrutura ótima de rede de distribuição de papel reciclado para múltiplos itens, instalações e aspectos ambientais. Com uma avaliação da capacidade das instalações, realizada por análise de sensibilidade, o

modelo proposto é ilustrado através de um estudo de caso em uma rede de papel reciclado indiana.

Hong *et al.* (2006) exploram o modelo MILP em relação à análise e estrutura dos sistemas de produção reversa sobre eletrônicos usados, tais como TVs e computadores. O modelo desenvolvido é usado para maximizar o lucro da rede utilizando a otimização robusta para encontrar a solução. Na prática, a pesquisa apresenta um estudo de caso em um sistema de eletrônicos usados no Estado da Geórgia, nos EUA.

Krikke, Bloemhof e Van Wassenhove (2003) abordam a tomada de decisão relativa às características e composições de um produto, nesse caso a reciclabilidade (porcentagem de materiais reciclados encontrados em um quilograma do produto final). Dessa maneira, desenvolvem um modelo aplicado à cadeia de suprimento de ciclo-fechado de refrigeradores, em que se combina o método MILP para a otimização da localização da instalação, e a análise de sensibilidade do método de Programação Linear, que envolve aspectos de recuperação e retorno desses produtos de pós-consumo.

Kannan, Sasikumar e Devika (2010) aplicam um modelo MILP da cadeia de suprimento de ciclo fechado no estudo da indústria de baterias recicláveis, localizada na parte sul da Índia. Em adição, para auxiliar a solução MILP, um algoritmo genético baseado em uma heurística é utilizado. Finalmente, os resultados computacionais obtidos através do algoritmo genético são comparados com soluções obtidas por um *software* de otimização a partir da “Modelagem Algébrica Geral”.

Jeung Ko e Evans (2007) apresentam um modelo de programação não-linear inteira combinada (MINLP) para a estrutura de uma rede de distribuição, a fim de submeter a otimização integrada da rede logística direta e reversa simultaneamente para fornecedores logísticos terceirizados. Além disso, é apresentado um algoritmo genético baseado em uma heurística para dar suporte aos resultados numéricos.

Zhou *et al.* (2005) propõem um modelo MINLP aliado um algoritmo genético que possa resolver o problema na distribuição de retorno dos produtos tanto para a rede logística direta quanto para a reversa. A sua análise numérica mostra a efetividade do modelo proposto, agregado à abordagem do algoritmo genético.

Pati, Vrat e Kumar (2008b) formulam um modelo de “programação objetivo inteira combinada” para auxiliar no gerenciamento adequado do sistema logístico de reciclagem de papel. Por este motivo, em um sistema específico, busca-se reduzir os custos logísticos reversos, melhoria da qualidade e benefícios ambientais. Além disso, o modelo auxilia na localização da instalação, rotas e fluxos de diferentes variedades de resíduos de papel reciclável em um processo de tomada de decisão. O uso do modelo é ilustrado através de um problema da reciclagem de papel na Índia.

Pati e Vrat (2010) utilizam um modelo linear de programação/combinção para uma cadeia de suprimento de papel a fim de minimizar o custo de fabricação deste material pela ótima mistura da matéria-prima original (advinda da madeira virgem) e papel pós-consumo sob várias restrições convencionais da rede. Além disso, questões de qualidade, preocupação ambiental e reutilização na indústria de papel foram também levadas em consideração.

Pati, Vrat e Kumar (2006) formulam um modelo de otimização linear para a indústria de papel que compara o custo total da cadeia de suprimento da fabricação de papel com concorrentes matérias-primas, isto é, madeira e resíduos de papel. Por este motivo, o objetivo é de minimizar os custos na produção de papel e, com os resultados apresentados, confirma-se que o papel reciclável é uma atrativa opção econômica comparada à madeira como matéria-prima.

2.2.2 – Modelos de Análise Estratégica

Segundo Georgiadis, Tagaras e Vlachos (2003), discussões do gerenciamento estratégico a longo prazo de sistemas logísticos reversos não tem sido adequadamente analisados no passado, possivelmente devido a dificuldade em manipular a variedade de fatores envolvidos e a complexidade de suas interdependências. Uma exceção é o trabalho de Thierry¹⁰ *et al.* (1995 *apud* GEORGIADIS; TAGARAS; VLACHOS, 2003, p. 313), que descreve sistematicamente os passos de implementação da estratégia de recuperação de máquinas copiadoras. Mesmo que a contribuição destes autores (*op. cit.*) seja valiosa, o estudo não descreve uma específica análise quantitativa.

¹⁰ THIERRY, M. et al. (1995). **Strategic Issues in Product Recovery Management**. California Management Review, 37(2):79-85.

As abordagens pelos modelos de análise operacional ou tática apresentados anteriormente, envolvem modelos complexos e restrições sobre o número de variáveis de estado e de estrutura de custos, os quais são difíceis de manipular (GEORGIADIS; VLACHOS; TAGARAS, 2006).

Com a finalidade de reparar parte dessas necessidades, a ferramenta metodológica de modelagem e simulação – Dinâmica de Sistemas (DS) – pode ser aplicada para auxiliar a análise de estratégias a longo prazo na tomada de decisão, quantificando os efeitos antecipados das alternativas de escolhas estratégicas (GEORGIADIS; TAGARAS; VLACHOS, 2003).

2.2.2.1 – Introdução à Dinâmica de Sistemas

A Dinâmica de Sistemas trata da modelagem matemática e da análise da resposta de um sistema dinâmico, que visa entender a natureza dinâmica e melhorar a performance deste sistema. A ideia dos modelos da DS está em utilizá-los como ferramentas de pensamento, ou seja, transmitindo e traduzindo o que é pensado em uma modelagem explícita, além de representar a consequência destas ações.

Georgiadis, Vlachos e Tagaras (2006) argumentam que a DS provém de um modelo mais simples e flexível, além da facilidade de estrutura de simulação, que foca no entendimento de como os processos físicos, fluxos de informação e políticas gerenciais se interagem para criar as variáveis de interesse dinâmicos e, então, procurar por políticas para melhorar o desempenho do sistema.

A DS foi criada por Forrester¹¹ (1961, *apud* NETO, 2003), na qual ele usou este modelo para lidar com problemas de gerenciamento industriais, como flutuação de estoques, instabilidade da força de trabalho e queda na participação de mercado. Desde então o seu uso tem se expandido por fenômenos físicos, tais como, mecânicos, elétricos, pneumáticos, térmicos e hidráulicos, bem como em processos não físicos, como por exemplo, o estudo de sistemas econômicos, biológicos, ambientais e até sociais.

O objetivo da DS é saber se o sistema em geral é estável ou instável, se ele tende a oscilar, a crescer, a declinar, ou se tende ao equilíbrio. Também é fornecer um modelo que consiga simular o comportamento do sistema real endogenamente, isto é, a DS considera que as fontes dos problemas em um sistema fazem parte do sistema (NETO, 2003).

¹¹ FORRESTER, J. W. (1961). **Industrial Dynamics**. MIT Press, Cambridge, MA.

2.2.2.2 – Caracterização da Dinâmica de Sistemas

A linguagem do pensamento sistêmico é representada pelos diagramas causais. Segundo Fernandes (2001) este diagrama causal caracteriza-se por ser um circuito fechado de relações na qual as variáveis possuem interdependência formando o chamado *loop de feedback*. Estes ciclos podem ser positivos, ou seja, se uma ação produz variação no mesmo sentido (reforço) ou negativos, se produz uma variação contrária (equilíbrio ou balanço) “que fazem com que um sistema evolua, desintegre-se ou mantenha-se estagnado”.

A versatilidade da DS oferece a capacidade de aplicar *delays* (atrasos ou esperas) no fluxo de informações e de materiais. Neste sentido Fernandes (2001) expõe que estes *delays* são “os principais responsáveis pelas flutuações dos níveis de estoques de uma cadeia produtiva” e ainda ressalta que este “tempo de espera desempenha um importante papel na maioria dos comportamentos de crescimento, colapsos e oscilações encontrados nos ciclos de negócios (*business cycle*)”.

Ademais, Georgiadis e Vlachos (2004b) relatam que o *delay* é uma classe especial de equações na teoria de DS na qual a taxa de saída é determinada por um processo de conversão de uma dada taxa de entrada. Durante este processo de conversão a taxa de saída é determinada somente pela variável de estado interna armazenada no processo. O *delay* é caracterizado por dois parâmetros: a constante de tempo e a ordem do *delay* (número de variáveis de estado internas). Esses parâmetros determinam a breve resposta da taxa de saída à taxa de entrada. A análise matemática dos *delays* pode ser encontrada em todos os livros relacionados a DS.

No que tange ao tipo de modelagem, a DS pode ser representada por uma abordagem qualitativa (DS *Soft*) ou por uma abordagem quantitativa (DS *Hard*). Esta análise qualitativa nada mais é que a representação do comportamento do sistema com aspectos tangíveis e intangíveis, com relações de causa e efeito da estrutura representados pelos chamados Diagramas de Influência. Este elemento é utilizado para descrever as variáveis que compõem o sistema com o objetivo de um melhor entendimento do funcionamento do sistema (FERNANDES, 2001).

No caso da abordagem quantitativa, esta é concomitantemente vinculada à análise qualitativa para se produzir a simulação do sistema. A vantagem desta metodologia provém da capacidade de explorar a evolução do sistema ao longo do tempo e com o período desejado. Neste sentido podem-se inserir novos componentes ou funções, ou até modificá-las

para se poder entender o motivo de tal variação no respectivo modelo (FERNANDES, 2001). Para se quantificar os diagramas causais foram criados os Modelos de Estoque e Fluxo.

O autor (*op. cit.*) ainda referencia que os componentes (blocos) para a construção de um modelo em DS são quatro elementos: Estoques (níveis), os quais representam as acumulações de um recurso; Fluxos, que são atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques; Conversores (constantes ou variáveis), os quais processam informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externa ao sistema. Por fim os Conectores, que são os *links* de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e conversores – os conectores de linha simples representam o fluxo de informações dos conversores; já os de linha dupla representam o fluxo de recursos (materiais) do estoque. A Figura 2.6 representa um modelo genérico de estoque e fluxo com os elementos da DS.

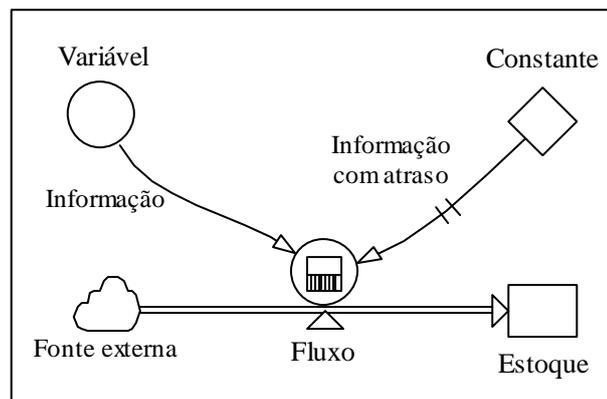


Figura 2.6: Elementos básicos de um modelo genérico de estoque e fluxo.
Fonte: Villela, 2005, p. 9.

Há duas maneiras de construir modelos dentro da DS, dependendo das razões para a modelagem, a saber: as abordagens “de dentro para fora” e “de fora para dentro”. A primeira é a mais utilizada, na qual consiste em conhecer bastante o sistema abordado e com isso compreender como este se comporta, realizando modificações para prever as consequências da operação através de novas maneiras (PIDD, 1998).

Em relação à segunda abordagem, segundo o autor (*op. cit.*), esta é oposta a primeira, pois se conhece profundamente o comportamento global de um sistema, mas não o suficiente a respeito do porquê deste comportamento. Desta maneira, o objetivo é desenvolver um modelo que produza o comportamento observado.

A maioria dos *softwares* disponíveis no mercado, cuja função é simular o sistema dinâmico, dispõe da visualização de qualquer variável do modelo ao longo do tempo na forma

de gráfico e/ou tabela. Desta maneira, a metodologia da DS auxilia a tomada de decisão ou o entendimento de uma situação (FERNANDES, 2001). Entre os *softwares* mais conhecidos estão: Vensim, Powersim, Stella, IThink entre outros.

Em relação aos gráficos, Neto (2003) expõe que muito dos comportamentos dinâmicos gerados pelas estruturas dos ciclos são de três maneiras: crescimento exponencial (gerado por ciclo positivo), *goal-seeking* (gerado por ciclo negativo) e oscilação (gerado por ciclo negativo com atrasos na sua estrutura).

A complementação para esta caracterização da DS será exposta no Capítulo 4, em que será descrito o modelo geral com a abordagem metodológica da DS. Por fim, para uma abrangência teórica da formulação dos conceitos da modelagem da DS, pode ser consultado o livro de Sterman (2000).

2.2.2.3 – Justificativa para a Utilização da Dinâmica de Sistemas

A aplicação da DS no meio prático se estende por inúmeras áreas do conhecimento. Este se adapta aos mais diferentes casos como: modelo de sistema de produção e comercialização de uma pequena indústria; modelo do sistema de aposentadoria; modelo dos fluxos de água em bacia hidrográfica, modelo de uma população de insetos; modelo da poluição de um rio por descarga de poluentes; modelo do crescimento populacional de uma região, entre outros. Para Fernandes (2001), no contexto da gestão de negócios, a DS atualmente recebe o nome de *Business Dynamics*, devido a sua crescente difusão.

Diversos autores têm atribuído a DS em suas pesquisas na simulação e obtenção de resultados, tais como Sterman (2000) que propôs um modelo do ciclo do mercado imobiliário em Chicago (EUA) durante 1830 até 1933. Através da oscilação deste período, o autor (*op. cit.*) elaborou uma estrutura de ciclo causal que representasse o comportamento do mercado descrito.

O autor (*op. cit.*) ainda referencia dois estudos de caso com problemas logísticos reversos em que a DS é aplicada: o primeiro é a recuperação de partes e reciclagem de materiais na indústria automobilística americana e; o segundo é o mercado de reciclagem de papéis.

Ainda na temática dos 3 R's, buscou-se na literatura pesquisas que relacionam a DS com a logística reversa, as quais serão ordenadas e detalhadas no item a seguir.

2.2.2.4 – Modelos de Dinâmica de Sistemas para Redes de Reciclagem

2.2.2.4.1 – Modelos Gerais de Reciclagem e Outros Tipos de Resíduos

De e Zhaoxia (2009) exploram um sistema de reciclagem sobre produtos descartados em um modelo de DS em que focam na identificação das normas de relacionamento entre atividades de reciclagem e contribuição com o planejamento das operações de reciclagem.

Jeong, Kim e Park (2007) propõem um modelo para avaliar os custos ambientais de uma rede de suprimento reversa em razão das novas leis imporem às companhias a consideração de sistemas de reciclagem em seus processos. A metodologia é baseada no conceito de sistemas dinâmicos para auxiliar nos aspectos estratégicos e operacionais do sistema de reciclagem.

Yong (2010) desenvolve um modelo de DS para incorporar capacidade de reciclagem e renda (receita). Em uma simulação a longo prazo, ambas as capacidades de reciclagem e renda foram aumentadas. Além disso, cenários “*what if*” foram realizados baseados em assuntos governamentais e de mercado.

Jianghong (2010) explica que um modelo da cadeia de suprimento integrado bem elaborado pode fechar os ciclos de materiais e fazer o uso total destes materiais. De modo a fazê-lo, o autor (*op. cit.*) projeta um modelo da cadeia de suprimento de ciclo fechado baseado na DS e analisa o comportamento do sistema através de simulações.

Wang e Ding (2009) buscam entender como os comportamentos do sistema dinâmico, tais como oscilação e amplificação da demanda, são afetados na cadeia de suprimento integrada da logística direta e reversa. A ferramenta de análise utilizada pelos autores (*op. cit.*) foi a metodologia de DS.

Qingli, Hao e Hui (2008) analisam o comportamento da cadeia de suprimento reversa através do modelo de simulação dinâmica baseada nos princípios da metodologia de DS, considerando as políticas de proteção ambientais e, simultaneamente, as estratégias do planejamento da capacidade de remanufatura.

Para a aplicação em qualquer setor e produto desejados, foram desenvolvidos modelos de DS genéricos, a saber: Georgiadis, Tagaras e Vlachos (2003) apresentam os principais ciclos de influência de produtos usados; Georgiadis e Vlachos (2004b) e Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) desenvolvem um modelo dinâmico para avaliar o efeito de questões na tomada de decisão a longo prazo das atividades de coleta e remanufatura.

Ainda na mesma temática, Georgiadis, Vlachos e Tagaras (2006) estudam um modelo da DS para uma cadeia de suprimento de ciclo fechado de um único produto. Especificamente, o estudo investiga como o ciclo de vida e os padrões de retorno de um produto afetam as políticas de planejamento de capacidade considerando a expansão e a contração das capacidades de coleta e remanufatura.

Como extensão do trabalho acima, Georgiadis e Athanasiou (2009) aplicam para dois tipos de produtos similares através de dois cenários. Estes dois produtos são considerados pertencendo à mesma família, produzidos pelo mesmo produtor e tendo as mesmas características do ciclo de vida; deste modo o segundo produto deve ser considerado como o sucessor de mercado do primeiro. A investigação é a mesma feita na pesquisa anterior.

Hao, Hills e Chan (2002) constroem um método com a DS para desenvolver um modelo de simulação integrado (*software* de DS – iThink), cujo objetivo é de auxiliar os tomadores de decisão e interessados em melhor entender a complexidade de informações e processos envolvidos no gerenciamento de resíduos de construção e demolição em Hong Kong, através de um projeto com ciclo de vida.

Hao, Hills e Huang (2007) desenvolvem um modelo DS (*software* de DS – Stella) para o planejamento estratégico dos resíduos de construção e demolição em Hong Kong visando contribuir com a tomada de decisão e entendimento das iterações dinâmicas no processo aplicado.

Chaerul, Tanaka e Shekdar (2008) analisam um modelo de gerenciamento de resíduos hospitalares com um estudo de caso da cidade de Jakarta, na Indonésia. Devido a existência de muitos fatores envolvidos neste estudo, o modelo de DS mostra a relação entre esses fatores. Ainda, devido ao fato destes resíduos serem infecciosos, os autores (*op. cit.*) focam em minimizar os riscos à saúde pública.

Vamvakeridou-Lyroudia e Savic (2008) desenvolvem um modelo de DS para processos de reuso e/ou realocação de água em um sistema de abastecimento seguido por uma específica aplicação de estudo de caso na cidade de Sofia, na Bulgária.

Lehr e Milling (2009) reportam o desenvolvimento de um modelo de DS que permite a um fabricante de equipamentos na indústria eletrônica testar diferentes estratégias de recuperação de valor em um cenário da cadeia de suprimento de ciclo fechado. Devido aos curtos ciclos de vida desses produtos e leis ambientais, as companhias enfrentam o desafio em manipular seus produtos em fim de vida ou de uso.

Spengler e Schroter (2003) referem-se à cadeia de suprimento de ciclo fechado de peças derivadas de equipamentos eletrônicos, na qual utilizam a DS como ferramenta para avaliar possíveis estratégias de demanda dessas peças em seu período de fim de vida. O método descrito é implementado em um estudo piloto dentro de duas companhias alemãs para, além de observar o comportamento do sistema, realizar a melhor tomada de decisão por parte dos planejadores sobre redução dos custos da rede.

Georgiadis e Besiou (2008) desenvolvem um modelo de DS para avaliar o impacto das motivações ambientais (legislação ambiental e consumismo verde) e inovações tecnológicas no comportamento de um sistema a longo prazo. O modelo é aplicado em uma cadeia de ciclo fechado para produtos de linha branca – particularmente nos refrigeradores – através de um caso real na Grécia.

Kwan Tan e Kumar (2006) apresentam um modelo de tomada de decisão para fabricantes para maximizar seus lucros em operações da logística reversa. Por este motivo a DS é desenvolvida para complementar modelos prévios e é validado utilizando dados coletados de uma companhia de computadores que fabrica peças avulsas. Os resultados advindos do modelo indicam que peças de reposição de fornecedores são mais rentáveis que peças remodeladas para os computadores.

Xu (2010) introduz a metodologia da DS na previsão da poluição causada pelo resíduo eletrônico na escala de toda sociedade e constrói um modelo para uma companhia terceirizada que recolhe este material. Em seguida, é utilizado um exemplo de simulação com a indústria de telefonia móvel.

Guo e Li (2010) utilizam a DS para estudar o mecanismo de desenvolvimento dinâmico de recuperação de produtos usados na rede logística. Além disso, categorias e características de produtos usados são analisados objetivando companhias de manufatura. Por fim, uma simulação que emprega a recuperação de telefones móveis usados é aplicado como estudo de caso.

Kumar e Yamaoka (2007) utilizam a DS para prever as relações entre as atividades de redução, reuso, reciclagem e disposição na indústria japonesa de automóveis. Diferentes cenários são analisados e mostram como vários elementos logísticos do sistema são afetados pelas imposições governamentais em uma base a longo prazo.

Shankar, Ravi e Tiwari (2008) utilizam a abordagem da DS para modelar as variáveis da cadeia reversa em uma indústria automobilística, a fim de que as performances das operações desta rede possam ser melhor estimadas.

2.2.2.4.2 – Modelos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Rong (2004) utiliza conjuntamente dois métodos (DS e Processo de Análise Hierárquica – AHP) para propor uma abordagem de suporte à decisão visando auxiliar tomadores de decisão em configurar suas estratégias sobre instalações de tratamento e disposição de resíduos de construção. Esta aplicação é ilustrada através de um estudo de caso hipotético envolvendo escolha entre alternativas para instalações que gerenciam os resíduos da construção sob diferentes cenários.

Vasquez (2005) apresenta a DS que tem como meta fornecer uma ferramenta que permita conhecer as variações de quantidades de resíduo sólido municipal em uma região metropolitana do Chile. Este modelo simula o impacto econômico das políticas de gestão dos resíduos em um período a longo prazo. Ainda, o modelo integra diversos componentes, tais como: população, aspectos socioeconômicos, coleta dos resíduos e aterros controlados/não controlados.

Cimren, Bassi e Fiksel (2010) utilizam a metodologia da DS para realizar uma avaliação integrada de políticas em relação à reciclagem e reuso de resíduos e sinergia de subprodutos (convertendo resíduos em subprodutos) no contexto de sistemas complexos – social, gerencial, econômico e ecológico. A pesquisa promove o estudo na cidade de Ohio, nos EUA, comparando o cenário básico – que são as políticas em uso atualmente – com três alternativas de cenários, a saber: combustão da biomassa, estímulo do governo para a reciclagem de resíduos e atividades de sinergia de subprodutos.

Dyson e Chang (2005) apresentam a modelagem da DS para prever a geração de resíduo sólido em uma área urbana de rápido crescimento – a cidade de San Antonio, no Texas (EUA). Como não há uma exata predição da geração de resíduo sólido, o objetivo da pesquisa é demonstrar que o planejamento e o projeto da gestão de resíduo municipal são incapazes de lidar com decisões a longo prazo.

Karavezyris, Timpe e Marzi (2002) exploram um modelo baseado na DS para prever as quantidades de resíduo sólido municipal – particularmente em um caso real na cidade de Berlim, na Alemanha – com a finalidade na tomada de decisão a longo prazo. Em adição, os

autores (*op. cit.*) aplicam outra ferramenta, a Lógica *Fuzzy*, com o intuito de aumentar a confiabilidade na validação do modelo.

Sufian e Bala (2007) estudam um modelo com a DS para prever a geração de resíduo sólido, capacidade de coleta e geração de eletricidade advindos destes resíduos e, avaliar as necessidades para o gerenciamento dos resíduos da cidade de Dhaka, em Bangladesh. Além disso, também é proposto avaliar diferentes políticas para a gestão dos resíduos em questão.

Kollikkathara, Feng e Yu (2010) desenvolvem uma abordagem com a DS para avaliar a geração de resíduo sólido municipal, capacidade do aterro e custo relacionado a assuntos de gerenciamento. Estes processos são ajustados para o estudo na região urbana de Newark, nos EUA e, por fim, é realizada uma previsão através da simulação do quadro específico.

Stave (2008) desenvolve um modelo com a DS para auxiliar as partes interessadas em entender o sistema de resíduo sólido da cidade de Los Angeles, nos EUA. A estrutura do modelo é baseada em um “ciclo de reciclagem” incorporando cinco setores interconectados: consumo, coleta, processo, disposição e produção. Além disso, o modelo permite significantes *tradeoffs* entre resíduos, custos relativos e esforço requerido.

Ulli-Beer (2003) lida com políticas de gerenciamento de resíduo sólido (redes recicláveis e não recicláveis) em uma típica localidade suíça. O propósito da pesquisa é de ganhar melhor entendimento dos problemas de gerenciamento do resíduo sólido local. Por este motivo, é desenvolvido um modelo de DS para analisar efeitos não desejados mostrados em diferentes iniciativas de política local – Suíça e o Estado de Nova Iorque – e testar outras políticas. O escopo do modelo é baseado no comportamento humano e política pública.

2.2.2.4.3 – Modelos de Reciclagem de Plásticos

Wäger e Hilty (2002) reportam-se a uma ferramenta que auxilia no sistema de suporte à decisão. Assim, apresentam uma simulação com a DS para o gerenciamento de resíduos advindos do plástico (em um estado de caso na Suíça) e são discutidas experiências com este sistema. Ainda, a pesquisa combina a metodologia de DS com a Análise do Ciclo de Vida (ACV – *Life Cycle Assessment*) produzindo uma simulação que auxilia na análise do fluxo de materiais, energia e custos em relação aos impactos ambientais e econômicos.

2.2.2.4.4 – Modelos de Reciclagem de Papéis

Abreu (2010) desenvolve um modelo com a DS que ajuda a entender o comportamento do consumo de papel (atual e anterior) e como as mudanças (identificando os

principais pontos de influência) do sistema podem conduzir aos padrões de maior consumo sustentável e, conseqüentemente, diminuir o consumo de papel no futuro. Nesta pesquisa, alguns padrões de comportamento são modificados em uma tentativa de reproduzir os padrões de consumo de papel observados nos Estados Unidos.

2.2.2.4.5 – Modelos de Reciclagem de Vidros

Changsirivathanathamrong, Moore e Linard (2001) fornecem uma estrutura integrando as metodologias de ACV com a DS. Tal estrutura é demonstrada através de um estudo de caso que examina vasilhas de vidros recicláveis na cidade de Sidney, na Austrália. O atual sistema destes resíduos é então descrito utilizando o “Modelo de Ciclo de Vida através da Dinâmica de Sistemas” para determinar os custos ambientais e econômicos; e a viabilidade a longo prazo dos atuais resíduos e aqueles com potencial de serem reciclados.

Mesmo que não sejam tão expressivos para os anseios deste trabalho, porém significativos para um abrangente estado da arte, foram pesquisadas técnicas que possuem traços da DS em seus processos – que é o caso da “Teoria de Controle” e da “Teoria dos Jogos” – além de modelos que empregam técnicas de simulação diversa. Assim sendo, a seguir é exposta a revisão destes tópicos.

2.2.2.5 – Modelos de Teoria de Controle

Chodavarapu e Zheng (2001) desenvolvem uma estrutura com a teoria de controle para sistemas de reciclagem em que deriva uma condição que quantifica o efeito da reciclagem sobre o desempenho do ciclo fechado. Além disso, um conjunto de heurísticas foi desenvolvido relacionados com esta condição e foram aplicados em um sistema sob várias condições operacionais.

Zhou *et al.* (2006) têm como objetivo analisar o desempenho de um específico sistema híbrido com ambas manufatura e remanufatura. Tais atributos têm implicações sobre os custos totais em termos de manutenção de estoque, utilização da capacidade e falhas de atendimento ao cliente. Para atender a essas questões, a metodologia da teoria de controle e simulação foi adotada para a cadeia de suprimento de ciclo fechado em análise.

Huang, Yan e Qiu (2009) utilizam a teoria de controle para, dinamicamente, analisar e estabelecer uma classe de modelos dinâmicos da cadeia de suprimento de ciclo fechado e de sistemas discretos lineares, bem como analisar as operações robustas com métodos de

controle “ H_∞ ”. Por fim, são realizados alguns cálculos de simulação para operações práticas da cadeia de suprimento de sucata na indústria chinesa de aço.

Kleineidam *et al.* (2000) exploram as cadeias de reciclagem de produtos baseado na metodologia da teoria de controle, pois permite investigar propriedades essenciais da cadeia voltados a seu comportamento dinâmico, particularmente com respeito a estabilidade e controlabilidade. Para demonstrar a aplicação deste método na prática, um estudo de caso foi realizado na rede de reciclagem de papel.

2.2.2.6 – Modelos de Teoria dos Jogos

Mukhopadhyay e Setaputra (2006) propõem o uso de um operador logístico externo como integrador da logística reversa, e desenvolvem políticas de decisão ótimas para o vendedor e este membro logístico externo. Um modelo de maximização de lucros é apresentado através da teoria dos jogos, em que o vendedor atua como o líder e o membro externo como seu seguidor.

Mitra e Webster (2008) analisam um modelo em que um fabricante de produtos novos compete com um remanufaturador. Na abordagem da teoria dos jogos, examina-se o efeito dos subsídios do governo como um meio para promover a atividade de remanufatura.

Majumder e Groenevelt (2001) apresentam um modelo de dois períodos de remanufatura em face da concorrência. Em tal modelo aplicado com a teoria dos jogos, um fabricante de equipamento original compete com um remanufaturador local sob várias configurações da logística reversa para os itens retornados. Após estabelecer o “Equilíbrio de Nash¹²” do segundo período, os autores (*op. cit.*) utilizam experimentos numéricos para a estatística comparativa.

Singer, Donoso e Traverso (2003) procuram desvendar o comportamento estratégico em relação à qualidade dentro de um fornecedor-varejista em uma indústria de produtos descartáveis. Para isso, como uma abordagem metodológica, é proposto um jogo estático com informações completas sobre as funções de demanda e custo, bem como uma análise de “Equilíbrio de Nash”¹².

¹² O Equilíbrio de Nash representa uma situação em que, em um jogo envolvendo dois ou mais jogadores, nenhum jogador tem a ganhar mudando sua estratégia unilateralmente.

2.2.2.7 – Modelos de Técnicas de Simulação

Srivastava e Srivastava (2006) desenvolvem uma estrutura que fornece soluções rentáveis próximas do ótimo, para o gerenciamento de produtos de retorno para a logística reversa no contexto indiano. Essa técnica inclui modelos integrados de DS (*software* iThink) com abordagens quantitativas (modelos de otimização MILP) que ajudam a estimar retornos para categorias de produtos selecionadas e, posteriormente, tomar decisões simultâneas.

Kawa e Golinska (2010) apresentam um modelo baseado na teoria dos grafos em uma rede de recuperação, na qual permite encontrar as cadeias de suprimento mais econômicas com capacidades adequadas em toda a rede. Tal metodologia foi implementada em uma plataforma de modelagem programável por simulação chamada NetLogo.

Biehl, Prater e Realff (2007) exploram uma cadeia de suprimento de ciclo fechado de carpetes a fim de analisar fatores como o impacto da reciclabilidade dos produtos e da legislação afetando o desempenho operacional do sistema logístico reverso. Para isso, é utilizado o *software* de simulação EXTEND versão 5.0.

Cruz-Rivera e Ertel (2009) procuram descrever várias maneiras de estabelecer uma cadeia de suprimento de ciclo fechado para a coleta de veículos em fim de vida no México. Para abordar esta tarefa, o problema é tratado através da Logística Reversa e é modelado através de um “Problema de Localização de Instalação Sem Capacidade”. A solução deste modelo é obtida usando o *software* SITATION.

Cheng e Yang (2005) desenvolvem um modelo de simulação que incorpora as atividades da logística reversa. Tal modelo é melhor entendido com sua aplicação e teste através de um estudo do transporte de contêineres usados pela companhia automobilística Toyota. Sobre as técnicas aplicadas, a estrutura do modelo usa um método integrado por algoritmo de bisseção e por algoritmo de inteligência artificial.

Umoh, Nwachukwu e Okure (2010) desenvolvem um modelo de lógica *Fuzzy* para garantir o controle efetivo de rentabilidade. Para reforçar a abordagem proposta, aplica-se a um estudo de caso realizado na indústria de reciclagem de papel na Nigéria. Finalmente, uma simulação computacional utilizando o Matlab/Simulink e a Lógica *Fuzzy* é adotada para auxiliar a decisão experimental para a melhor ação de controle.

Hans *et al.* (2006) desenvolvem uma metodologia para ajudar empresas de reciclagem a enfrentar os desafios deste meio altamente dinâmico. Assim, diferentes simulações baseadas

em *softwares* (chamados ONE e AEOLOS) são realizadas e aplicadas para tomadas de decisão com um estudo em fábricas de reciclagem de plástico.

Kannan, Noorul Haq e Devika (2009) procuram projetar um modelo de distribuição de estoque tanto para a cadeia de suprimento da logística integrada, assim como para a cadeia de suprimento de ciclo fechado. Por isso, é utilizado um algoritmo genético de otimização por “enxame de partículas”. Tal modelo é validado considerando dois estudos de caso: um para um fabricante de pneus e, o outro, para um fabricante de produtos de plástico, ambos localizados na parte sul da Índia. O *software* utilizado foi escrito na linguagem de programação Java.

Schultmann, Engels e Rentz (2004) apresentam uma metodologia para o planejamento da rede de reciclagem integrada levando em conta aspectos da engenharia nos processos industriais. Tal estudo foi desenvolvido através do KOSIMEUS, um *software* de simulação que combina modelos de *flowsheeting* e apoio à decisão. A abordagem é ilustrada com um exemplo da indústria fabricante de ferro e aço, em que a injeção de resíduos de plástico em um alto-forno é investigada.

Kara, Rugrungruang e Kaebernick (2007) apresentam um modelo de simulação de uma rede logística reversa para produtos coletados em fim de vida. Tal modelo foi desenvolvido utilizando o *software* ARENA 7.0, na qual foi testado para o processo de coleta de produtos da linha branca, com um estudo de caso na área metropolitana de Sydney, na Austrália.

van Schaik e Reuter (2010) fornecem uma modelagem dinâmica da rede de reciclagem de lixo eletrônico (ou resíduos de equipamentos eletroeletrônicos) baseado na concepção do produto, a fim de prever e monitorar tais resíduos tecnológica, econômica e ambientalmente. A plataforma de simulação foi elaborada via ferramentas Simulink/Mathlab. Devido à sua abrangência, os modelos propostos podem ser aplicados para a ampla gama de resíduos eletrônicos, bem como os componentes desmontados e/ou separados oriundos destes.

Kumazawa e Kobayashi (2006) desenvolvem um sistema de “Simulação de Ciclo de Vida” – pelo *software* LCSimulator – para estabelecer o aspecto de que um produto é reutilizável ou não. Ao utilizar esta técnica, uma avaliação econômica e ambiental baseada no fluxo de materiais pode ser verificada. A utilidade do sistema desenvolvido é mostrada por uma aplicação sobre computadores reusáveis.

Hellstrom e Johansson (2010) examinam o impacto de diferentes estratégias de controle sobre o gerenciamento de itens retornáveis nas cadeias de suprimento de ciclo fechado. A fim de fazê-lo, um modelo de simulação foi desenvolvido com base em um estudo de caso na indústria de alimentos; sendo que foi utilizada para explorar diferentes cenários. O modelo de simulação computacional foi construído em Visual Basic.NET com o Microsoft Excel.

Matsumoto (2010) desenvolve um modelo de simulação para as empresas de reutilização, em que inclui pré-requisitos (e.g. propriedade do produto, preferências do consumidor e legislação) como seus parâmetros para analisar os resultados dos mercados de reuso. A fim de verificar o desempenho do modelo, foi definido um estudo de caso em empresas de reutilização no Japão. A ferramenta para simulação utilizada foi da própria criação do autor (*op. cit.*) nomeada de *Reuse Market Simulator*.

Por fim, diante da expressiva quantidade de publicações com modelos da cadeia de suprimento da logística tradicional utilizando abordagens quantitativas, nota-se com o levantamento bibliográfico feito que nas últimas duas décadas houve também o aumento na preocupação com a cadeia reversa com fins intrinsecamente ambientais.

Mesmo que esta afirmação acima possa transmitir positivamente, Georgiadis e Besiou (2008) concluem que é notável que depois do ano de 2000, poucos problemas de gerenciamento estratégico nas cadeias de suprimento de ciclo fechado foram analisados e reportados na literatura. Ainda, a partir de 2003, 10% das publicações de DS trataram sobre aspectos de meio ambiente ou conservação de recursos naturais não renováveis. Essas ações ambientais, além das econômicas, são para Georgiadis e Vlachos (2004b) os fatores direcionadores que motivam as empresas em integrar sua rede direta com a reversa.

2.2.3 – Resumo dos Modelos Apresentados

Um dos objetivos da pesquisa ressaltava um aspecto mais investigativo e descritivo, que consistia em apresentar um levantamento bibliográfico dos principais modelos quantitativos que se relacionam com uma logística reversa das atividades. Para tanto, a Tabela

2.2 apresenta um resumo destes modelos abordados neste capítulo, sendo os mesmos categorizados conforme diferentes perspectivas:

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados.

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Spengler <i>et al.</i> (1997)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Reciclagem de aço
Barros, Dekker e Scholten (1998)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Reciclagem de areia
Krikke, Van Harten e Schuur (1999)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Máquinas copiadoras
Lim e Kim (1999)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Algoritmo genético	Modelo genérico
Jayaraman, Guide Jr. e Srivastava (1999)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Equipamentos eletrônicos
Realf, Ammons e Newton (1999)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Reciclagem de carpetes
Schultmann, Engels e Rentz (2003)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Baterias usadas
Min, Ko e Ko (2006)	Reverso	Operacional/ Tática	MINLP	Algoritmo genético	Retorno de vendas <i>on-line</i>
Lieckens e Vandaele (2006)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MINLP	_____	Modelo genérico
Realf, Ammons e Newton (2004)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Programação estocástica	Reciclagem de carpetes
Listes e Dekker (2005)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Programação estocástica	Reciclagem de areia
Tuzkaya e Gülsün (2008)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	<i>Fuzzy</i>	_____	Retorno de produtos
Qin e Ji (2010)	Reverso	Operacional/ Tática	<i>Fuzzy</i>	Algoritmo genético	Recuperação de produtos

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados (CONTINUAÇÃO).

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Wadhwa, Madaan e Chan (2009)	Reverso	Operacional/ Tática	<i>Fuzzy</i>	_____	Produtos de linha marrom
Hanafi, Kara e Kaebernick (2008)	Reverso	Operacional/ Tática	<i>Fuzzy Colored Petri Net</i>	_____	Celulares
Min e Ko (2008)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Algoritmo genético	Serviços logísticos terceirizados
Pishvae, Rabbani e Torabi (2011)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Modelo genérico
Easwaran e Üster (2010)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Decomposição de Bender	Cadeia de multiprodutos
Beamon e Fernandes (2004)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Modelo genérico
Lu e Bostel (2007)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Algoritmo Lagrange	Redes de remanufatura
Demirel e Gökçen (2008)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Redes de remanufatura
Pati, Vrat e Kumar (2008a)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Reciclagem de papel
Hong <i>et al.</i> (2006)	Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Resíduos eletrônicos
Krikke, Bloemhof e Van Wassenhove (2003)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	_____	Refrigeradores usados
Kannan, Sasikumar e Devika (2010)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MILP	Algoritmo genético	Baterias recicláveis
Jeung Ko e Evans (2007)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MINLP	Algoritmo genético	Serviços logísticos terceirizados
Zhou <i>et al.</i> (2005)	Direto + Reverso	Operacional/ Tática	MINLP	Algoritmo genético	Retorno de produtos

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados (CONTINUAÇÃO).

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Pati, Vrat e Kumar (2008b)	Direto + Reverso	Operacional/Tática	Programação objetivo inteira combinada	_____	Reciclagem de papel
Pati e Vrat (2010)	Direto + Reverso	Operacional/Tática	Programação linear	_____	Papel
Pati, Vrat e Kumar (2006)	Direto + Reverso	Operacional/Tática	Programação linear	_____	Papel
De e Zhaoxia (2009)	Reverso	Estratégica	DS	_____	Produtos usados
Jeong, Kim e Park (2007)	Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Yong (2010)	Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Jianghong (2010)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Wang e Ding (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Qingli, Hao e Hui (2008)	Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Georgiadis, Tagaras e Vlachos (2003)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Georgiadis e Vlachos (2004b)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Georgiadis, Vlachos e Tagaras (2006)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Georgiadis e Athanasiou (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	_____	Modelo genérico
Hao, Hills e Chan (2002)	Reverso	Estratégica	DS	iThink	Resíduos de construção e demolição

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados (CONTINUAÇÃO).

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Hao, Hills e Huang (2007)	Reverso	Estratégica	DS	Stella	Resíduos de construção e demolição
Chaerul, Tanaka e Shekdar (2008)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Resíduos hospitalares
Vamvakeridou-Lyroudia e Savic (2008)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Reuso e/ou realocação de água
Lehr e Milling (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	—————	Resíduos eletrônicos
Spengler e Schroter (2003)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	—————	Resíduos eletrônicos
Georgiadis e Besiou (2008)	Direto + Reverso	Estratégica	DS	—————	Produtos linha branca
Kwan Tan e Kumar (2006)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Computadores
Xu (2010)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Celulares
Guo e Li (2010)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Celulares
Kumar e Yamaoka (2007)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Automóveis
Shankar, Ravi e Tiwari (2008)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Automóveis
Rong (2004)	Reverso	Estratégica	DS	AHP	Resíduos de construção
Vasquez (2005)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Cimren, Bassi e Fiksel (2010)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Reciclagem/re uso de resíduos
Dyson e Chang (2005)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados (CONTINUAÇÃO).

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Karavezyris, Timpe e Marzi (2002)	Reverso	Estratégica	DS	<i>Fuzzy</i>	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Sufian e Bala (2007)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Kollikkathara, Feng e Yu (2010)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Stave (2008)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Ulli-Beer (2003)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Gerenciamento dos Resíduos sólidos
Wäger e Hilty (2002)	Reverso	Estratégica	DS	ACV	Reciclagem de plásticos
Abreu (2010)	Reverso	Estratégica	DS	—————	Reciclagem de papel
Changsirivanathamrong, Moore e Linard (2001)	Reverso	Estratégica	DS	ACV	Reciclagem de vidros
Chodavarapu e Zheng (2001)	Direto + Reverso	Estratégica	Teoria de controle	—————	Redes de reciclagem
Zhou <i>et al.</i> (2006)	Direto + Reverso	Estratégica	Teoria de controle	—————	Modelo genérico
Huang, Yan e Qiu (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	Teoria de controle	Controle “H ∞ ”	Reciclagem de aço
Kleineidam <i>et al.</i> (2000)	Reverso	Estratégica	Teoria de controle	—————	Reciclagem de papel
Mukhopadhyay e Setaputra (2006)	Reverso	Estratégica	Teoria dos jogos	—————	Modelo genérico
Mitra e Webster (2008)	Reverso	Estratégica	Teoria dos jogos	—————	Rede de remanufatura
Majumder e Groenevelt (2001)	Reverso	Estratégica	Teoria dos jogos	Equilíbrio de Nash	Rede de remanufatura
Singer e Trav (2003)	Reverso	Estratégica	Teoria dos jogos	Equilíbrio de Nash	Produtos descartáveis

Tabela 2.2: Resumo dos modelos apresentados (CONTINUAÇÃO).

Autores	Tipo de Fluxo	Tipo de Modelo	Técnica Empregada	Complemento da Técnica	Aplicação
Srivastava e Srivastava (2006)	Reverso	Estratégica	DS	iThink e MILP	Produtos retornados
Kawa e Golinska (2010)	Direto + Reverso	Estratégica	Teoria dos grafos	NetLogo	Rede de recuperação
Biehl, Prater e Realff (2007)	Direto + Reverso	Estratégica	EXTEND	—————	Carpetes
Cruz e Ertel (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	SITATION	—————	Veículos em fim de vida
Cheng e Yang (2005)	Reverso	Estratégica	Algoritmo de bisseção	Algoritmo de inteligência artificial	Contêineres usados
Umoh, Nwachuku e Okure (2010)	Reverso	Estratégica	Matlab/Simulink	<i>Fuzzy</i>	Reciclagem de papel
Hans <i>et al.</i> (2006)	Reverso	Estratégica	ONE/AEOLOS	—————	Reciclagem de plásticos
Kannan, Noorul Haq e Devika (2009)	Direto + Reverso	Estratégica	Algoritmo genético	Java	Fabricante de pneus e plásticos
Schultmann, Engels e Rentz (2004)	Direto + Reverso	Estratégica	KOSIMEUS	—————	Fábrica de ferro e aço
Kara, Rugrungruang e Kaebernick (2007)	Reverso	Estratégica	ARENA	—————	Produtos de linha branca em fim de vida
van Schaik e Reuter (2010)	Reverso	Estratégica	Matlab/Simulink	—————	Resíduos eletro-eletrônicos
Kumazawa e Kobayashi (2006)	Reverso	Estratégica	LCSimulator	—————	Computadores reusáveis
Hellstrom e Johansson (2010)	Direto + Reverso	Estratégica	Visual Basic.NET	Microsoft Excel	Alimentos retornáveis
Matsumoto (2010)	Reverso	Estratégica	<i>Reuse Market Simulator</i>	—————	Redes de reutilização

3 - PROGRAMA MUNICIPAL DE COLETA SELETIVA

3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

São Carlos é um município brasileiro localizado no interior do estado de São Paulo, próximo de seu centro geográfico (vide Figura 3.1), e uma distância rodoviária de cerca de 240 quilômetros da capital paulista (PMSC, 2012). Com uma população de 221.950 habitantes, distribuídos em uma área total de 1.137,3 km², é a 31^a maior cidade do Estado em número de residentes (IBGE, 2010).

A cidade é considerada um grande polo industrial por abrigar algumas expressivas multinacionais, como por exemplo, Volkswagen, Faber-Castell, Electrolux e Tecumseh. Ademais, é conhecida como a capital da tecnologia e do conhecimento por sediar os campi da Universidade de São Paulo, a Universidade Federal de São Carlos e o Instituto Federal de São Paulo, além de outras instituições de ensino superior particulares (PMSC, 2012).

Quanto à geração de RSU's, de acordo com a Tabela 3.1, verifica-se um comparativo de São Carlos com as maiores cidades da região, em que se dispõem os municípios em ordem decrescente de resíduos, segundo dados disponibilizados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Dessa forma, pode-se notar que quanto maior e mais desenvolvida a cidade, além do aumento do poder aquisitivo do cidadão, maior o índice de lixo per capita por habitante.

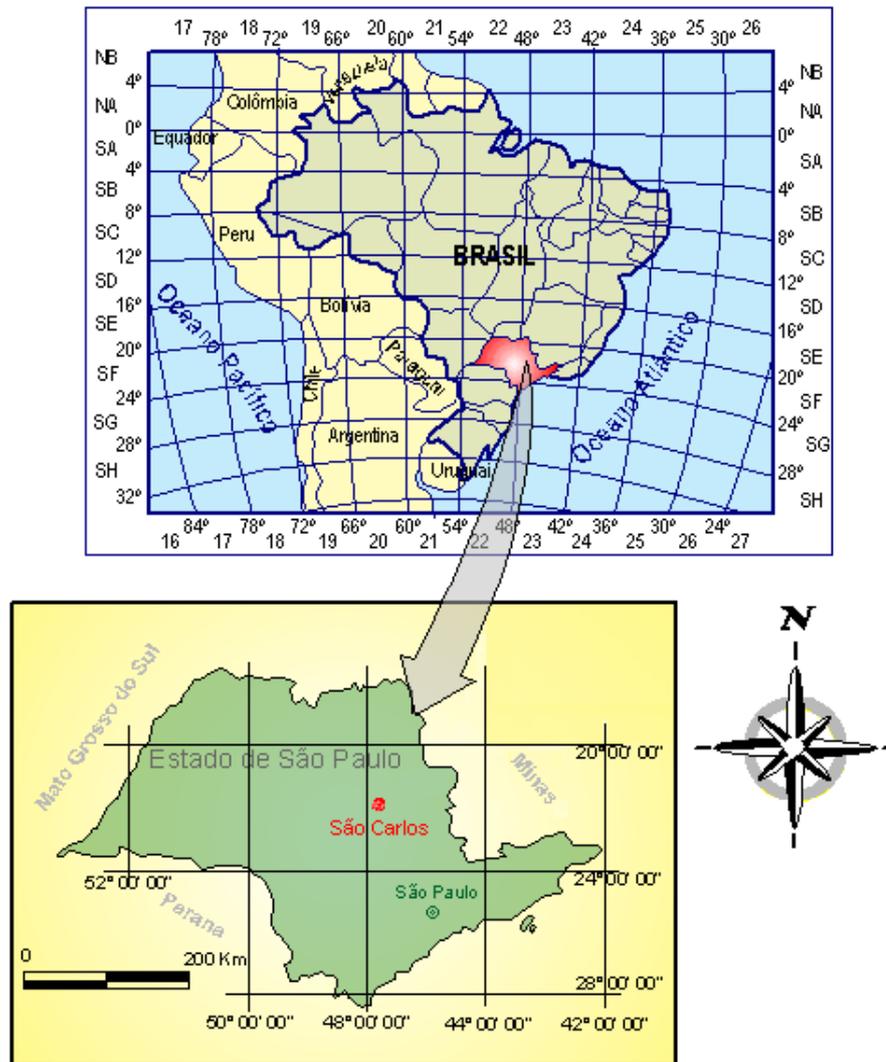


Figura 3.1: Localização da área em estudo.

Tabela 3.1: Ranking de resíduos gerados das cidades próximas a São Carlos.

Município	Toneladas de lixo por dia	População	Lixo per capita mensal (Kg)
Ribeirão Preto	422,4	604.682	20,95
Franca	187,9	318.640	17,69
São Carlos	127,8	221.950	17,27
Araraquara	121,7	208.662	17,49
Barretos	54,4	110.074	14,82
Sertãozinho	54,3	112.101	14,53
Bebedouro	30,2	76.786	11,79
Matão	28,6	75.035	11,43

Fonte: Folha, 2011.

3.2 – HISTÓRICO DA COLETA SELETIVA EM SÃO CARLOS

Até o final da década de 90 a atividade de coleta de recicláveis em aterros sanitários, como o do município de São Carlos, em que trabalhavam cerca de 40 pessoas, era basicamente uma alternativa de renda e sustento dos trabalhadores.

Com a intervenção do Ministério Público e da CETESB no aterro municipal de São Carlos, esse tipo coleta foi proibida. Assim, em 2001, a Prefeitura Municipal de São Carlos (PMSC), criou e implementou o Programa Municipal de Redução e Controle de Resíduos chamado “Futuro Limpo”.

Esse programa visava agregar os trabalhadores do aterro sanitário em cooperativas de coleta seletiva de materiais e fazer inclusão social com geração de renda advinda dessa coleta. Deste modo, surgiram três cooperativas: Ecoativa e Coopervida, formadas por trabalhadores oriundos da catação no aterro e, Cooletiva, formada a partir de uma iniciativa de moradores de um bairro (Jardim Gonzaga) da cidade.

Essas três cooperativas trabalhavam independentemente, em regiões distintas de São Carlos (vide Figura 3.2) no período entre julho de 2002 a dezembro de 2009, contudo, a partir de 2010 se uniram em uma só cooperativa, a Coopervida – Cooperativa de Catadores de Materiais Recicláveis de São Carlos.

O motivo que levou tal consolidação, incentivado pela prefeitura, foi devido à redução dos domicílios coletados, estagnação da área de atendimento, do número de cooperados e da quantidade de material coletado. Além disso, foi verificado o atendimento deficiente e redução da participação da população no Programa, na qual a coleta seletiva respondia com pouco mais de 5% do total de material reciclável gerado. Por fim, a queda acentuada dos preços dos recicláveis e da remuneração dos trabalhadores foi fator crítico para uma reformulação do modelo previamente estabelecido.

Com esta centralização e organização, esta cooperativa pôde negociar junto à prefeitura um novo modelo de contrato de prestação de serviço (firmada em 2009 e entrando em vigor a partir de 2010), o qual prevê o pagamento mensal na proporção ao atendimento de metas estabelecidas pela administração (Prefeitura) por uma parcela fixa, bem como uma variável pelo acréscimo de material coletado e comercializado, ou seja, um bônus, de maneira que quanto mais é coletado, mais a cooperativa recebe. A vigência do contrato é de 12 meses, podendo ser prorrogado nas hipóteses legais.

O programa municipal de coleta seletiva atendia inicialmente 12 bairros de São Carlos, sendo que atualmente e com a expansão do programa, o número de bairros atendidos chegou a 60.



Figura 3.2: Área de cobertura das cooperativas no município de São Carlos até 2009. Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, 2010.

3.3 – PROGRAMA FUTURO LIMPO

Para um melhor entendimento do programa de coleta seletiva, se faz necessário conhecer, mesmo que superficialmente, o programa Futuro Limpo, já que a atividade de coleta seletiva está inserida nesta iniciativa.

Assim, de acordo com a PMSC (2010), o programa Futuro Limpo – Programa Municipal de Redução e Controle de Resíduos – tem como missão a

[...] gestão dos resíduos gerados no município de São Carlos, visando sua minimização através dos princípios da participação consciente da comunidade e da geração de trabalho, renda e dignidade para aqueles que atuam profissionalmente na cadeia de reciclagem.

De acordo com o autor (*op. cit.*), os objetivos do programa são:

- Reduzir a quantidade de resíduos gerados por meio de ações socioeducativas;
- Maximizar o envio de resíduos à cadeia de reciclagem;
- Controlar e minimizar a geração de resíduos perigosos;
- Monitorar e recuperar áreas degradadas por disposição irregular de lixo no passado.

Para isso, o programa é operacionalizado através dos seguintes subprogramas:

- Resíduos de construção e demolição;
- Resíduos recicláveis (secos) – Programa de Coleta Seletiva;
- Resíduos de serviços de saúde;
- Resíduos eletroeletrônicos – Programa Recicl@tesc;
- Resíduos compostáveis;
- Resíduos sólidos domiciliares – Coleta de lixo comum;
- Resíduos de pneus inservíveis;
- Mutirão cidade limpa.

Portanto, a coleta seletiva aparece como um instrumento para o cumprimento dos objetivos do programa – à medida que possui papel incentivador – pois contribui para que a população faça a correta separação dos resíduos. Além disso, esta iniciativa é primordial para que os resíduos recicláveis não tenham como destino o aterro municipal, propiciando outro destino mais adequado aos mesmos, quer pela cadeia reversa de materiais de pós-consumo.

3.4 – COOPERATIVA DE CATADORES DE MATERIAIS RECICLÁVEIS DE SÃO CARLOS – COOPERVERDA

O objetivo da Coopervida é a “prestação de serviços de coleta, triagem, beneficiamento e comercialização de materiais recicláveis, assim como proporcionar o exercício e o aprimoramento da atividade profissional dos cooperados com base na colaboração recíproca e em todos os assuntos de interesse comum” e de caráter socioeconômico e ambiental.

Neste sentido a Coopervida busca:

- Viabilizar e desenvolver as atividades dos seus associados;
- Divulgar, distribuir e comercializar a produção e a prestação de serviços de seus cooperados;
- Representar o conjunto de sócios que integram a Cooperativa, em assuntos de interesse comum e de caráter socioeconômico e ambiental, perante quaisquer outras entidades de direito público ou privado nacional ou internacional;
- Planejar, adotar e executar ações, programas e projetos destinados a promover e acelerar o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região compreendida na área de atuação da Cooperativa;
- Contribuir para a integração das atividades dos cooperados com as ações, programas e projetos desenvolvidos pelos órgãos não-governamentais, órgãos governamentais e empresas privadas;
- Representar os cooperados, junto a outras Associações, Entidades, Conselhos, Órgãos Públicos e demais Instituições, respeitando o presente Estatuto, mediante a aprovação do Conselho Administrativo;
- Contratar produtos e serviços para seus cooperados em condições convenientes;
- Proporcionar apoio aos cooperados no que for necessário para melhor execução dos serviços oferecidos;
- Providenciar e organizar os serviços aproveitando a capacidade dos cooperados, distribuindo-os sempre conforme suas aptidões e interesse coletivo; e
- Promover, defender e divulgar os ideais cooperativistas contribuindo para a expansão do cooperativismo e da organização popular.

3.4.1 – Caracterização da Coleta Seletiva em São Carlos

A coleta seletiva em São Carlos era setorizada e cada cooperativa tinha sua área de coleta. Com a união das cooperativas, a setorização da coleta foi refeita e reestabelecida da seguinte forma:

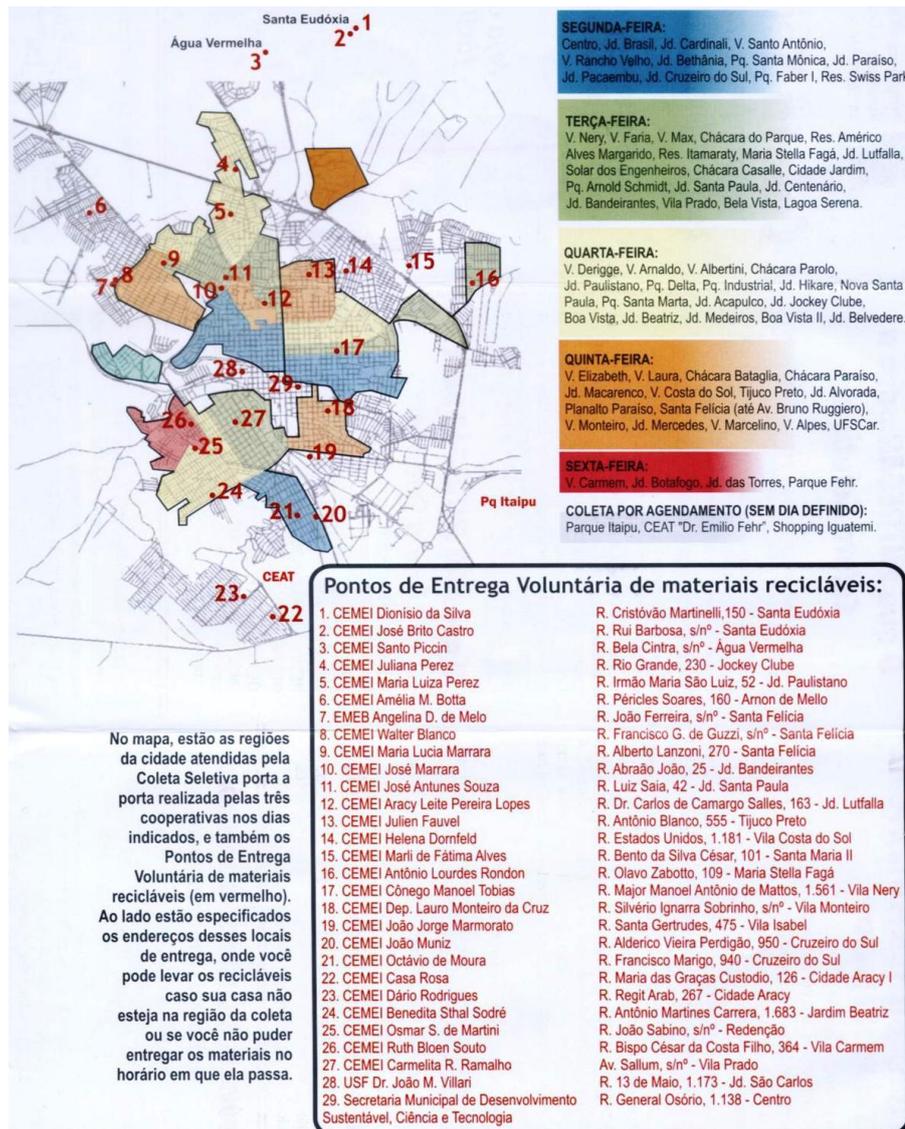


Figura 3.3: Área de cobertura das cooperativas no município de São Carlos.
Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, 2010.

A cooperativa possui três caminhões para a coleta, esses são alugados pela prefeitura e repassados para o uso da mesma. Os caminhões possuem gaiola para melhor acondicionamento do material a ser reciclado, conforme é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Caminhão utilizado na coleta seletiva de São Carlos.

O esquema da cooperativa é realizado da seguinte forma: os cooperados se reúnem todas as manhãs na sede da cooperativa, mesmo local em que se situa o galpão de acondicionamento e triagem dos materiais (vide Figura 3.5). Em seguida, o efetivo de trabalhadores é dividido com a tarefa de atividades no galpão e a outra parte segue com a rota realizada pelo caminhão para a tarefa de coleta em campo, obedecendo as regiões e dias da semana previamente estabelecidas (vide Figura 3.3).



Figura 3.5: Galpão-sede da Coopervida.

Na área de coleta em campo, a incumbência fica de que as mulheres passam de “porta a porta” recolhendo o material reciclável separado previamente nas residências e os homens ficam no caminhão para o carregamento do mesmo. O acondicionamento nas portas das casas é realizado com sacos de rafia e (vide Figura 3.6), quando atingido seu limite, são descarregados ou depositados no caminhão.



Figura 3.6: Sacos de rafia utilizados na coleta seletiva da cooperativa cooperada.

Quando o caminhão completa seu volume ou peso máximo (que é estabelecido pelos cooperados durante cada viagem), este segue para a sua pesagem (em uma empresa recicladora de papelão), em que se deduz a tara do caminhão para se chegar ao peso do material coletado. Logo após este procedimento, o caminhão segue para o galpão-sede da cooperativa e finalmente é descarregado, além dos materiais coletados serem armazenados em *bags* (sacos maiores de nylon).

A coleta ocorre geralmente na parte da manhã, ficando o período vespertino reservado para a triagem dos recicláveis – em que os produtos são dispostos em uma mesa de separação (está em estudo a implantação de uma esteira para separação) – e sua posterior prensagem. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram as mesas de separação e a Figura 3.9 expõe as prensas. Dependendo da quantidade de material recolhido durante a semana, alguns cooperados trabalham no sábado para terminar a triagem e prensagem dos recicláveis remanescentes. Por fim, esses materiais são vendidos às indústrias recicladoras e/ou sucateiros.



Figura 3.7: Mesa de separação 1.



Figura 3.8: Mesa de separação 2.



Figura 3.9: Prensas.

Portanto, de acordo com todas as informações até o momento da cooperativa em estudo, pode-se definir o fluxograma da coleta seletiva (vide Figura 3.10), detalhando-o da maneira como se segue:

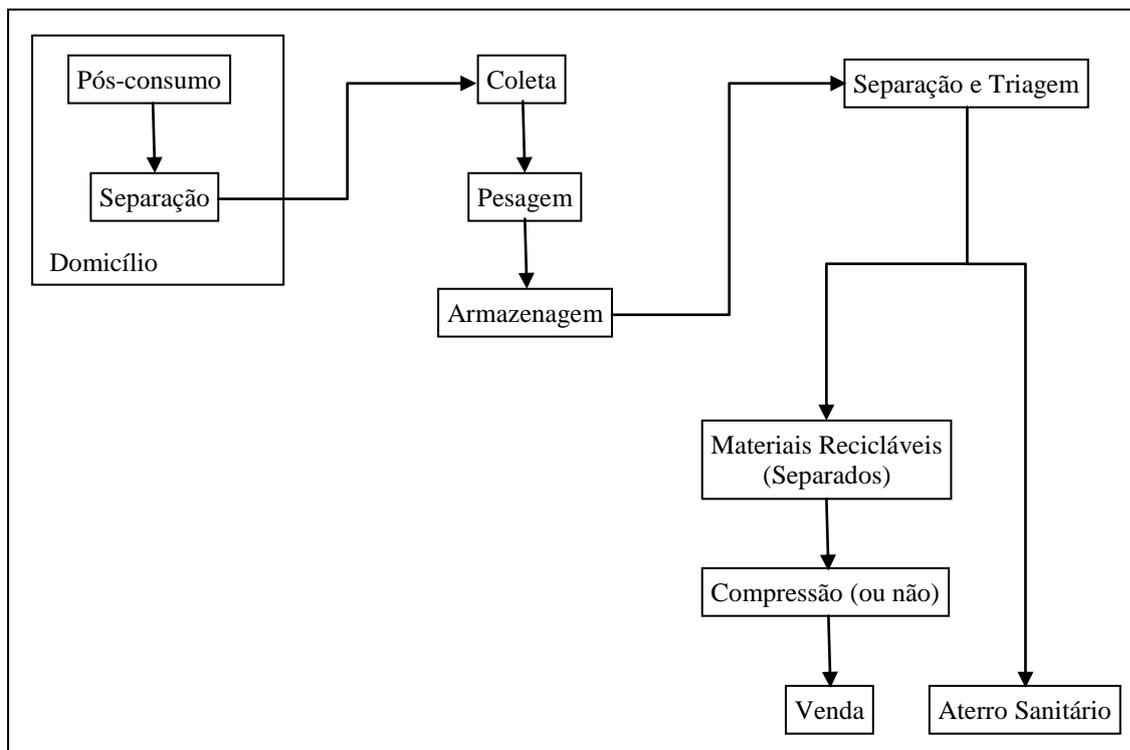


Figura 3.10: Fluxograma da Coleta Seletiva de São Carlos desenvolvida pela cooperativa Coopervida.

A separação dos materiais, feita manualmente, é atribuída de acordo com as suas propriedades (composição da matéria prima de modo a atender às condições do mercado comprador) e características, para tanto, na Coopervida são classificados por:

- Papel:
 - Branco;
 - Misto (picado);
 - Papelão;
 - Jornal.

- Vidro:
 - Branco;
 - Colorido;
 - Vasilhame.

- Metal:
 - Ferro;
 - Latas de alumínio;
 - Panelas;
 - Chumbo;
 - Cobre;
 - Zinco;
 - Alumínio.

- Plástico:
 - PET (poliestireno de alta densidade):
 - Colorido;
 - Branco.
 - Polipropileno;
 - Sacos e sacolas:
 - Colorido;
 - Transparente.

- Tetra Pak;

- Outros.

3.4.2 – Dados Sobre o Programa de Coleta Seletiva de São Carlos

A seguir são fornecidos alguns dados acerca do histórico do programa de coleta seletiva de São Carlos (de acordo com sua limitação/disponibilidade), apresentado aqueles necessários para atingir os objetivos desta pesquisa:

Tabela 3.2: Resumo de dados do programa de reciclagem de São Carlos (2004 a 2010).

Geral/Período	Mai – Dez (2004)	Jan – Dez (2005)	Jan – Dez (2006)	Jan – Dez (2007)	Jan – Dez (2008)	Jan – Dez (2009)	Jan – Dez (2010)
Vidro (ton) (1)	82,50	144,50	109,10	65,00	52,20	61,40	117,70
Tetra Pak (ton) (2)	16,70	31,60	29,20	30,90	19,60	43,60	33,00
Plástico (ton) (3)	76,30	93,30	110,10	95,40	75,50	89,20	135,40
PET (ton) (4)	32,20	49,70	42,90	51,60	40,00	42,90	36,80
Papel (ton) (5)	239,90	348,00	347,50	402,40	337,50	438,60	506,40
Alumínio (ton) (6)	3,30	5,60	11,90	6,20	8,80	7,10	11,20
Metal (ton) (7)	68,90	74,60	103,50	80,50	53,70	66,80	106,20
Outros (ton) (8)	0,18	0,97	7,60	0,30	4,60	101,40	0,00
Material Coletado (ton) (A)	598,50	936,50	932,10	963,30	807,80	1.204,90	1.401,10
Material Vendido (ton) (B)	520,00	748,30	761,80	732,30	591,90	851,00	946,70
% (Vendido/ Material Coletado) (B)/(A)	87%	80%	82%	76%	73%	71%	68%
Número de Trabalhadores	47	41	37	39	33	37	49
Salário Trabalhadores (R\$)	454,37	434,14	429,00	533,59	549,22	491,31	545,00

Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos (2011) (adaptado pelo autor).

Sendo que:

- ❖ Cidade: São Carlos/SP – População \approx 220.000 habitantes (IBGE, 2010);
- ❖ **(B)** Material Vendido = **SOMA** das 8 categorias: (1) + (2) + ... + (8);
- ❖ 2004, 2005, 2006, 2008 – Valores anuais acumulados somente;
- ❖ 2007, 2009, 2010 – Valores mensais e anuais acumulados;
- ❖ Programa de Coleta Seletiva: - Criação = Junho/2002;

- Início das atividades = Julho/2002.

Na Figura 3.11 apresenta-se um histograma da quantidade de material coletado/vendido no período de 2004 a 2010, com os dados oriundos da Tabela 3.2:

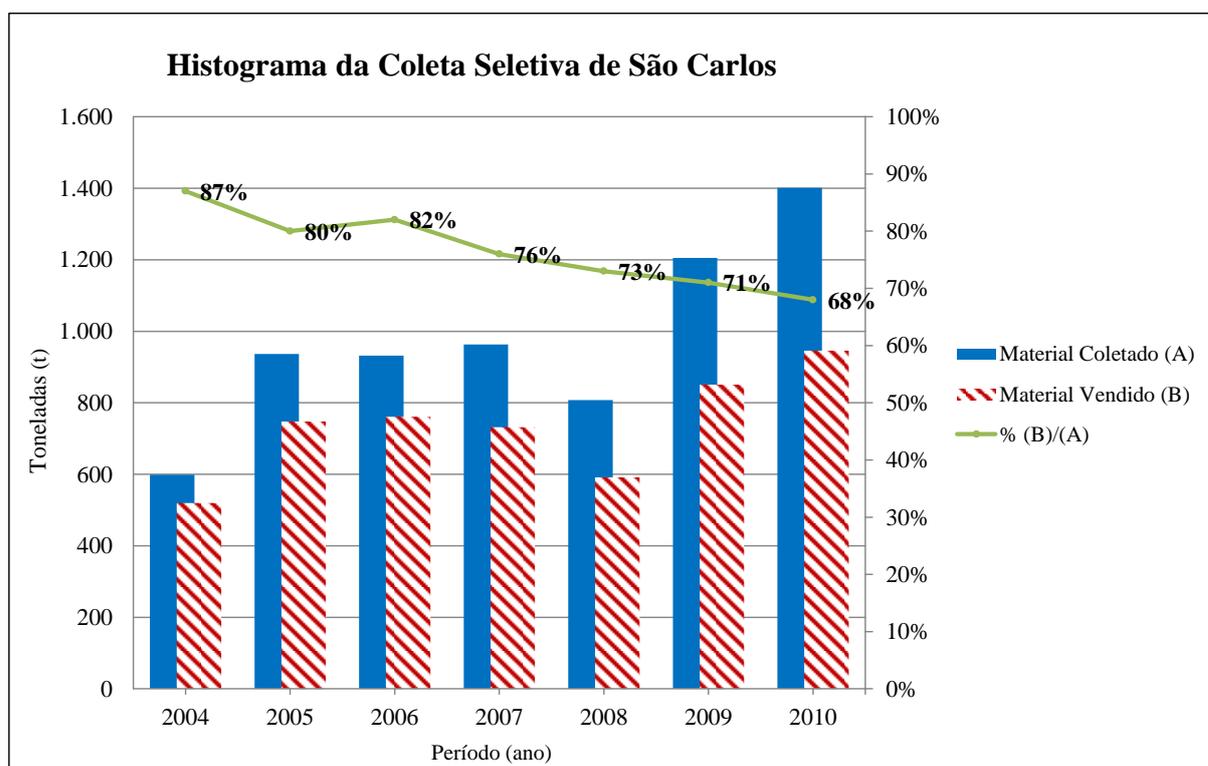


Figura 3.11: Histograma do Programa de Reciclagem de São Carlos ente 2004 a 2010.

A classificação padrão dos recicláveis se divide basicamente em quatro, a saber: papel, plástico, vidro e metal. Porém, para a pesquisa foram definidas oito categorias, sendo que algumas são subcategorias dos principais recicláveis, como é o caso de embalagens tetra pak (papel), garrafas tipo PET (plástico), latas de alumínio (metal), além de outros materiais diversificados. Sua justificativa é devido a estas subcategorias merecerem destaque em qualquer sociedade devido ao seu alto consumo e por apresentarem grandes quantidades de materiais coletados.

3.4.3 – Informações Relevantes e Dados Operacionais Sobre o Programa de Coleta Seletiva de São Carlos

De acordo com dados fornecidos pela PMSC (vide Tabela 3.2), a quantidade de material coletado pelas três cooperativas que atuavam em São Carlos durante o período de maio de 2004 a dezembro de 2009 (período que estas trabalhavam individualmente), apresentou uma média histórica em torno de 80 toneladas/mês, conforme é constatado a seguir na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Média mensal aproximada de material coletado no período de 2004 a 2010.

Ano	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Média Mensal (toneladas)	75	80	80	80	70	100	120

Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos (2011) (adaptado pelo autor).

Para tanto, ficou estabelecido, através de contrato firmado entre prefeitura-cooperativa, o aumento progressivo desta quantidade de material coletado, na qual a meta é de, em um horizonte de quatro anos, passar dos iniciais 80 toneladas/mês (média histórica do programa até 2009) e atingir 250 toneladas/mês, conforme é demonstrado na Tabela 3.4 em detalhes:

Tabela 3.4: Metas estabelecidas pela prefeitura municipal.

Ano	2010	2011	2012	2013
Meta Mensal (toneladas)	130	180	220	250

Fonte: Prefeitura Municipal de São Carlos, 2010.

Ainda segundo este contrato entre as partes envolvidas, foi estipulado alguns critérios de incentivo na execução das atividades da cooperativa, através dos subsídios descritos:

- Contratar através de empresa terceirizada os serviços de transporte, o qual três caminhões/motoristas, custos de manutenção e combustível dos veículos e outros custos relacionados são definidos pelo contrato com um custo fixo, sendo este renovável anualmente;
- Equipamentos de proteção individual e acessórios para os catadores cadastrados, tais como: bonés, coletes, capas de chuva e luvas;

- Fornecimento de espaço físico próprio – barracão de 800m² – para a instalação da cooperativa, além da isenção de IPTU e do aluguel (este último é pago pela São Carlos Ambiental – recolhe os RSUs da cidade) e, também de arcar com despesas de energia e água;
- Disponibilização de equipamentos (maquinários em geral) como prensas, mesas de triagem, balanças entre outros;

Vale ressaltar que a gestão coletiva do empreendimento tem como pressuposto de organização o modelo auto-gestionário, em que as decisões e o controle da cooperativa são exercidos pelos seus próprios associados.

Ainda, a iniciativa do programa deve garantir que a receita advinda da comercialização dos materiais coletados, somado à remuneração dos serviços de coleta e/ou incentivos ao cumprimento de metas, proporcione a viabilidade econômica das cooperativas, ou seja, que os cooperados tenham uma retirada líquida não inferior ao salário mínimo.

Referente à qualidade do serviço prestado e quantidade de pessoas envolvidas, fica estabelecido em aumentar a jornada de trabalho para o atendimento da coleta seletiva, passando de 25 horas semanais para 40 horas semanais.

Como ações visando o aumento da participação da população, está a ampliação da coleta seletiva a partir da instalação de mais ECOPONTOS em locais estratégicos que maximizem o envolvimento da sociedade para com estes pontos de entrega voluntária. Atualmente São Carlos conta com três ecopontos operantes e mais um a ser instalado em breve.

Em relação às despesas por conta da cooperativa, estas serão com manutenção dos equipamentos e seus insumos (graxa e óleo), produtos de limpeza, *bags* de variados tamanhos, telefone e questões tributárias, a saber: INSS, PIS/COFINS entre outros.

3.4.3.1 – Dados Operacionais

- A quantidade de materiais vendidos é menor que a coletada (vide Tabela 3.2) pois não se consegue comprador para satisfazer toda a coleta mensal. Com isso, a sobra é estocada e somada ao mês subsequente e assim sucessivamente.
- Para a fase que antecede a triagem do material, sua armazenagem não é mais que uma semana. Além disso, a compressão é feita no mesmo dia de separação.

Para a venda dos recicláveis, estes permanecem armazenados de duas a três semanas até sua compra;

- Sobre a triagem dos recicláveis, estes são espalhados na mesa de separação (como vieram da coleta em campo) e são separados por tipos, ou seja, nem por categorias tampouco por processos de compressão na prensa e acondicionamento em *bags* (sacos de rafia);
- Sobre a forma de processamento, alguns tipos são prensados, tais como: papelão, tetra pak, plásticos (em geral exceto o PVC) e garrafas PET. Os demais são acondicionados em *bags* de diferentes tamanhos, a saber: metal, latas de alumínio, papéis (em geral), plástico (PVC), vidros e outros materiais diversificados;
- Quanto à venda dos recicláveis, estes são encaminhados a empresas recicladoras (PET, vidro e papelão) e intermediários/sucateiros (demais recicláveis).

Para uma investigação mais abrangente para a pesquisa, foram procuradas informações que refletissem o papel que outros países submetem para a temática de reciclagem de materiais, de maneira que se verifique o grau de importância atribuído a eles para esta atividade. Portanto, através de dados, ressaltam-se aqueles países desenvolvidos e, também, servem de base para verificar a correlação quanto ao avanço do atual cenário brasileiro. O item a seguir expõe este quadro investigativo/comparativo.

3.5 – QUADRO COMPARATIVO EUROPA X AMÉRICA

3.5.1 – União Europeia

Tabela 3.5: Resíduos Sólidos gerados na União Europeia* em 2009.

Tipo	RSU gerado (kg/ano/hab)	Total RSU tratado (kg/ano/hab)	RSU Tratado (%)			
			Aterro	Incineração	Reciclagem	Compostagem
União Europeia	513	504	38	20	24	18

Fonte: European Commission – European Statistics (EUROSTAT, 2011).

*composta por 27 países (em 2011).

Tabela 3.6: Histórico de preços e volumes de venda de recicláveis na União Europeia (fonte atualizada em julho de 2011)*.

Ano	Produto	Preço Médio (Euro/toneladas)	Volume Vendido (milhões de toneladas)
2009	Papel	87,0	36,5
	Plástico	251,2	6,2
	Vidro	48,0	4,3
2010	Papel	141,9	36,6
	Plástico	292,2	7,2
	Vidro	48,3	4,1

Fonte: European Commission – European Statistics (EUROSTAT, 2011) (adaptado pelo autor).

* A Fonte fornece apenas os dados para os 3 recicláveis expostos: papel, plástico e vidro.

Tabela 3.7: Reciclagem de material per capita (kg/mês/habitante) em 2009 para alguns países pertencentes à União Europeia (fonte atualizada em outubro de 2011).

País/ Produto	Bélgica	Dinamarca	Irlanda	Noruega	Polônia	Reino Unido
Vidro	0,60	0,94	1,97	0,18	0,05	0,49
Plástico	0,74	0,66	1,08	0,65	0,06	0,57
Papel	1,53	4,57	5,61	1,38	0,28	2,67
Metal	0,03	0,22	0,55	0,09	0,11	0,42
Madeira	0,07	0,00	0,03	0,05	0,07	0,00

Fonte: European Commission – European Statistics (EUROSTAT, 2011a e 2011b) (adaptado pelo autor).

3.5.2 – Estados Unidos

Tabela 3.8: Geração e recuperação de recicláveis oriundos de RSU para os Estados Unidos em 2009.

Material	Peso Gerado (milhões de toneladas)	Peso Recuperado (milhões de toneladas)	Recuperação/Geração (%)
Papel e Papelão	68,43	42,50	62,1
Vidro	11,78	3,00	25,5
Metal (todos)	20,91	7,22	34,5
Plástico	29,83	2,12	7,1
Madeira	15,84	2,23	14,1
Total de resíduo sólido municipal	242,96	82,02	33,8

Fonte: United States Environmental Protection Agency – EPA/US (2009).

Tabela 3.9: Geração de resíduos per capita no estado de Washington (EUA) em 2007, 2008 e 2009.

Tipo/Período	2007	2008	2009
RSU (não-reciclável)*	60,96	56,34	51,57
RSU (reciclável)*	46,00	46,00	41,50
Total RSU Gerado*	106,96	102,33	93,08
Todos Resíduos Sólidos (não- reciclável)*	113,76	103,56	85,87
Todos Resíduos Sólidos (reciclável)*	83,82	76,88	82,46
Geração de resíduo (porção reciclável)*	176,63	161,94	150,91
Geração de resíduo (reciclável e não-reciclável)*	197,60	180,44	168,33

Fonte: Washington State Department of Ecology (2011) (adaptado pelo autor).

*Unidade: Kg/mês/habitante

3.5.3 – Brasil

Tabela 3.10: Média mensal sobre recicláveis para algumas cidades do Brasil em 2010.

Cidade (Estado)	Quantidade de recicláveis coletados (tonelada/mês)	População	Index per capita (Kg/mês/habitante)
São Carlos (SP) – Estudo	117	221.950	0,5
São Paulo (SP)	3.100	11.253.503	0,3
Porto Alegre (RS)	2.400	1.409.351	2,0
Londrina (PR)	1.760	506.701	3,5
Rio de Janeiro (RJ)	605	6.320.446	0,1
Campinas (SP)	530	1.080.113	0,5
Santos (SP)	281	419.400	0,7
Ribeirão Preto (SP)	110	604.682	0,2
Itabira (MG)	105	109.783	1,0
Manaus (AM)	95	1.802.014	0,05

Fonte: CEMPRE, 2010a e IGBE, 2010.

Tabela 3.11: Cenário comparativo do mercado de reciclagem entre países desenvolvidos e o Brasil.

Material	Países/Continente	Brasil
Plástico	Europa = 22%	16% (corresponde de 5% a 10% dos RSU's)
Latas de Alumínio	Japão = 86%; EUA = 51%	98% (menos que 1% dos RSU's)
Latas de Aço	Japão = 86%; USA = 60%	47% (10% dos RSU's)
Tetra Pak	Alemanha = 65%; Espanha = 30%	30% (10% dos RSU's)
PET	EUA = 18%	48%
Papelão	EUA = 74%	79%

Fonte: CEMPRE, 2002.

4 - MÉTODO

Em função do objetivo e da proposta deste projeto de pesquisa, são expostas as atividades a serem desenvolvidas para o êxito do trabalho:

4.1 – DEFINIÇÃO DO MODELO QUANTITATIVO PARA A REDE REVERSA

Entre os modelos quantitativos para as cadeias de suprimento de ciclo fechado apresentados, definiu-se o problema de gerenciamento estratégico como modelo a ser aplicado para o estudo. O comportamento deste sistema é analisado através da simulação do modelo baseado nos princípios da metodologia de dinâmica de sistemas.

O motivo para tal escolha é que quase não há problemas relacionados com a estratégia a longo prazo de fluxos reversos sendo estudados na literatura, em âmbito nacional, até o presente momento. Outro ponto fundamental está na aplicação da DS, que pode auxiliar simplesmente o processo de tomada de decisão em sistemas com grande número de variáveis envolvidas.

Além disso, possibilita simular cenários “*what if*”, no qual suporta analisar diferentes resultados manipulando a dependência entre as variáveis e substituindo seus valores, com isso, antecipando-se nas escolhas estratégicas.

Por último e um dos mais importantes diferenciais, esta ferramenta admite incorporar fatores externos que influem, direta ou indiretamente, nos lucros, custos e fluxos da cadeia analisada. Tais fatores incluem, entre outros, a conscientização ambiental da sociedade, as obrigações e penalidades impostas pela legislação. Sabe-se que essas questões podem reproduzir efeitos tanto positivos quanto negativos na organização, dependendo da importância em que são tratadas e levadas em consideração.

4.2 – MODELO GERAL COM A DINÂMICA DE SISTEMAS PARA A CADEIA DE SUPRIMENTO DE CICLO FECHADO

Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) apresentam um sistema geral com a aplicação da DS para um produto qualquer da cadeia de suprimento direta e reversa. Embora tal análise possa diferenciar de um produto para outro, os autores (*op. cit.*) mantêm o modelo proposto o mais genérico possível para facilitar sua implementação sobre diversos casos reais.

O objetivo do trabalho acima citado é estudar o comportamento a longo prazo das cadeias de suprimento reversas com remanufatura e, mais adiante, consiste em propor eficientes expansões nas políticas de planejamento da capacidade de coleta e de remanufatura.

Sabe-se que o planejamento da capacidade é uma questão extremamente complexa, pois cada vez que uma empresa considera a expansão da capacidade, ela deve considerar uma infinidade de possibilidades. Mesmo que após a decisão de expandir a capacidade seja determinada, resta resolver questões fundamentais como ‘quando’, ‘onde’ e ‘quanto’; todos estes através de dois principais objetivos concorrentes no planejamento da capacidade, que são (i) maximização do *market share* (participação ou fatia no mercado) e (ii) maximização da utilização da capacidade.

As políticas de planejamento da capacidade propostas conduzem às decisões que confirmam a viabilidade da expansão da capacidade e respondem as perguntas sobre ‘quando’ e ‘quanto’. O critério de otimização utilizado é o valor presente líquido do lucro total da cadeia de suprimento ao longo do horizonte de planejamento estratégico.

A modelagem primária e a ferramenta de análise utilizada nesta pesquisa incorporam os conceitos da DS, tanto que o trabalho é motivado pela necessidade do desenvolvimento de ferramentas metodológicas que auxiliem o processo de tomada de decisão, de modo a avaliar alternativas a longo prazo das políticas de planejamento da capacidade para atividades de recuperação em cadeias reversas.

Percebe-se que a pesquisa leva em conta não somente questões econômicas, mas também ambientais – como a obrigação de retorno (*take-back obligation*) imposta pela legislação e o efeito de “imagem verde” (*green image effect*) na demanda do cliente. Segundo Georgiadis e Athanasiou (2009), estes dois fatores motivam efetivamente os usuários a inserir novamente seus produtos ao processo reverso, desta forma a expansão da capacidade de coleta acarreta na maximização do lucro total da cadeia de suprimento.

4.2.1 – Definição do Problema em Estudo

Um parâmetro fundamental para a cadeia de suprimento direta é a quantidade de elos desde o fornecedor de matérias-primas até o usuário final. As cadeias de suprimento reversas são mais complicadas, pois os fluxos de retorno podem incluir produtos, partes de produtos (ou peças) e/ou materiais e podem entrar na cadeia de suprimento direta em vários pontos de retorno. As principais operações de um canal reverso são as seguintes atividades: coleta, inspeção/separação, reprocessamento (reuso, reciclagem, reparo, remanufatura), disposição final e redistribuição de produtos usados.

A pesquisa de Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) abrange as seguintes operações distintas, a saber: suprimento, produção, distribuição, uso, coleta (e inspeção), remanufatura e disposição final. A Figura 4.1 apresenta o sistema em estudo.

Segundo Georgiadis e Besiou (2008), alguns dos produtos são exemplos representativos que se adaptam à descrição do modelo acima, a saber: produtos da linha branca (como refrigeradores), pneus, películas protetoras (*insulfilms*), pára-choques, baterias, veículos, areia e resíduos sólidos domiciliares, sendo este último o objeto deste trabalho, como foi dito anteriormente.

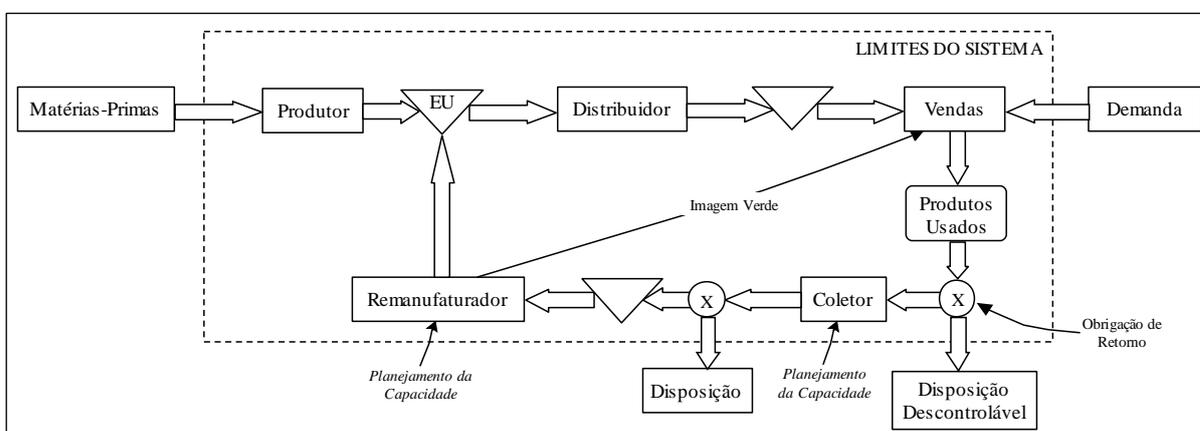


Figura 4.1: Cadeia de Suprimento de Ciclo Fechado em estudo.

Fonte: Vlachos, Georgiadis e Iakovou, 2007, p. 369.

A cadeia de suprimento direta inclui dois elos (produtor e distribuidor). No canal reverso, foi assumido no sistema que a única atividade de reuso é a remanufatura, a qual traz o produto de volta para uma condição 'quase nova', realizando a necessária desmontagem, revisão e operações de substituição.

Especificamente, os produtos acabados são primeiro transferidos ao distribuidor e, em seguida, vendidos para satisfazer a demanda. As vendas dos produtos no final de seus ciclos

de vida transformam-se em produtos usados, que são dispostos descontroladamente ou coletados para reuso. Esses produtos coletados após a inspeção, ou são rejeitados e dispostos controladamente, ou aceitos e transferidos para a remanufatura.

O ciclo ‘fecha’ com a operação de remanufatura de duas maneiras: primeiro, através do fluxo de produtos ‘quase novos’ ao estoque útil (EU na Figura 4.1) e segundo, através do impacto sobre as vendas por via da “imagem verde”. Os dados de entrada das matérias-primas, a demanda total e as ações da legislação (obrigação de retorno) formam o ambiente externo do sistema.

As capacidades de coleta e remanufatura são o ponto principal da pesquisa, em que se verificam eficientes formas de determinar dinamicamente os seus níveis. Essa determinação é bastante simples em uma situação de estado estacionário, entretanto, isso não é o caso do ambiente em estudo, visto que os fluxos dos produtos diretos e reversos podem mudar drasticamente por vários motivos, entre eles: a legislação ambiental pode impor uma obrigação de retorno de uma determinada porcentagem das vendas, ou a demanda esperada pode aumentar ou diminuir progressivamente; em razão do meio ambiente, clientes conscientes decidem favorecer ou não um fornecedor específico por causa da “imagem verde” deste fornecedor.

Nesse sentido, a DS possui a capacidade de capturar efeitos transitórios dos fluxos em uma cadeia de suprimento e, além disso, a ferramenta descreve facilmente os efeitos relacionados às normas legais ou à “imagem verde” da empresa entre os clientes.

4.2.2 – Abordagem Metodológica da Dinâmica de Sistemas

A metodologia da DS, que é adotada na pesquisa, é uma técnica de modelagem e simulação especificamente projetada para problemas dinâmicos de gerenciamento a longo prazo. Esta propõe entender como os processos físicos, os fluxos de informação e a gestão de políticas interagem para então criar a dinâmica das variáveis de interesse.

O objetivo típico de um estudo de DS é compreender como e porque as dinâmicas de interesse são geradas e então procurar por políticas para, em seguida, melhorar o desempenho do sistema.

A DS difere significativamente de métodos de simulação tradicionais, como a simulação de eventos discretos, em que a questão mais importante do modelo é uma simulação emparelhada entre o comportamento do modelo e o comportamento real, ou seja,

uma previsão exata. Pelo contrário, para um modelo de DS é importante reproduzir os principais “padrões dinâmicos” de interesse (como o crescimento exponencial, crescimento assintótico, crescimento em forma de ‘S’ ou oscilações, entre outros).

Portanto, o objetivo do modelo proposto por Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) não seria de prever o lucro total da cadeia de suprimento que teria a cada semana para os próximos anos, mas sim de revelar em que condições e políticas de planejamento da capacidade o lucro total seria maior, quando seria negativo e como ele poderia ser controlado.

4.2.2.1 – Variáveis do Modelo

A estrutura de um modelo de DS contém variáveis de estoque (estado) e fluxo (taxa). As variáveis de estoque são as acumulações (ou seja, estoques) dentro do sistema. Outra forma típica de variáveis de estoque da DS são as variáveis de estoque “suavizadas”. Essas variáveis de estoque são os valores esperados de variáveis específicas obtidas por técnicas de suavização exponencial (por exemplo, a demanda esperada é a previsão da demanda que utiliza suavização exponencial com um fator de suavização específico). As variáveis de fluxo representam os fluxos no sistema (ou seja, taxa de remanufatura), os quais resultam de um processo de tomada de decisão.

4.2.3 – Diagrama de Ciclo Causal

Georgiadis e Vlachos (2004a) expõem que a estrutura de um sistema com a metodologia da DS é descrita pelos diagramas de ciclos causais ou de influência. Esses diagramas representam os principais mecanismos de *feedback* (realimentação), podendo ser ciclos de realimentação negativo (equilíbrio) ou de realimentação positivo (reforço). Para tanto, um ciclo de realimentação negativo exibe o comportamento por *goal-seeking*: após uma perturbação, o sistema busca retornar a uma situação de equilíbrio. Sendo que para um ciclo de realimentação positivo, uma perturbação inicial leva a novas mudanças, sugerindo a presença de um equilíbrio instável.

Os diagramas de ciclo causais desempenham dois papéis importantes nas metodologias da DS. Primeiro, durante o desenvolvimento do modelo, servem como esboços preliminares de hipóteses causais e em segundo lugar, podem simplificar a representação de um modelo (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004a).

O primeiro passo da análise de Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) é captar as relações entre as operações do sistema pela DS e então construir o diagrama de ciclo causal adequado. A representação (vide Figura 4.2) exhibe o diagrama de ciclo causal do sistema em estudo, que incluem as cadeias de suprimento direta e reversa.

Para melhorar a aparência e a distinção entre as variáveis, foi alterado o tipo de letra de acordo com o tipo de variável. Especificamente, as variáveis de estoque são escritas em letras maiúsculas, as variáveis de estoque suavizada em pequeno e itálico e as variáveis de fluxo são escritas em letras pequenas. Essas variáveis podem ser quantitativas, como níveis de estoques e capacidades, ou qualitativa, como mecanismos de falha. As setas representam as relações entre as variáveis. Além disso, a direção das linhas de influência exhibe a direção do efeito. Por fim, o sinal “+” ou “-” nas linhas de influência apresenta o sinal do efeito, ou seja, um sinal “+” prescreve que as variáveis mudam na mesma direção; um sinal “-” prescreve o contrário.

4.2.4 – Formulação Matemática

A próxima etapa da metodologia de DS inclui o desenvolvimento do modelo matemático, geralmente apresentado como um diagrama de estoque-fluxo que capta a estrutura do modelo e as inter-relações entre as variáveis. O diagrama de estoque-fluxo é facilmente traduzido para um sistema de equações diferenciais, que é então resolvido por simulação. Atualmente, programas de simulação gráfica de alto nível (como i-think[®], Powersim[®], Vensim[®] e Stella[®]) suportam este tipo de análise.

O diagrama de estoque-fluxo do modelo sugerido por Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007), que foi desenvolvido usando o *software* Powersim[®] 2.5c, é apresentado na Figura 4.3. O diagrama é construído usando blocos (variáveis) classificados como estoques, fluxos, *delays* (atrasos), conversores e constantes.

As variáveis de estoque (simbolizadas por retângulos) são as variáveis de estado; as variáveis de fluxo (simbolizadas por válvulas) são as taxas de mudança nas variáveis de estoque, quer preenchendo quer retirando essas variáveis. Os *delays* introduzem o tempo de atraso em canais de material ou informação. Em um canal de material a saída de um *delay* é a variável de fluxo. No modelo existem três atrasos de material: ‘Produtos Usados’ como um atraso das ‘Vendas’, ‘Taxa Adição CC’ como um atraso da ‘Taxa Expansão CC’ e ‘Taxa Adição CR’ como um atraso da ‘Taxa Expansão CR’.

Em um canal de informação a saída de um *delay* é uma variável de estoque. Tais variáveis de estoque com atraso de informação são as variáveis de estoque suavizadas. No Powersim[®] 2.5c tanto a saída de atraso de material e informação são representadas pelo mesmo símbolo (um retângulo dentro de um círculo). Embora os *delays* existam em todos os fluxos de produtos, somente os mais significativos (comparado com o intervalo da simulação) estão incluídos no modelo.

Os conversores (representados por círculos) são variáveis intermediárias utilizadas para cálculos auxiliares. As constantes (representadas por losangos) são os parâmetros do modelo. Por fim, os conectores, representados por setas simples, são os *links* de informação representando as causas e efeitos na estrutura do modelo, enquanto que as setas com linha dupla representam os fluxos dos produtos. As linhas duplas que cruzam as setas indicam um fluxo atrasado de informação ou de material.

O diagrama de estoque-fluxo é uma representação gráfica do modelo matemático. As equações matemáticas incorporadas são divididas em duas principais categorias: as equações de estoque, que definem as acumulações dentro do sistema através de equações integrais de tempo das taxas de fluxo e; as equações de taxa, que definem os fluxos entre os estoques como funções de tempo.

Finalmente, a Figura 4.4 exibe o diagrama de estoque-fluxo da Figura 4.3 incorporando os parâmetros de receita/custos. Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007) decidem não expor a estrutura de receita/custos nas Figuras 4.2 e 4.3 pelo simples fato dessas permanecerem legíveis. Apenas para salientar ao leitor da complexidade do modelo e da totalidade de variáveis desenvolvidas para o sistema, é apresentada a Figura 4.4.

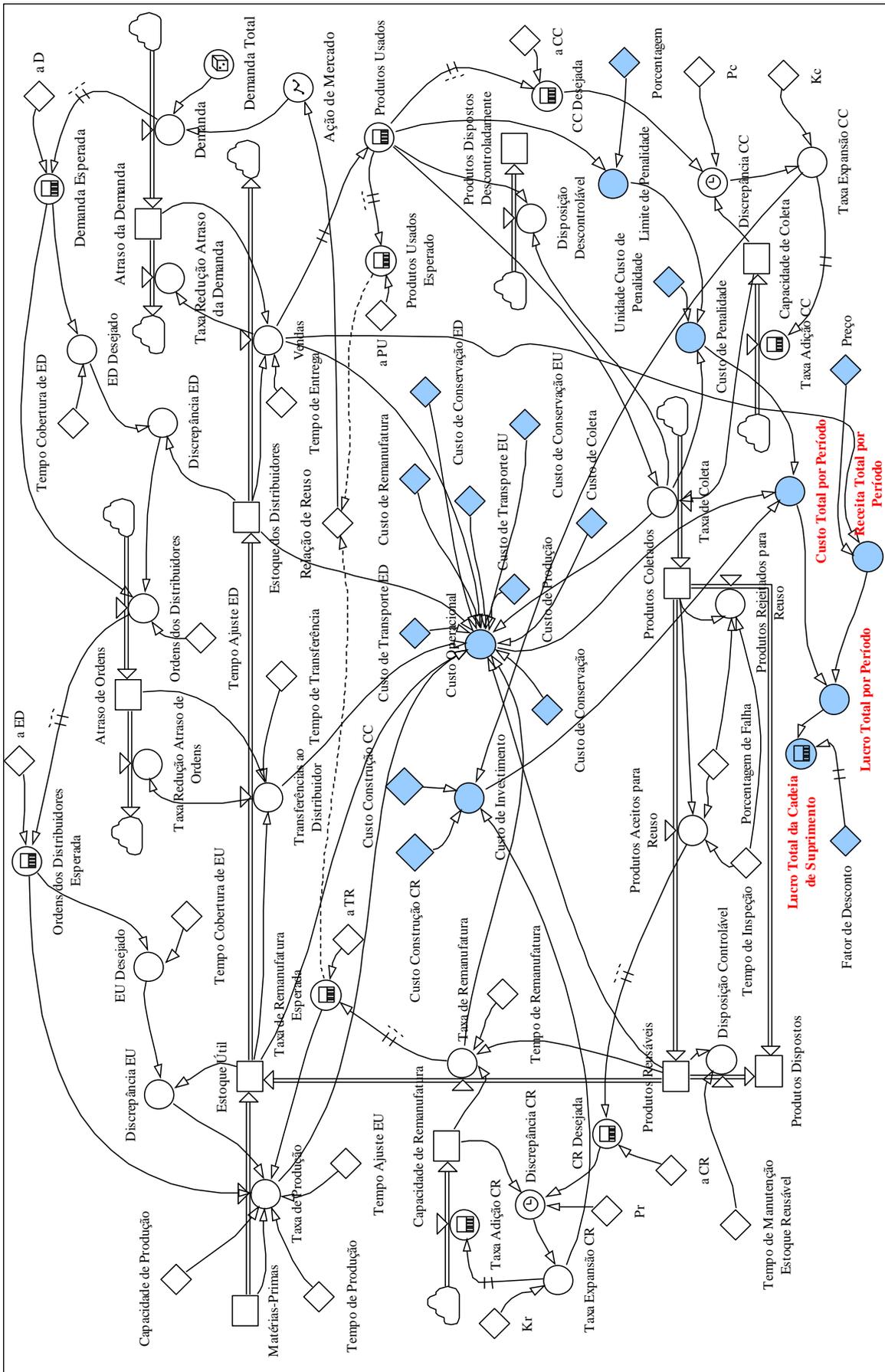


Figura 4.4: Diagrama de estoque-fluxo com parâmetros de receita/custos.
 Fonte: Vlachos, Georgiadis e Iakovou, 2007, p. 378 (adaptado pelo autor).

Para uma maior simplificação dos diagramas apresentados, é formulado um fluxograma das principais atividades que compõem o modelo geral exposto acima. Sendo assim, a Figura 4.5 traduz este fluxograma pelos diagramas das Figuras 4.2 a 4.4, sendo que esta possui similaridades com a Figura 4.1.

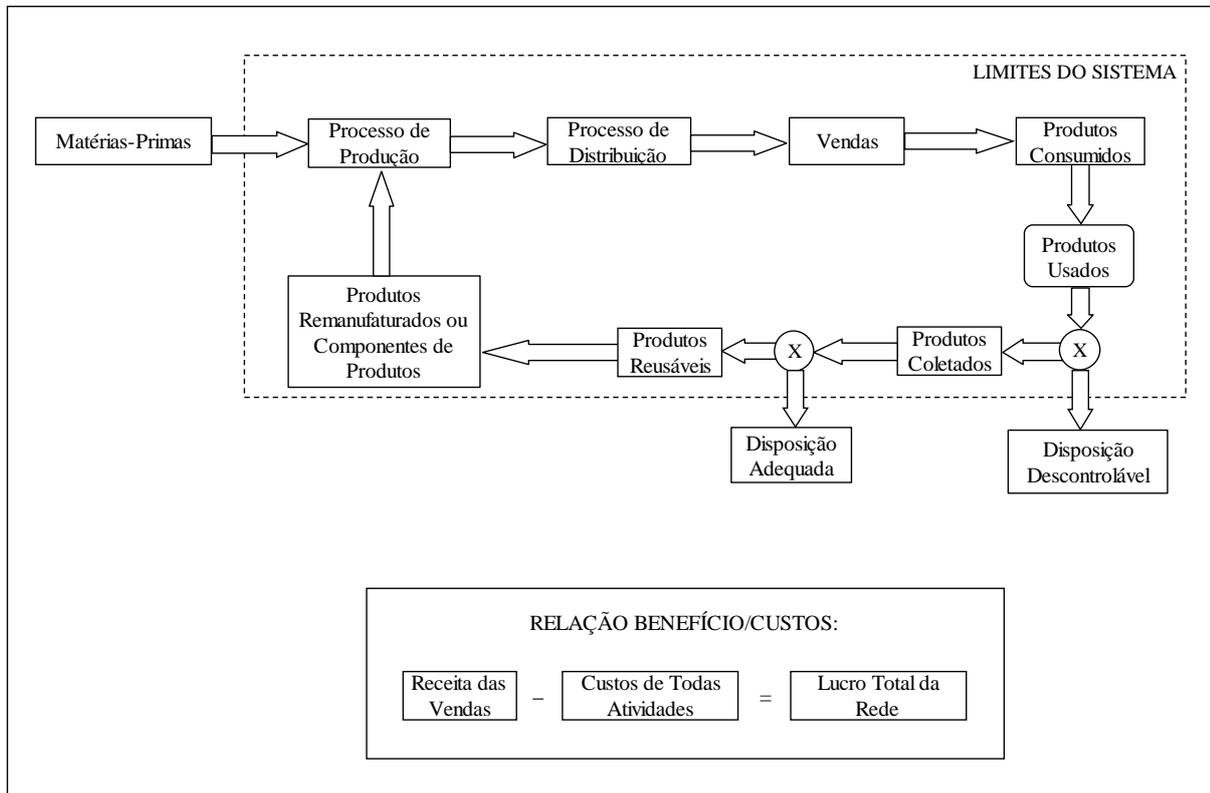


Figura 4.5: Resumo do fluxograma do modelo com as atividades principais mais os parâmetros de receita/custos.

4.3 – VALIDAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MODELO GERAL

Após o estudo do modelo geral exposto por Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007), inicialmente desenhou-se o mesmo sistema com o *software* Vensim[®] PLE (Personal Learning Edition), que é uma versão gratuita da empresa Ventana Systems, destinado para uso exclusivo pessoal e na educação. Em seguida, o modelo foi simulado e, com isso, foram apresentados alguns erros os quais não se pôde fazer qualquer comparação dos resultados encontrados com os obtidos pelo modelo inicial. Sabe-se que nesses tipos de simulação o sistema não gera resultados até solucionar todos os problemas acusados pelo programa.

A explicação para tal evidência se deve possivelmente pela utilização de um programa gratuito, sendo que este não apresenta todas as ferramentas de uma versão profissional. Outra possibilidade é de que o programa não suporta as equações que geraram erros, por exemplo,

quando a equação do modelo exige três parâmetros em sua composição, o Vensim[®] PLE somente aceita dois destes parâmetros.

Por esta razão, optou-se por utilizar diretamente o mesmo programa empregado pelo modelo proposto, que é o *software* Powersim[®] 2.5c. No caso desta pesquisa, a versão utilizada desse programa foi o Powersim[®] Studio 8 Academic, obtido por licença paga pela Powersim Software AS.

Com isso, o modelo inicial foi novamente desenhado e simulado através do programa acima citado e, diante disso, constatou-se que o *software* apresenta ampla diversidade de funções, entre elas o *layout* para apresentação da estrutura do modelo e ampla quantidade de equações oferecidas e comandos do sistema.

Ademais, o aspecto fundamental verificado é que o modelo descrito não demonstrou qualquer problema – o cerne do sistema, que são as equações e unidades dos parâmetros para as variáveis de estoque e fluxo e as constantes, sendo que não acusaram erros quando inseridas. Portanto, foi possível comparar os resultados gerados pelo modelo com aqueles expostos no trabalho de Vlachos, Georgiadis e Iakovou (2007), sendo que apresentaram resultados próximos.

Enfim, o modelo sugerido torna-se aceitavelmente eficaz para, em seguida, realizar as adaptações necessárias de acordo com o objeto estudado na pesquisa – o programa municipal de coleta seletiva de São Carlos.

4.4 – DESENVOLVIMENTO DO MODELO ESPECÍFICO PARA A PESQUISA

Primeiramente pôde-se aprofundar ainda mais sobre a ferramenta utilizada, que é a DS, para a aplicação do modelo em questão ao programa municipal de coleta seletiva de São Carlos. Desde então, de posse deste conhecimento aprendido, aliados ao levantamento da caracterização do programa em estudo (vide Capítulo 3) – principalmente seu fluxograma – foram realizadas as adaptações necessários para moldar os aspectos previamente descritos sobre o modelo geral para se chegar ao modelo específico da pesquisa.

Vale ressaltar que o modelo geral apresenta a cadeia de suprimento de ciclo fechado, ou seja, com as redes diretas e reversas integradas. Por isso, para os anseios da pesquisa, que trata somente de uma rede de reciclagem, esta fica condicionada a utilizar apenas a rede reversa para o desenvolvimento do sistema específico.

Assim sendo, seguindo a metodologia exposta pelo modelo geral, inicialmente foram elaborados os diagramas de ciclo causais da rede de reciclagem em estudo. O crescimento da população e dos trabalhadores são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente.

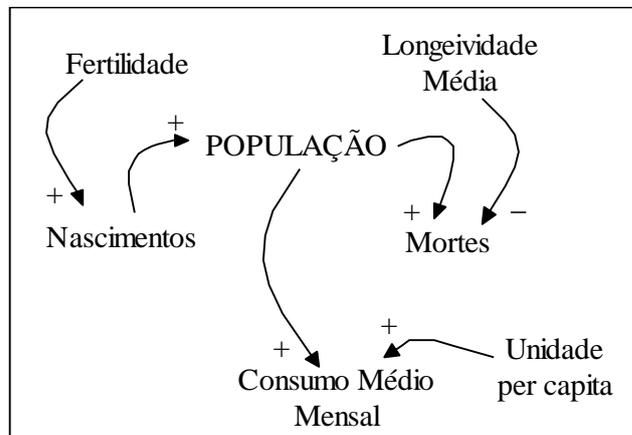


Figura 4.6: Diagrama do ciclo causal do crescimento do consumo de recicláveis.

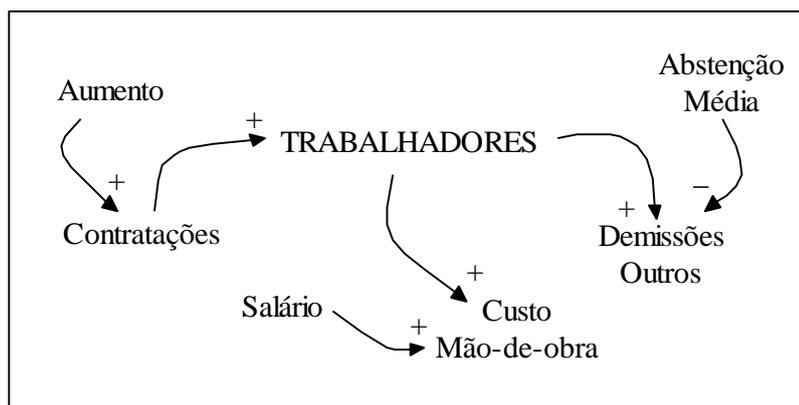


Figura 4.7: Diagrama do ciclo causal do crescimento dos trabalhadores.

Em seguida, foram realizadas adaptações de acordo com o objeto da pesquisa. Um dos cenários que merecem destaque para sua análise se deve ao fato da existência de leis ambientais que obrigam as partes envolvidas em retornar seu produto de maneira adequada na cadeia – fato este explicado no Capítulo 2 – pois é um dos fatores direcionadores para atender a implantação de uma logística reversa nos padrões sustentáveis atuais.

Dessa forma, com a perspectiva da legislação ambiental vigente, mais especificamente, da aprovação da sempre discutida gestão da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (2010) (Lei N° 12.305, promulgada em 02 de agosto de 2010), alguns termos voltados para a gestão integrada dos RSU's, no que diz respeito àqueles recicláveis, são contemplados.

Por isso, foram agregados os termos da referida lei no modelo a fim de analisar seu comportamento com vertentes atuais e que projetarão o cenário futuramente. De acordo com esta lei, o que pôde ser extraído para os propósitos da pesquisa são, a partir do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

- Diagnóstico da situação dos resíduos sólidos gerados no respectivo território, contendo a origem, o volume, a caracterização dos resíduos e as formas de destinação e disposição final adotadas;
- Programas e ações de educação ambiental que promovam a não geração, a redução, a reutilização e a reciclagem de resíduos sólidos;
- Programas e ações para a participação dos grupos interessados, em especial, das cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda, se houver;
- Mecanismos para a criação de fontes de negócios, emprego e renda, mediante a valorização dos resíduos sólidos;
- Metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada.

Além da responsabilidade dos geradores para com os RSD's não recicláveis, que consiste no seu acondicionamento adequado para a coleta, sempre que for estabelecido um sistema de coleta seletiva pelo plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos, estes consumidores são obrigados a disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta.

Por fim, o poder público municipal pode instituir incentivos econômicos aos consumidores que participam do sistema de coleta seletiva, na forma de lei municipal. A elaboração do plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos entrará em vigor dois anos após a data de publicação da Lei da PNRS de 2010.

Além disso, a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos – observando a seguinte ordem de prioridades: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos – deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação da Lei da PNRS de 2010.

4.4.1 – Cenários da Legislação Ambiental

Para tornar mais claro o ciclo exposto na Figura 4.8, o “Index Final” é a variável que resume todo o conhecimento inserido, da seguinte maneira:

$$\text{Index Final} = \text{Index 1} * \text{Index 2} \quad (1)$$

Sendo que:

$$\text{Index 1} = \frac{\text{Taxa Coleta Média}}{\text{Consumo Médio}} \quad (2)$$

$$\text{Index 2} = \frac{\text{Vendas}}{\text{Taxa Coleta Média}} \quad (3)$$

A equação (3) traduz o comportamento da reciclagem, ou seja, verifica a proporção de materiais vendidos em relação àqueles coletados. O objetivo é de que a quantidade de ambos sejam equiparados para o “index” tender a 1, presumindo que todos aqueles coletados são posteriormente vendidos. Porém, na prática, fatores como a porcentagem de produtos aceitos para reuso após realizada a triagem dos materiais coletados, além da falta de compradores, ocasionam na minimização deste index. Portanto, o objetivo é potencializar o sistema para que esta relação contribua com a inserção dos produtos na rede de reciclagem e, conseqüentemente, atender as obrigações impostas pela legislação.

A equação (2) traduz a pressão da legislação, em que o objetivo é de que a “Taxa de Coleta Média” seja igual ao “Consumo Médio”, ou seja, que todos os materiais consumidos (aqueles recicláveis) sejam coletados e introduzidos na rede de reciclagem. Dessa maneira materiais com potencial de reutilização dispostos descontroladamente passarão para disposições finais adequadas, ou até mesmo não adequadas.

Para entender este raciocínio, as pressões legais surgem como meio compulsório para os cidadãos separarem o resíduo reciclável do não reciclável, penalizando-os quando seus hábitos não conduzirem ao índice per capita de materiais gerados, sendo que boa parte destes possuem atratividade para o mercado. Daí surge o apelo legal como agente compulsório de educador ambiental e intensificador visando maximizar a quantidade de material coletado.

Em seguida, o “Index Final” desenvolve a seguinte relação:

- Quando “Index Final” = 0, então: “Porcentagem Esperada” = 0, ou;
- Quando “Index Final” = 1, então: “Porcentagem Esperada” = 1.

Isto significa que, quando a “Porcentagem Esperada” for igual a zero (estado péssimo), todos os produtos consumidos irão para a disposição descontrolável (nesta pesquisa ela é considerada nesta nomenclatura mesmo que haja o tratamento destes resíduos em direção aos aterros sanitários controlados, porém, para os anseios da pesquisa é descrita como meio adverso, pois não atende à reintrodução dos materiais na rede reversa).

Ao contrário, quando a “Porcentagem Esperada” for igual a 1 (estado ótimo), todos os produtos consumidos são separados pelos cidadãos e posteriormente coletados (todos na medida do possível sujeitos às restrições de capacidades), sendo inseridos na cadeia. Isto significa que nenhum material será desperdiçado sendo disposto inadequadamente.

Além de exemplificar a relação “Index Final” e “Porcentagem Esperada” por meios gráficos, a Figura 4.9 expõe a análise de cenários para o modelo, quer sendo um cenário normal, otimista ou pessimista.

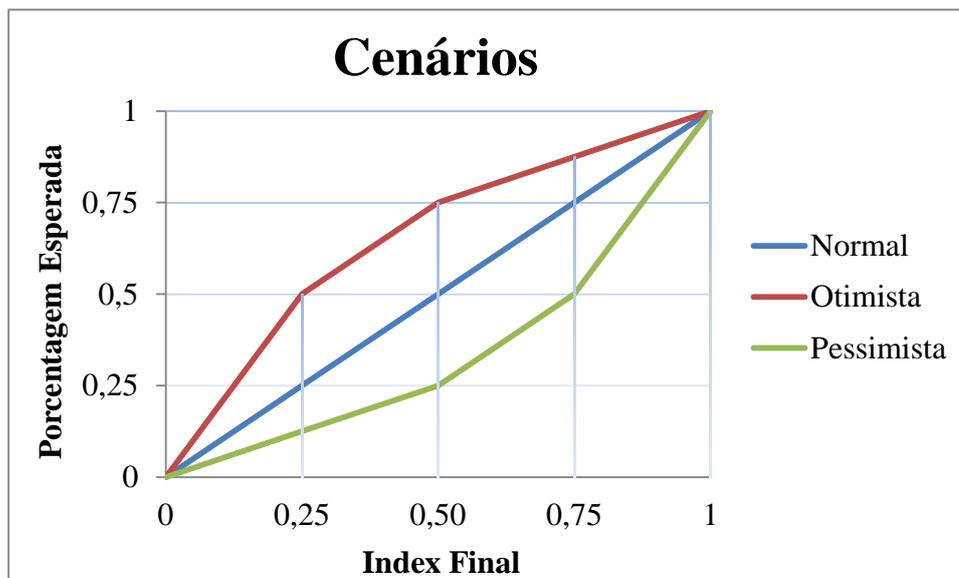


Figura 4.9: Análise de cenários para o modelo.

Estes cenários refletem o atual estado do sistema quanto ao seu desempenho na quantidade de material coletado. Por isso, os cenários são tem as seguintes características:

- Normal: é o estado padrão de desempenho, ou seja, como a rede de reciclagem atual normalmente sem fatores externos ao sistema, porém constituindo de um programa municipal de gerenciamento dos resíduos recicláveis;
- Otimista: é o estado de desempenho em que o fator externo, no caso a PNRS de 2010 obriga a separação dos resíduos a partir da fonte geradora, no caso os

Na Figura 4.12 algumas variáveis merecem ser especificadas, como aquelas que utilizam do *delay* em suas equações, a saber: a “Taxa Coleta Média” e “Consumo Médio” que produzem o atraso de informação (*delay information*) e; “Produtos Consumidos após atraso” e “Porcentagem Atual” que produzem o atraso de material (*delay material*). Ambos os conceitos de *delay* são aplicados de acordo com Sterman (2000) e simbolizados na figura por um retângulo dentro de um círculo.

Ademais, a variável “Porcentagem Esperada”, simbolizada na Figura 4.12 por um gráfico dentro de um círculo, representa os três tipos de cenários (otimista, normal e pessimista) explicados anteriormente, projetada pela Figura 4.9 neste específico conversor.

Após a etapa de triagem dos produtos coletados (vide Figura 4.12), esses são separados por categorias (tipos). De modo a validar o modelo na maneira mais real possível, em vez de homogeneizar os produtos, ou seja, considerando-os apenas uma miscelânea total, foram separados de acordo com as categorias mencionadas no Capítulo 3 – papel, plástico, vidro, metal, tetra pak, PET, alumínio e outros. O *software* possui a versatilidade de definir uma variável em quantas categorias forem necessárias sem perder o aspecto de legibilidade, ou acrescentando um modelo para cada categoria e formando vários modelos em conjunto, porém representando o mesmo sistema. É o caso do comando *array* (camada), simbolizado na Figura 4.12 por dois círculos ou dois quadrados, representando que aí há mais de um produto, no caso da pesquisa, 8 categorias.

Por fim, a Figura 4.13 apresenta o diagrama de estoque-fluxo para o programa de receita/custos da rede de reciclagem em estudo, partindo do conhecimento aplicado pelo diagrama de ciclo causal da Figura 4.11.

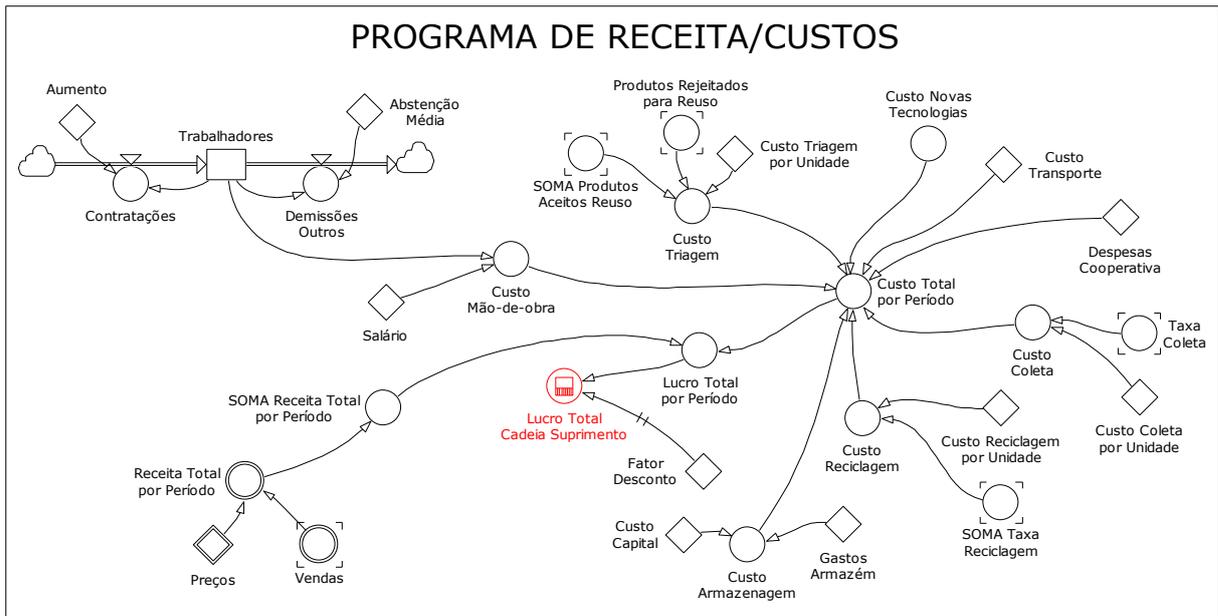


Figura 4.13: Diagrama de estoque-fluxo para o programa de receita/custos da rede de reciclagem em estudo.

4.4.4 – Validação e Simulação da Rede de Reciclagem em Estudo

De posse dos diagramas de estoque-fluxo definidos (Figuras 4.12 e 4.13), o próximo passo consistiu na validação do modelo. Este processo verificou se o sistema não apresenta problemas quanto a erros, seja por equações mal definidas, sinais trocados e/ou conectores que liga em variáveis erroneamente ou desnecessárias.

Para esta verificação, o sistema foi simulado com valores quaisquer, por intermédio de uma análise de sensibilidade, em que foram inseridos tanto valores tendendo a zero (ou zero) quanto valores ao extremo, sendo absurdamente grandes. Assim, o intuito é verificar o comportamento do sistema e realizar as adaptações necessárias de modo a deixar o modelo validado e condizente com o resultado esperado antes mesmo de simulá-lo.

4.4.5 – Parametrização do Modelo da Rede de Reciclagem em Estudo

Atingida a etapa prévia de validação do modelo com o comportamento do sistema atendendo ao planejado pela pesquisa, o próximo passo consistiu na parametrização do modelo, que nada mais é que padronizar o modelo deixando-o próximo da realidade. Este método consiste em utilizar os valores reais, além de adaptá-los com outros valores para conseguir o comportamento do sistema na prática.

A Figura 4.14 apresenta o diagrama de estoque-fluxo próprio para tal parametrização. As variáveis que serão padronizadas estão destacadas pelas cores verdes e laranjas. Aquelas

com a cor verde estão sujeitas a qualquer valor; para as cores laranja, estas podem ser tanto o valor na prática quanto um valor padronizado, dependendo do melhor resultado a ser alcançado com o objetivo de buscar o estado ótimo do sistema.

Em relação à cor vermelha – representada pelo estoque de “Material Coletado” (vide Figura 4.14) – esta serve de análise entre o material coletado pelo levantamento de dados do programa de coleta seletiva (ver Capítulo 3, Tabela 3.2) comparado com o resultado obtido por simulação através da parametrização das variáveis. Além de ser este o motivo de inserir este estoque na Figura 4.14 (que nada mais é que a Figura 4.12 acrescido deste estoque), outro ponto importante é que os dados reais são fornecidos anualmente pela Tabela 3.2 e o modelo desenvolvido, com o tempo em meses. Assim, a função da “Taxa_2” é de acumular os valores mensais e poder realizar a comparação homogênea com os valores anuais na prática.

Concomitantemente à parametrização da Figura 4.14, é realizada a parametrização do programa de receita/custos, exposto pelo diagrama de estoque-fluxo na Figura 4.15, em que é seguido o mesmo raciocínio para a caracterização das cores verde e laranja.

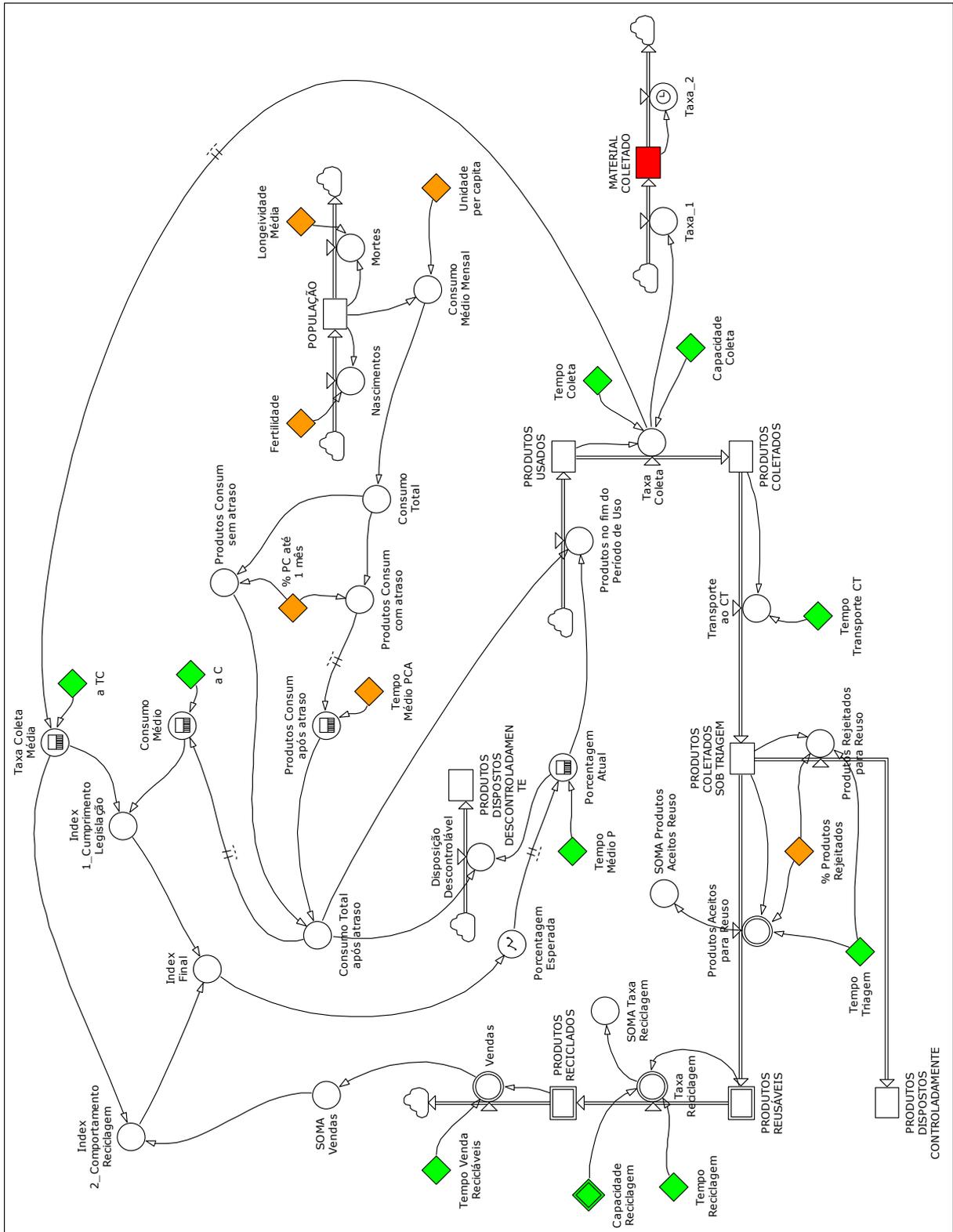


Figura 4.14: Diagrama de estoque-fluxo para a parametrização do modelo em estudo.

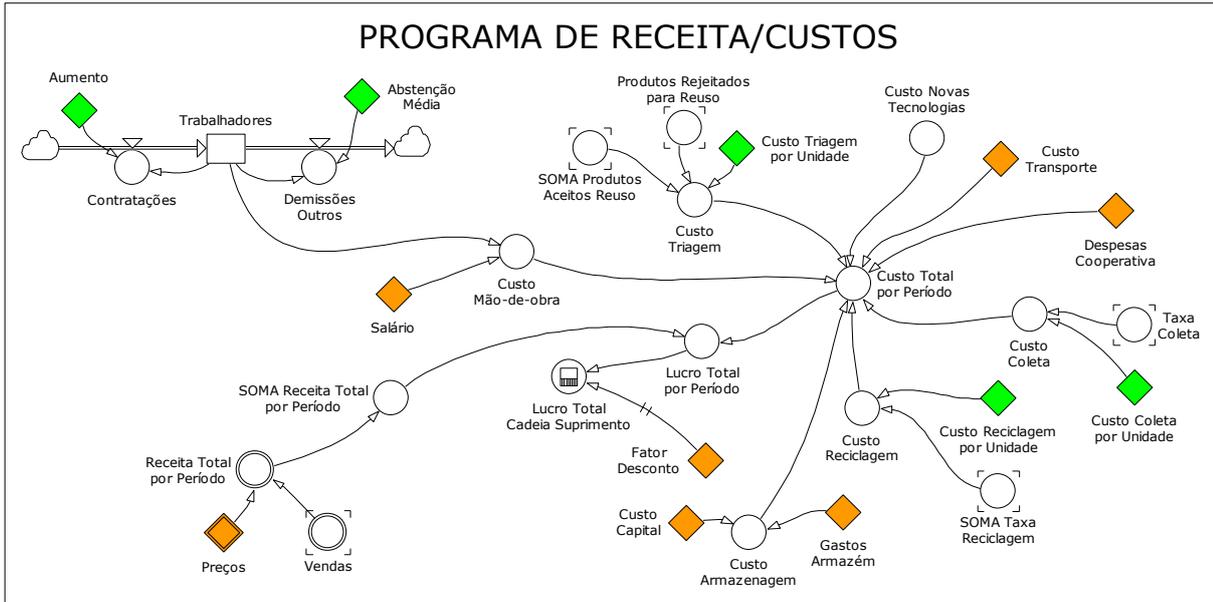


Figura 4.15: Diagrama de estoque-fluxo para a parametrização do programa de receita/custos em estudo.

Para auxiliar este procedimento de parametrização do modelo em estudo, foi utilizado o conceito da ‘Minimização dos Erros Quadrados’, com o intuito de encontrar os valores satisfatórios das variáveis para o modelo se aproximar da realidade. Vale ressaltar que em qualquer livro de Cálculo Numérico o ‘Método dos Mínimos Quadrados’ é explorado, como, por exemplo, em Aguirre (2007), sendo o mesmo recomendado como incentivo de aprofundamento sobre o assunto caso seja necessário. Por tudo isso, este método é aplicado na pesquisa da seguinte maneira:

Tabela 4.1: Exemplo para o método de minimização dos erros quadrados.

Parâmetros	Tempo Coleta		Fertilidade			
	Faixa Parâmetros	0,5	1	0,2	0,4	0,8
Tempo Coleta	0,5			A	C	E
	1			G	I	K
Fertilidade	0,2	B	D			
	0,4	F	H			
	0,8	J	L			

Primeiramente, formula-se a Tabela 4.1, de acordo com as variáveis que se quer parametrizar, independente da variável ser conhecida na prática ou não. De início se insere

poucas variáveis e vai aumentando a iteração gradativamente, abrangendo o maior número de parâmetros possíveis. A título de exemplo, foram inseridos apenas dois parâmetros, sendo aqueles que estão no processo de parametrização.

Em seguida, define-se a faixa de parâmetros; quanto maior a variação, mais preciso serão os valores e menor o erro calculado. A título do exemplo, para as duas variáveis (uma com duas variações e a outra com três), retirando aquelas repetitivas, a quantidade de combinações é igual a 12.

O cálculo segue conforme a equação (4), em que se utiliza um horizonte de 60 meses (cinco anos – de 2006 a 2010) com os dados do material coletado da Tabela 3.2, produzindo o resultado para comparação:

$$\begin{aligned}
 & \sqrt{(\text{Material Coletado em 2006 por simulação} - \text{Material Coletado em 2006 real})^2} + \\
 & \sqrt{(\text{Material Coletado em 2007 por simulação} - \text{Material Coletado em 2007 real})^2} + \\
 & \sqrt{(\text{Material Coletado em 2008 por simulação} - \text{Material Coletado em 2008 real})^2} + \\
 & \sqrt{(\text{Material Coletado em 2009 por simulação} - \text{Material Coletado em 2009 real})^2} + \\
 & \sqrt{(\text{Material Coletado em 2010 por simulação} - \text{Material Coletado em 2010 real})^2} + \\
 & = \mathbf{A} \text{ (valor obtido para a Tabela 4.1)} \tag{4}
 \end{aligned}$$

Ao final, adota-se o seguinte termo para os erros obtidos (vide Tabela 4.1):

- Se $\mathbf{A} < \mathbf{B}$, então se mantem os valores de \mathbf{A} , senão, se mantem os valores de \mathbf{B} ; em seguida:
- Se $\mathbf{A} > \mathbf{C}$, então se mantem o valor de \mathbf{C} e assim sucessivamente até encontrar o menor erro entre os parâmetros.

O modelo em estudo consiste de vários parâmetros operacionais que merecem ser padronizados. Por isso, o processo de minimização dos erros quadrados resultou em várias combinações e, após um longo processo, conseguiu-se determinar os valores para as variáveis destacadas nas Figuras 4.14 e 4.15, obtendo os menores erros possíveis.

Deve-se ressaltar que se buscou o resultado mais próximo de zero (sendo este valor a meta para o estado ótimo), em que quando os resultados não convergiam tanto, adotava-se este valor por não apresentar grandes mudanças em relação aos demais.

Ainda, vale lembrar que os cenários não entraram na parametrização da Figura 4.14 por não apresentarem, até o momento, função para isso. Além do que, fica mais clara (legível) e mais prática a análise da minimização dos erros quadrados sem adicionar os cenários, assunto este que será descrito no item a seguir.

4.4.6 – Diagrama de Estoque-Fluxo com Cenários

A partir da Figura 4.12 foram inseridos os cenários definidos para a análise da rede de reciclagem em estudo. O desenvolvimento destes cenários, além de suas interdependências entre as variáveis foram contextualizados de acordo com Sterman (2000), que apresenta uma ampla discussão acerca do assunto.

Assim sendo, a Figura 4.16 apresenta o diagrama de estoque-fluxo com cenários do modelo, agregado aos valores previamente definidos por parametrização, pronto para realizar a obtenção de dados por simulação.

Em relação aos dados operacionais, cabe saber que o horizonte de planejamento para a análise em geral é contado a partir de dezembro de 2010 (último dado levantado para o programa de reciclagem a partir da Tabela 3.2), com 60 meses de duração, ou seja, cinco anos, que se iniciou-se em janeiro de 2011 e termina em dezembro de 2015. Este tempo será o considerado para tomadas de decisão a longo prazo, com a análise de diferentes cenários e, assim, propor novas mudanças para o desenvolvimento das atividades do programa em estudo. De acordo com discussões sobre qual vertente assumir, foi considerado o horizonte de cinco anos, pois podem ocorrer mudanças (tecnológicas e operacionais) em tempos mais prolongados e, para esses tempos, por exemplo 10 anos, ficaria muito extenso o planejamento.

Em relação aos tipos de análises (quer por cenários, quer por sensibilidade), foi proposta uma matriz que servirá de simplificação conforme a ordem de prioridades, além de resumir e relacionar todas as variáveis do modelo. Por isso, a Tabela 4.2 apresentada a seguir é adotada como base para o prosseguimento das análises dos resultados, que fazem parte do próximo capítulo.

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com a metodologia apresentada no capítulo 4, a maneira adotada para se analisar o comportamento do sistema foi de observar a quantidade de material coletada ao longo dos anos e, concomitantemente, revelar em que condições o lucro total seria maior, quando seria negativo e como este poderia ser controlado. Dependendo da performance, uma projeção permite aos tomadores de decisão se anteciparem aos problemas que possam surgir e, assim, adotar políticas que maximizem as atividades revertendo quadros adversos.

Lembra-se que o horizonte de planejamento é de cinco anos – de 2011 a 2015 – e que os estoques do início deste horizonte são aqueles dados referentes ao último mês de 2010. Ademais, o lucro total da cadeia de suprimento é calculado pela fórmula matemático-financeira do Valor Presente Líquido (VPL ou *Net Present Value*), sujeito à incidência de uma taxa de desconto (ou taxa de juros). Esta metodologia é facilmente encontrada em *sites* de busca, além de ser explorada em qualquer livro relacionado à Matemática Financeira. Como não cabe nesta pesquisa uma descrição detalhada do conceito, Hoji (1999) é recomendado como incentivo para o aprofundamento sobre o assunto.

Para contribuir com os anseios traçados pelo contrato firmado prefeitura-cooperativa, que consiste no aumento progressivo da quantidade de material coletado, cuja meta é de atingir 250 toneladas/mês em 2013 (vide Tabela 3.4), o objetivo desta análise é de contribuir para a organização atingir este compromisso. Mesmo não havendo fundamentação em como se chegaram aos valores definidos na tabela acima, o princípio é de se seguir o mesmo pensamento, porém sem que haja qualquer interferência nos resultados do modelo em sua situação normal de funcionamento.

5.2 – CENÁRIOS

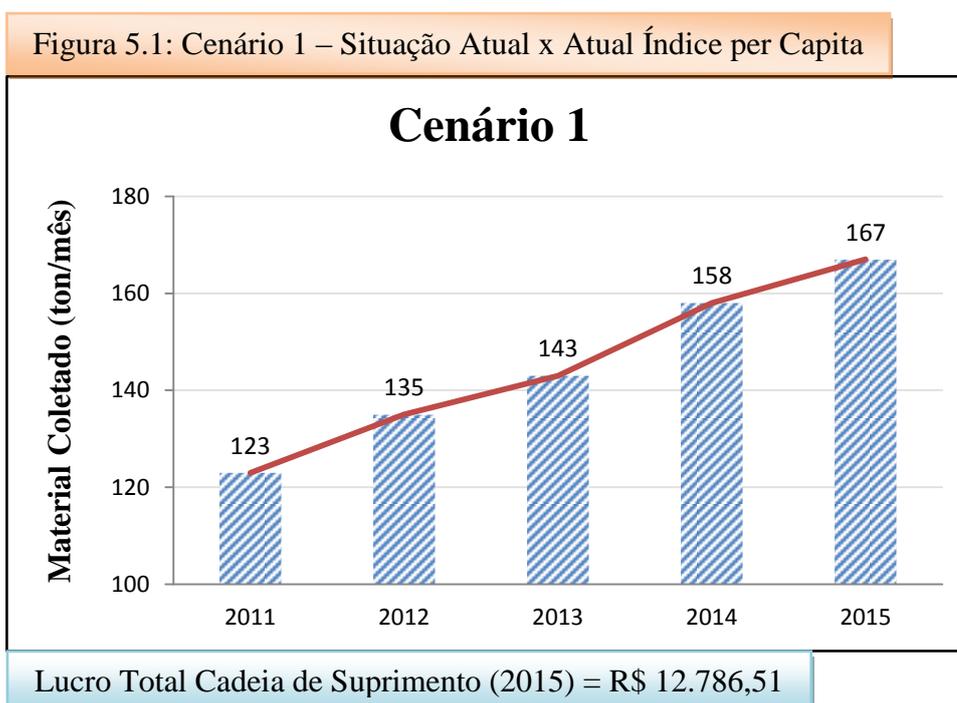
Em se tratando dos cenários a serem avaliados, devido aos inúmeros casos que possivelmente são indicados para análise e conforme a classificação das prioridades definidas na Tabela 4.2, visando não produzir uma extensa e massiva análise, foram escolhidos aqueles cenários que apresentam maior enfoque quanto à temática atual e variáveis que possivelmente possuam grande influência nos resultados e diferenciação para se extrair proveitosas comparações e conclusões.

Assim sendo, a análise dos resultados é apresentada logo a seguir, com a indicação dos cenários, a saber:

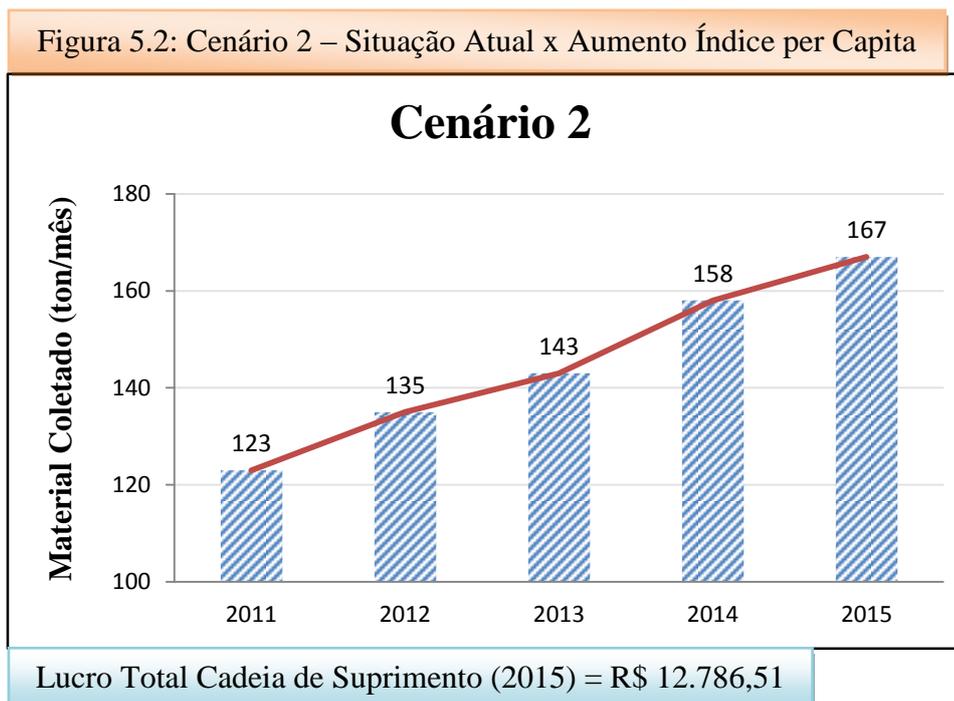
5.2.1 – Cenários da Legislação Ambiental x Índice per Capita

Os cenários da legislação ambiental são a situação normal, otimista e pessimista. Quanto ao índice per capita, sua sensibilidade depende para casos de aumento, redução ou uma situação normal. Por isso, a combinação destes elementos é transmitida conforme as figuras apresentadas, sendo em seguida realizadas algumas considerações para cada cenário.

Até certo momento o programa é insuficiente para manter suas atividades, porém, à medida que a quantidade coletada se torna mais expressiva, o sistema começa a ter lucro e produz ao final da simulação um saldo positivo satisfatório de R\$ 12.786,51. A Figura 5.1 expõe estes comentários.

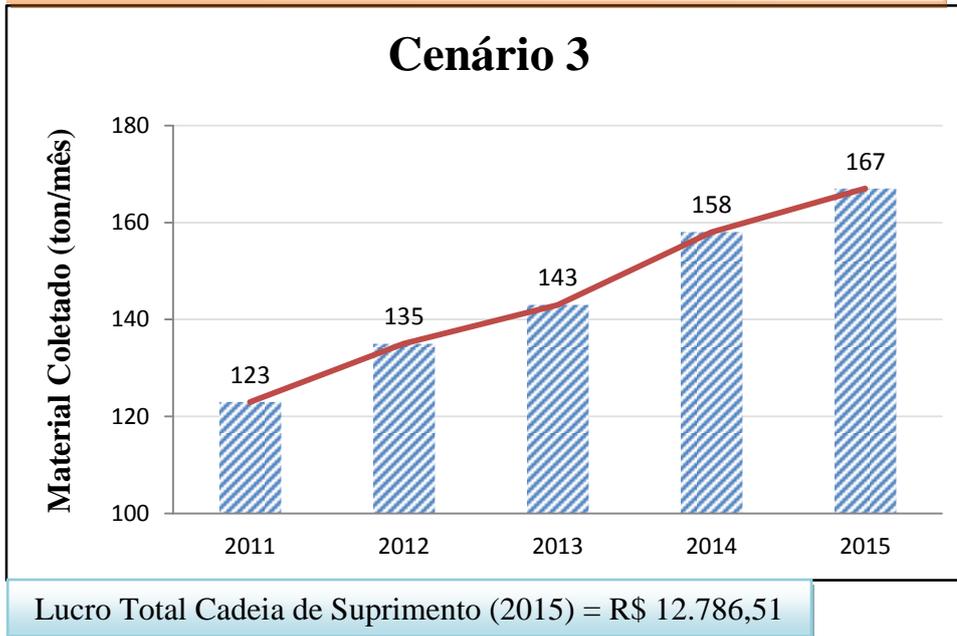


O aumento do índice per capita pode ocorrer devido ao crescimento da população ou também pelo fato da população consumir mais produtos recicláveis. Em relação ao Cenário 2, independente do aumento do índice per capita, mais produtos que tem potencial de reciclagem são dispostos descontroladamente pelos munícipes como rejeitos aos aterros sanitários. Por isso, conforme a Figura 5.2, o resultado é o mesmo do Cenário 1 pois este aumento dos produtos consumidos não interfere no fluxo reverso da cadeia de reciclagem.



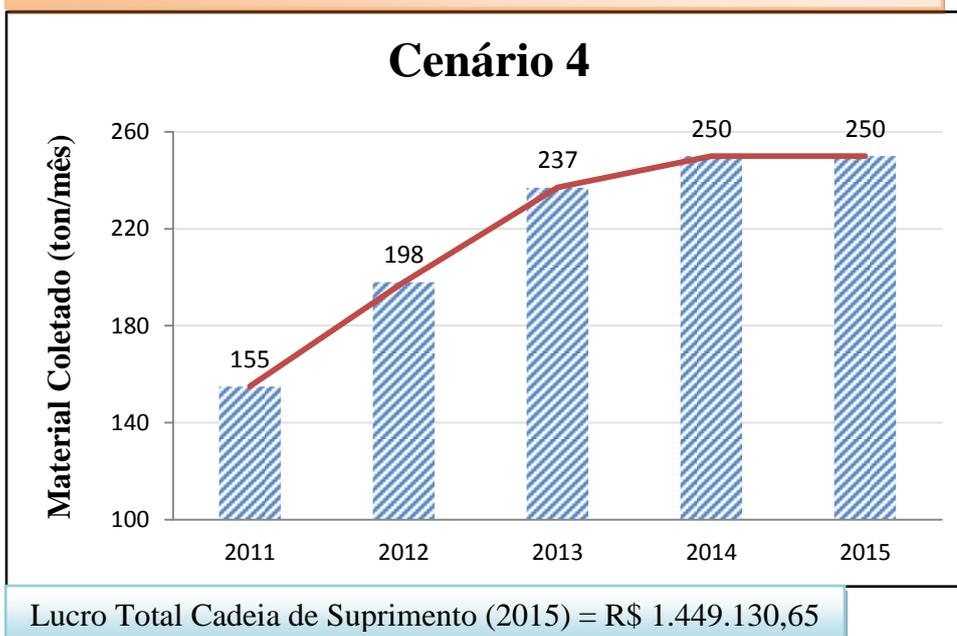
A redução do índice per capita pode ocorrer devido ao caso de uma cidade com população reduzida e mesmos preceitos da organização em estudo, ou também caso a população reduza seu consumo de produtos recicláveis, o que seria muito difícil de ocorrer. Em relação ao Cenário 3, mesmo que haja a redução deste parâmetro, não há qualquer alteração no cenário em relação aos Cenários 1 e 2. O que se torna relevante neste caso (vide Figura 5.3) é que a quantidade de produtos recicláveis dispostos como rejeitos é reduzida comparada aos cenários anteriores.

Figura 5.3: Cenário 3 – Situação Atual x Redução Índice per Capita



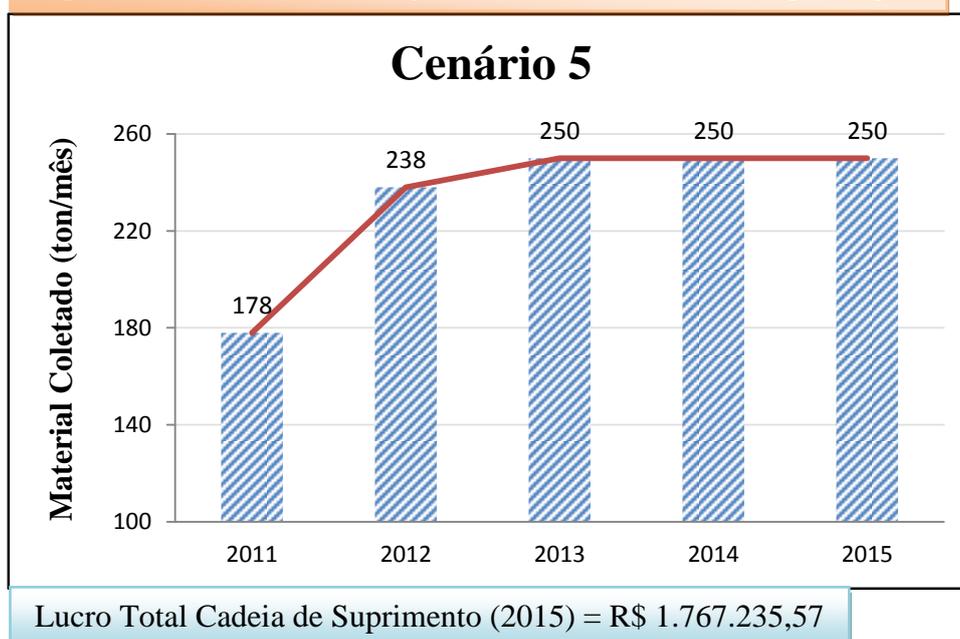
Para o Cenário 4, no início o sistema é insatisfatório, porém em poucos meses de atividades este se torna atrativo e segue acumulando até o final e produzindo o lucro da cadeia apresentada. Nos dois últimos anos de simulação é atingido o equilíbrio de material coletado devido à capacidade de coleta máxima adotada, no caso, de 250 toneladas/mês. A Figura 5.4 expõe estas considerações.

Figura 5.4: Cenário 4 – Situação Ótima x Atual Índice per Capita

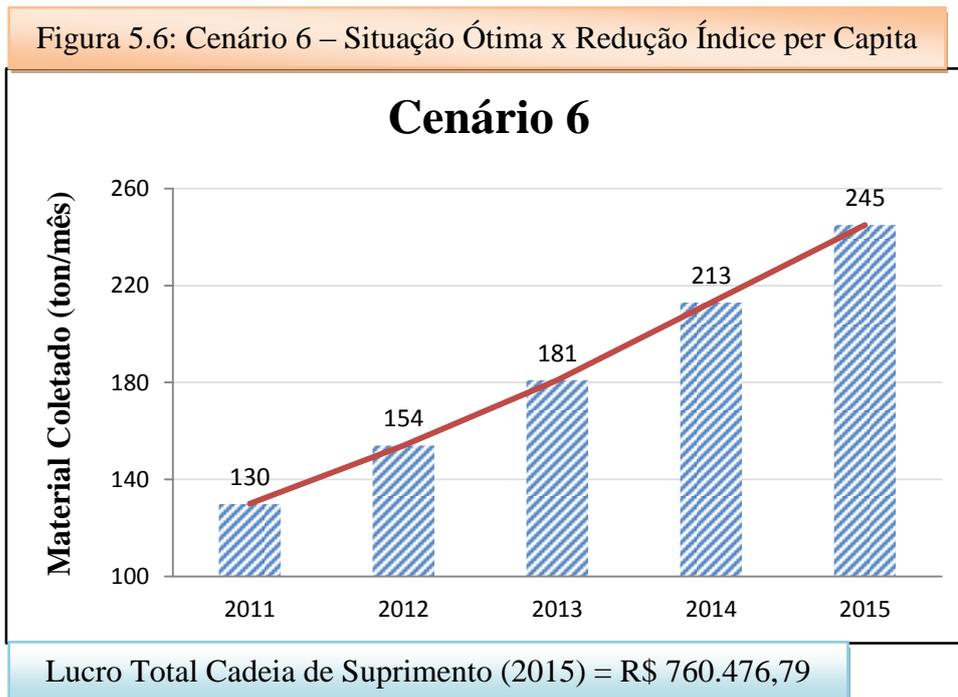


Quanto ao Cenário 5, observa-se que à medida que o índice per capita aumenta, o quantidade de material coletado converge mais próximo da capacidade de coleta. Caso haja capacidade, o programa pode operar com grandes quantidades de produtos consumidos e aumentar ainda mais a sua receita. Da mesma forma que o Cenário 4, a rede se torna autossuficiente logo no começo da projeção e acumula até o final, com o lucro da cadeia muito atrativo, conforme apresentado na Figura 5.5.

Figura 5.5: Cenário 5 – Situação Ótima x Aumento Índice per Capita

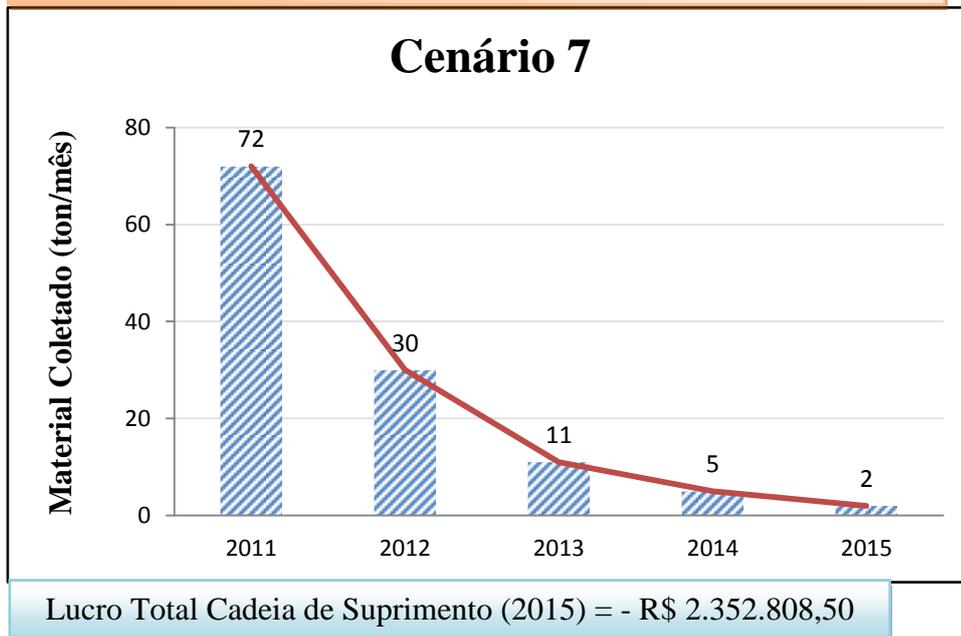


Ainda que no Cenário 6 há redução no índice per capita, a quantidade de material entregue por esta situação é alta devido à sua obrigatoriedade e, assim, tende a atingir a viabilidade do negócio. Apenas no primeiro ano o lucro é negativo, logo após converge na autossuficiência e acumula até o final com o lucro da cadeia mostrado na Figura 5.6.



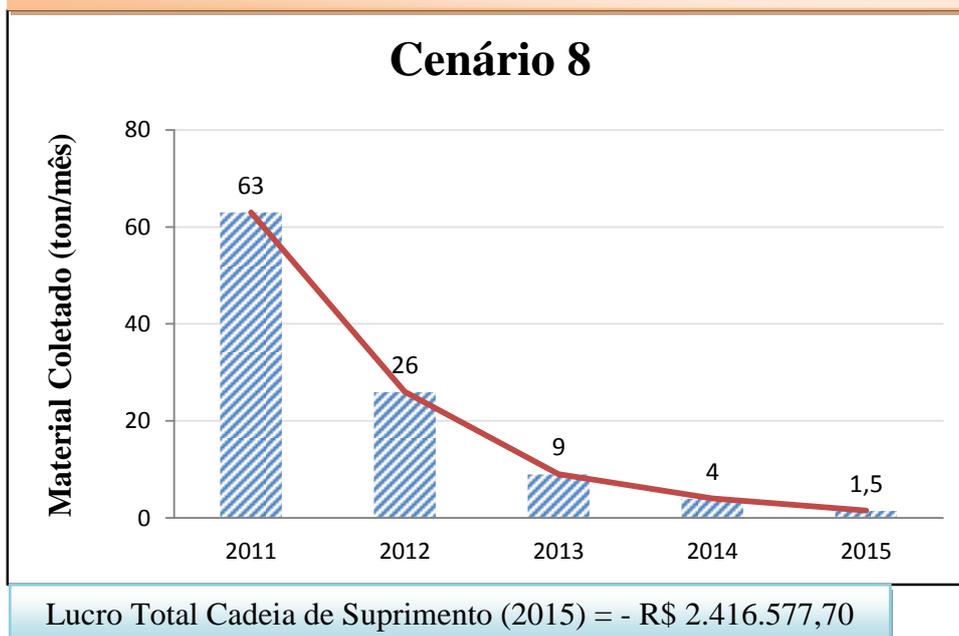
Para esta situação péssima ocorre que o a situação atual não se manterá estável continuamente e quando houver oscilação no sistema, com a redução do material coletado, não há incentivo externo para manter o equilíbrio no comportamento do sistema. Por isso, os recicláveis são dispostos erroneamente como rejeitos e o modelo se torna inviável do início ao final da simulação, com um déficit bem significativo. À medida que o tempo passa, após a projeção definida, mais e mais produtos são dispostos em aterros e o sistema se torna inoperante com nenhum produto avançando na rede de reciclagem. Ademais, esta situação péssima pode também exemplificar cidades que não possuem um programa de coleta seletiva, ou até mesmo um programa em fase inicial ou que apresentam muitas falhas em sua organização e operação. A Figura 5.7 expõe estes resultados.

Figura 5.7: Cenário 7 – Situação Pessimista x Atual Índice per Capita

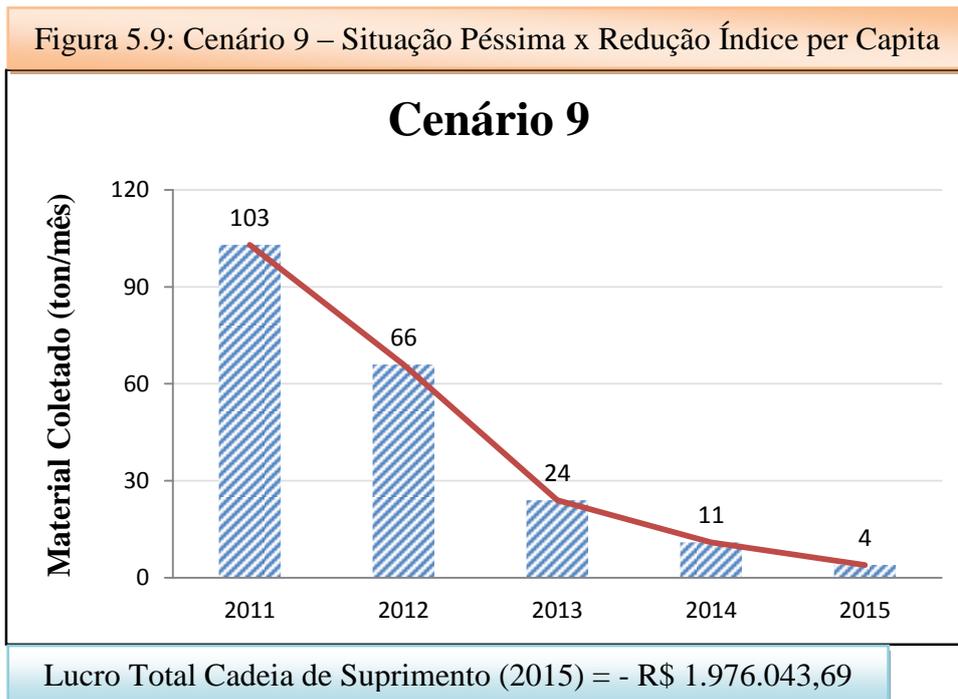


Assim como no Cenário 7, o modelo se torna inviável do início ao final da simulação, com um déficit bem significativo. Mesmo com o aumento no índice per capita ao longo do tempo, mais produtos são consumidos e concomitantemente estes são tratados como rejeitos pela população. Quanto mais produtos são gerados, mais serão enviados aos aterros e, por isso, o déficit tende a aumentar conforme o tempo nesta situação conforme apresentado na Figura 5.8.

Figura 5.8: Cenário 8 – Situação Pessimista x Aumento Índice per Capita



O Cenário 9 se difere dos Cenários 7 e 8 no sentido de que, como menos produtos são introduzidos no sistema, fazendo com que menos produtos sejam descartados, acarreta um déficit menor em comparação aos cenários de mesmo caráter, porém ainda bem significativo. Da mesma forma no cenário pessimista há perda de materiais, sendo a convergência no início maior em relação aos demais e no final segue o mesmo procedimento de tender a zero a quantidade coletada, conforme apresentado na Figura 5.9.

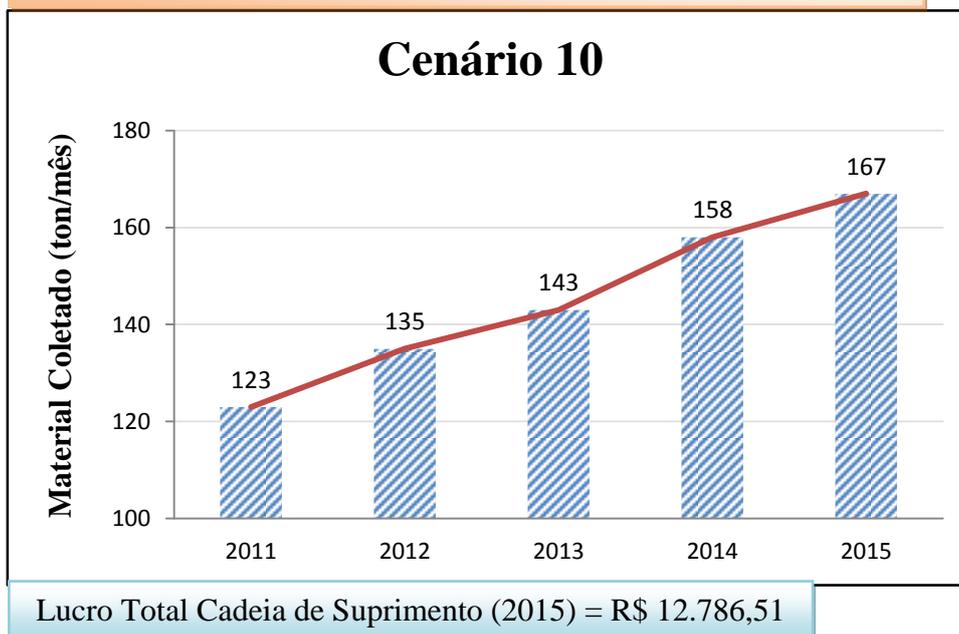


5.2.2 – Cenários da Legislação Ambiental x Tempo de Coleta

Os cenários da legislação ambiental são a situação normal, otimista e pessimista. Quanto ao tempo de coleta, sua sensibilidade depende para casos de aumento, redução ou uma situação normal. Por isso, a combinação destes elementos é transmitida conforme as figuras apresentadas, sendo em seguida realizadas algumas considerações para cada cenário.

O Cenário 10 equivale ao Cenário 1, pois ambos descrevem o cenário e variável na situação atual do modelo. Por isso, de acordo com a Figura 5.10, os resultados são idênticos assim como as considerações.

Figura 5.10: Cenário 10 – Situação Atual x Atual Tempo de Coleta



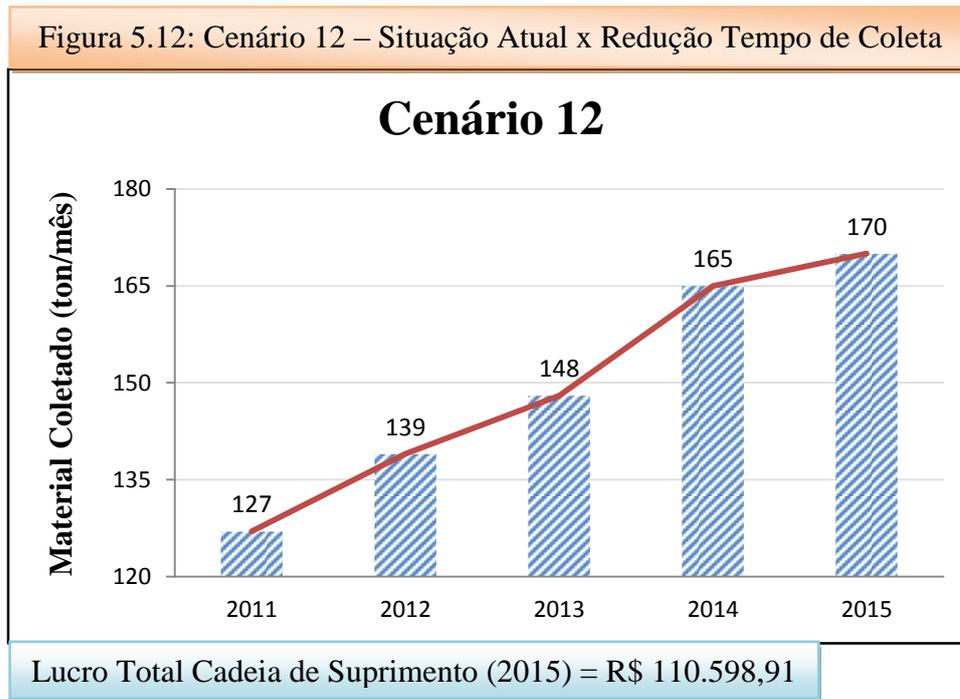
Quanto ao Cenário 11, observa-se que à medida que aumenta o tempo de coleta, a quantidade de material coletado diminui e, como consequência, o lucro tende a ficar cada vez mais inviável, provocando aumento no déficit conforme o tempo de planejamento. Por tudo isso, a Figura 5.11 apresenta esta análise.

Figura 5.11: Cenário 11 – Situação Atual x Aumento Tempo de Coleta



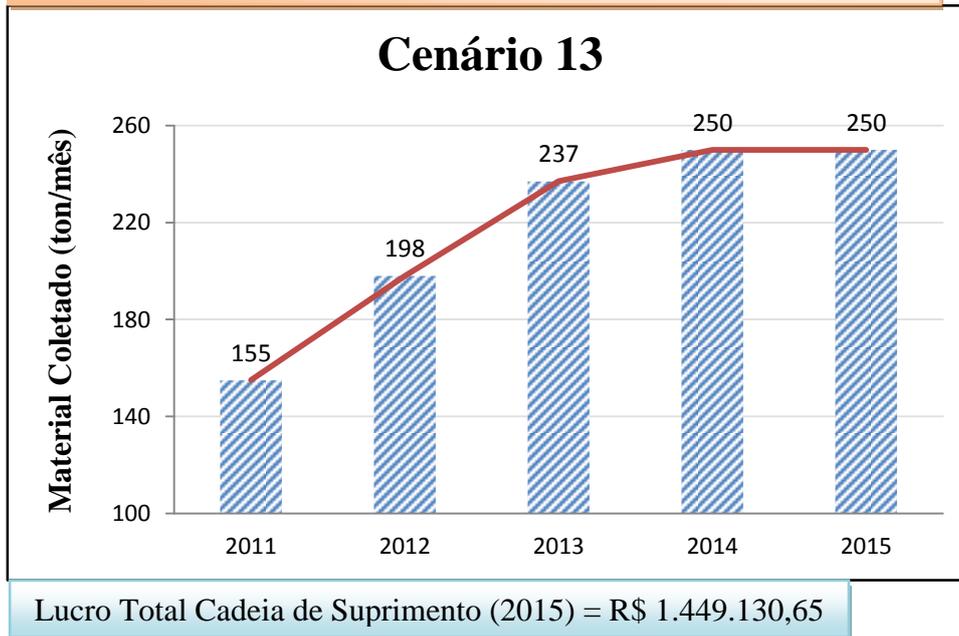
Comparados aos Cenários 10 e 11, pode-se perceber pelo Cenário 12 que, com a redução do tempo de coleta, aumenta-se a quantidade coletada (conclui-se que estas variáveis

são inversamente proporcionais) e, como consequência, gera uma situação favorável conforme é apresentado na Figura 5.12. Vale ressaltar que essa redução no tempo não produz a situação do material coletado ser superior ao consumido, pois geraria comportamentos estranhos nos resultados. Para tanto, no caso deste cenário, reduziu-se o tempo de coleta em 20%, podendo-se chegar até 30% para não provocar tais comportamentos.



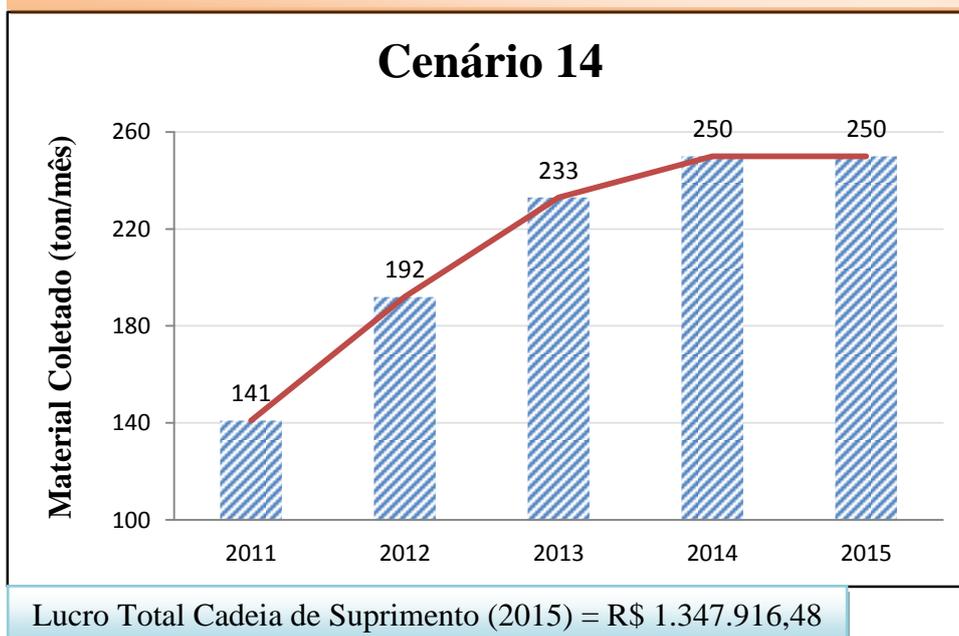
O Cenário 13 equivale ao Cenário 4 pois ambos descrevem o cenário na situação ótima e a variável na situação atual do modelo. Por isso, para a Figura 5.13, os resultados são idênticos assim como as considerações.

Figura 5.13: Cenário 13 – Situação Ótima x Atual Tempo de Coleta

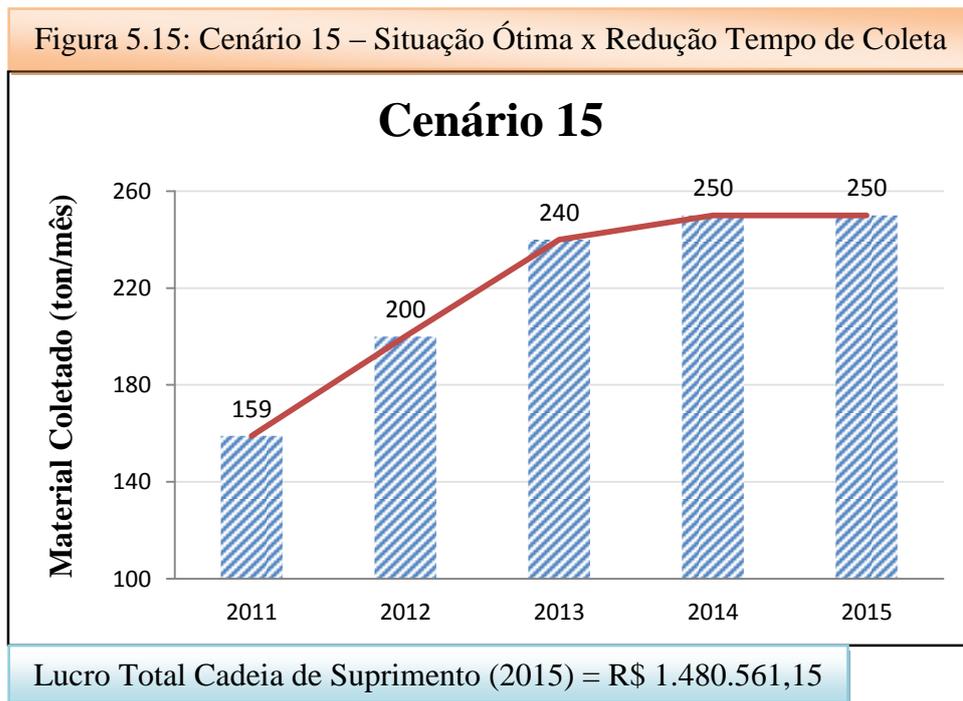


Para o Cenário 14, independente do aumento no tempo de coleta (mesmo aumentando drasticamente), não há muita variação tanto para a quantidade coletada quanto o lucro, ainda mais se comparado com o Cenário 13; ou seja, não há muita influência do tempo de coleta quando a situação é ótima. Além disso, apenas no primeiro ano o lucro da cadeia possui déficit, logo após o sistema é autossuficiente ao longo do horizonte, conforme é exposto na Figura 5.14.

Figura 5.14: Cenário 14 – Situação Ótima x Aumento Tempo de Coleta

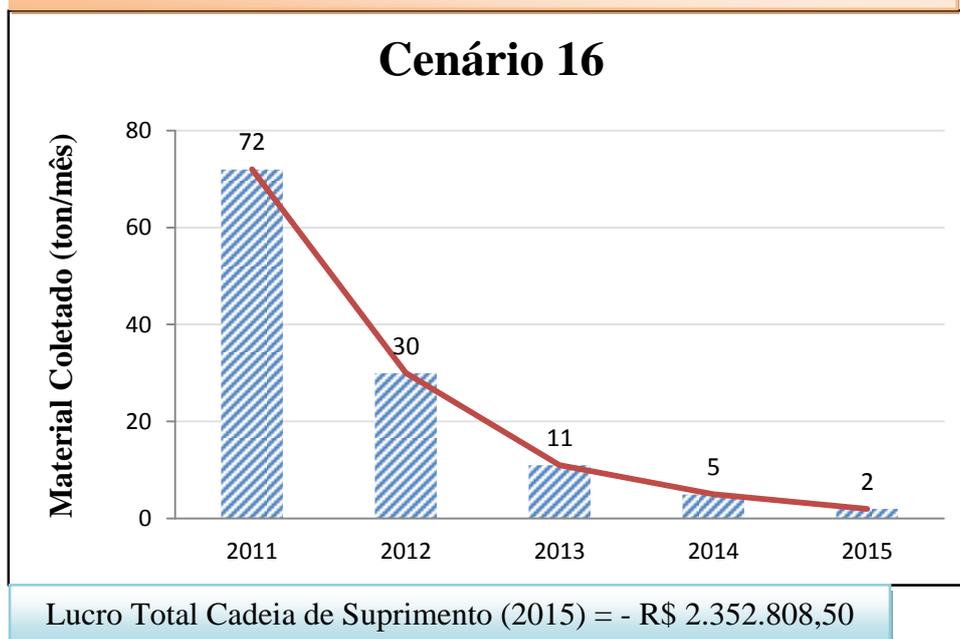


Pode-se perceber pelo Cenário 15 que, à medida que se reduz o tempo de coleta, a quantidade de material coletado aumenta sem grandes variações, da mesma maneira que o Cenário 14 e, como consequência, o lucro se mantém no mesmo patamar. Levando-se em conta que o material coletado não seja superior ao consumido, reduziu-se em até 20% o tempo de coleta. Vale ressaltar que o déficit se encontra apenas nos quatro primeiros meses e o material coletado se mantém constante ao longo do tempo dependendo da capacidade de coleta máxima adotada. Por fim, a Figura 5.15 apresenta esta análise.



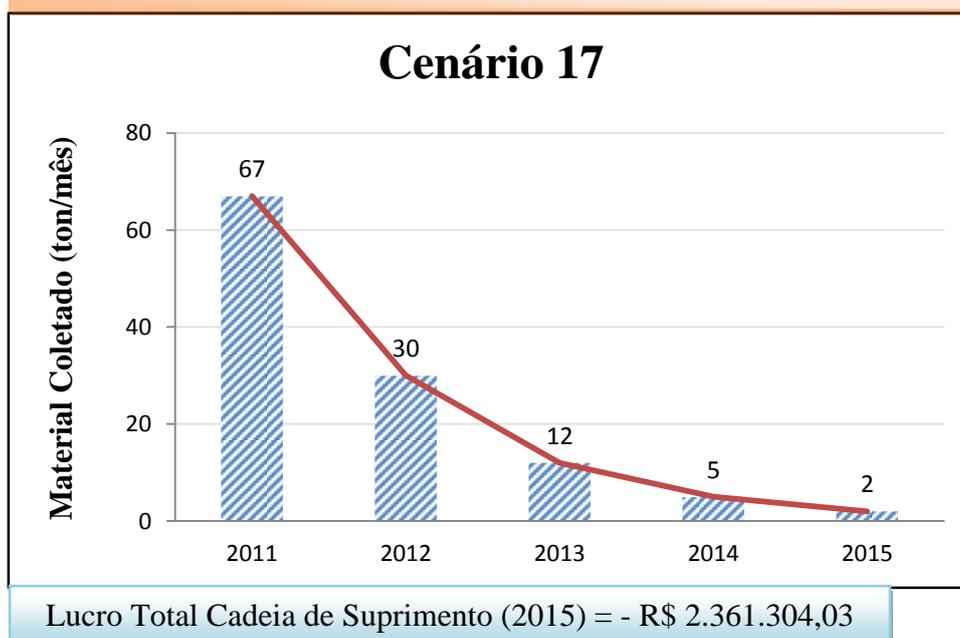
O Cenário 16 equivale ao Cenário 7 pois ambos descrevem o cenário na situação péssima e a variável na situação atual do modelo. Por isso, de acordo com a Figura 5.16, os resultados são idênticos assim como as considerações.

Figura 5.16: Cenário 16 – Situação Péssima x Atual Tempo de Coleta

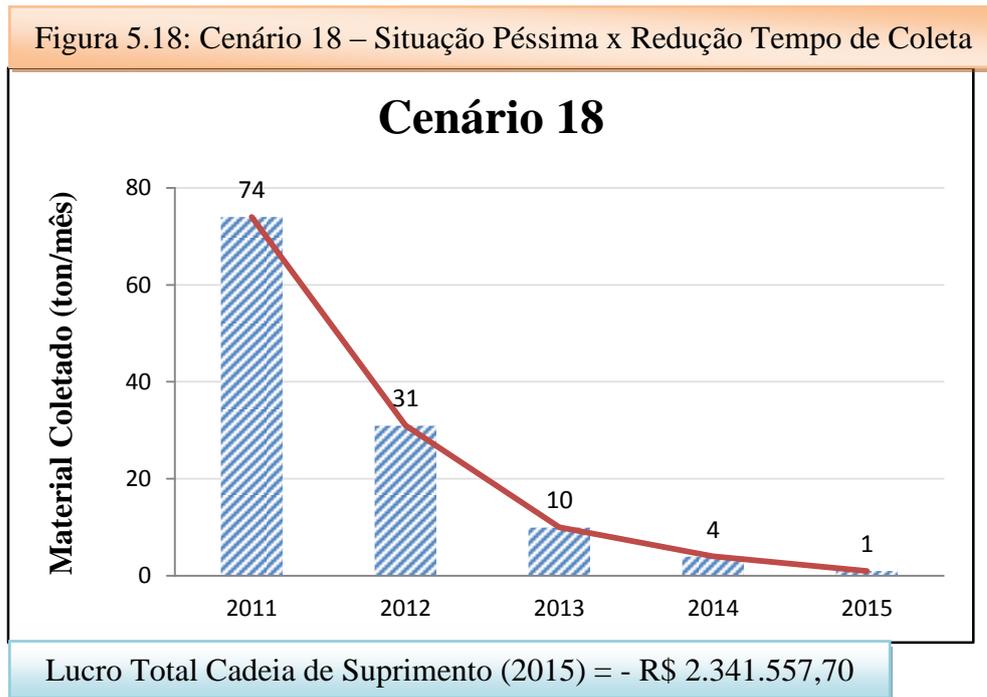


Comparado ao Cenário 16, o Cenário 17 não apresenta variação significativa, inclusive quando se aumenta drasticamente o tempo de coleta, o valor final do lucro da cadeia se mantém praticamente inalterado. Isso implica que o tempo de coleta não tem relação com o cenário pessimista, pois não há mudanças severas nos resultados, conforme exposto na Figura 5.17.

Figura 5.17: Cenário 17 – Situação Péssima x Aumento Tempo de Coleta



De acordo com o Cenário 18, esperava-se que com a redução no tempo de coleta (em até 20% devido a restrição material coletado/consumido), em uma situação péssima, poderia haver um equilíbrio e com isso aumentaria a quantidade de material coletado. Contudo, para este e os demais cenários de mesma análise (Cenários 16 e 17) o comportamento da Figura 5.18 é similar e mostra que o tempo de coleta não possui forte influência sobre os cenários propostos da legislação ambiental.

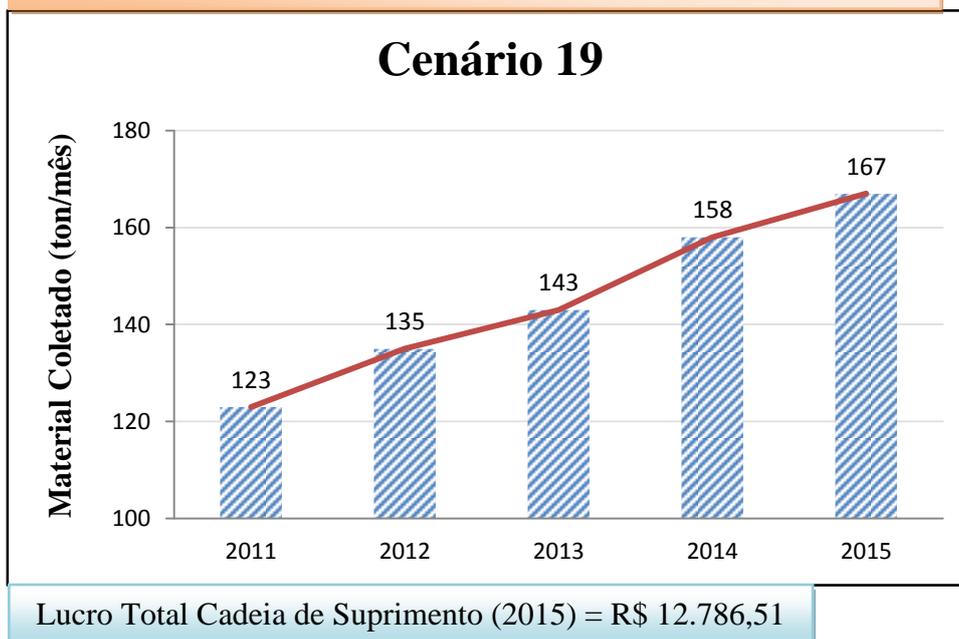


5.2.3 – Cenários da Legislação Ambiental x Capacidade de Coleta

Os cenários da legislação ambiental são a situação normal, otimista e pessimista. Suponhamos que haja alteração na capacidade de coleta, devido às oscilações quanto ao aumento na sua capacidade, seja por acréscimo de caminhões e pessoal, além de sua redução, quando o nível de atendimento é abaixo do esperado; sem contar com a situação atual da capacidade para análise comparativa. Por isso, a combinação destes elementos é transmitida conforme as figuras apresentadas a seguir, sendo na sequência realizadas algumas considerações para cada cenário.

O Cenário 19 equivale ao Cenário 1 pois ambos descrevem o cenário e variável na situação atual do modelo. Por isso, conforme a Figura 5.19, os resultados são idênticos assim como as considerações.

Figura 5.19: Cenário 19 – Situação Atual x Atual Capacidade Coleta

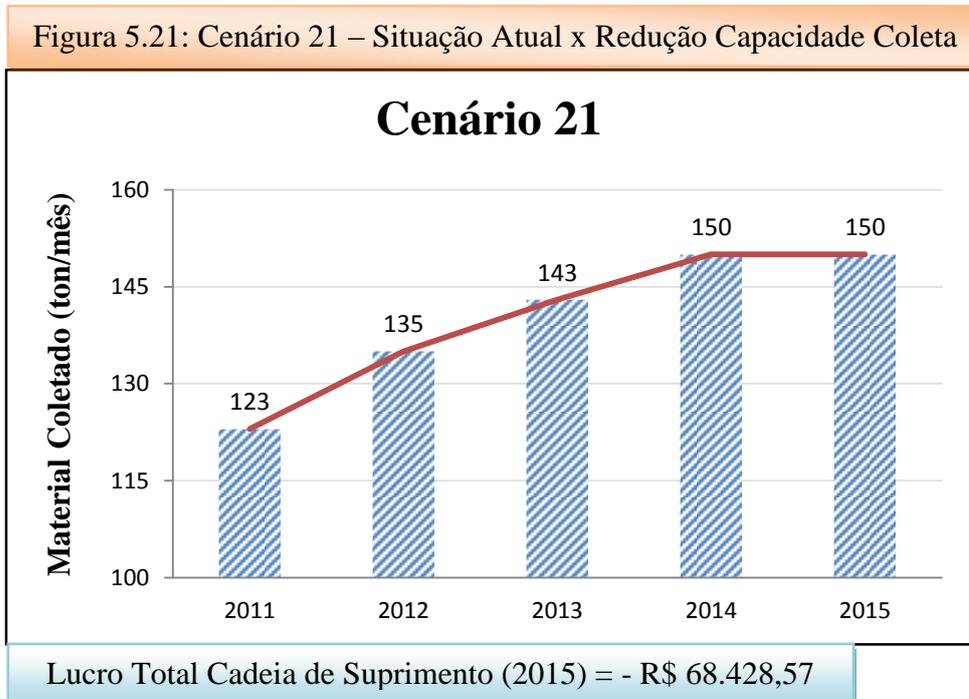


O Cenário 20 apresenta os mesmos resultados do Cenário 19, pois para a situação atual a capacidade de coleta não é fator limitante no sistema. Isso significa que, aumentando-se a capacidade neste cenário, ela se torna simplesmente ociosa e desnecessária em relação ao crescimento da quantidade de material coletado. A Figura 5.20 demonstra esta consideração.

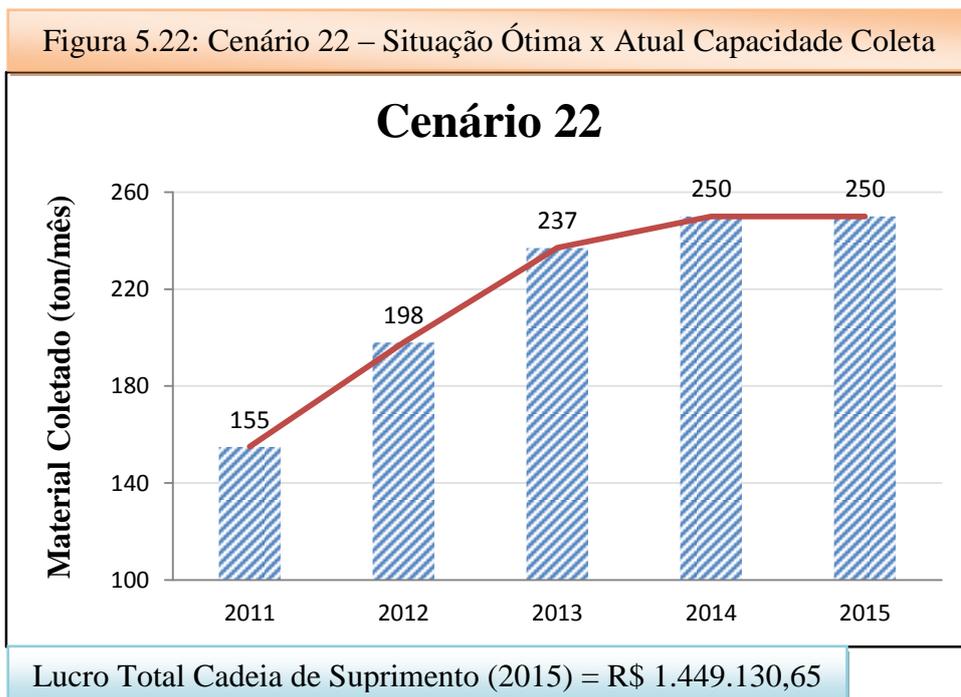
Figura 5.20: Cenário 20 – Situação Atual x Aumento Capacidade Coleta



Quanto ao Cenário 21, percebe-se que reduzindo a capacidade de coleta, há a redução da quantidade de material coletado – fator este que restringe o crescimento gradativo no cenário normal – à medida que o programa tenha uma capacidade limite máxima de serviço. Sendo assim, conforme a Figura 5.21, o lucro da cadeia apresenta déficit de - R\$ 68.428,57.

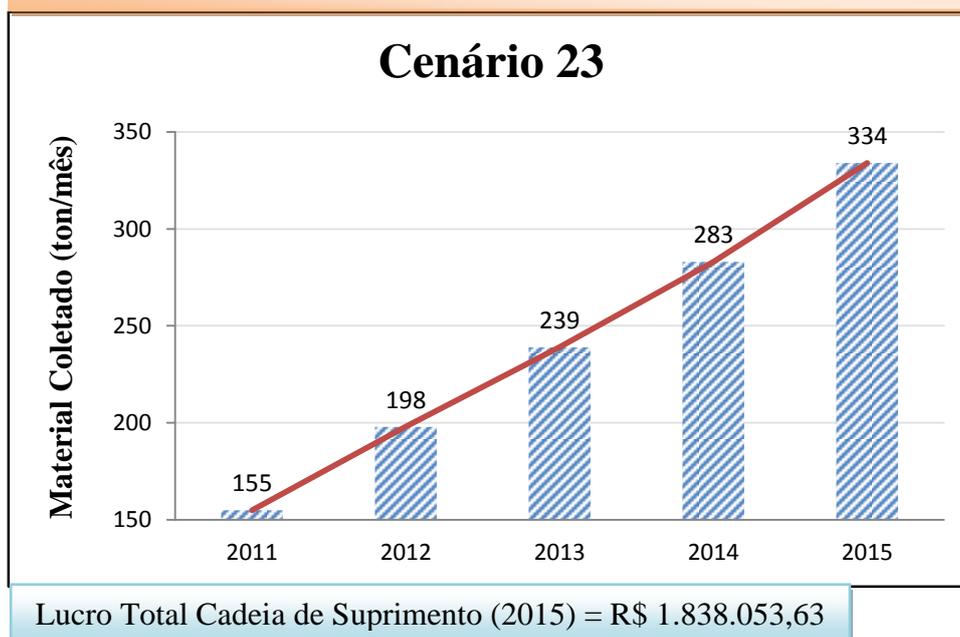


O Cenário 22 equivale ao Cenário 4 pois ambos descrevem o cenário na situação ótima e a variável na situação atual do modelo. Por isso, de acordo com a Figura 5.22, os resultados são idênticos assim como as considerações.



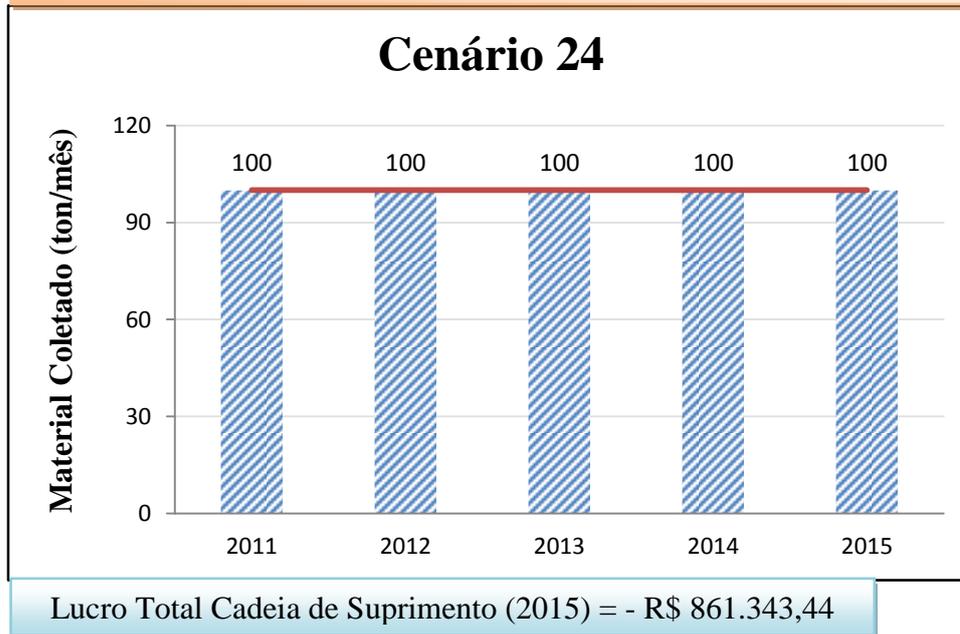
Para o Cenário 23, à medida que se aumenta a capacidade de coleta, de acordo com o aumento progressivo do material consumido ao longo do tempo, a quantidade de material coletada também aumenta, relacionada à sua capacidade de coleta. Nos três primeiros anos ela se mantém igual ao Cenário 22 por não atingir sua capacidade na situação atual, porém, com o aumento neste cenário, há um crescimento exponencial nos últimos dois anos. O lucro da cadeia se torna bem vantajoso ao final do período conforme pode ser visto na Figura 5.23.

Figura 5.23: Cenário 23 – Situação Ótima x Aumento Capacidade Coleta



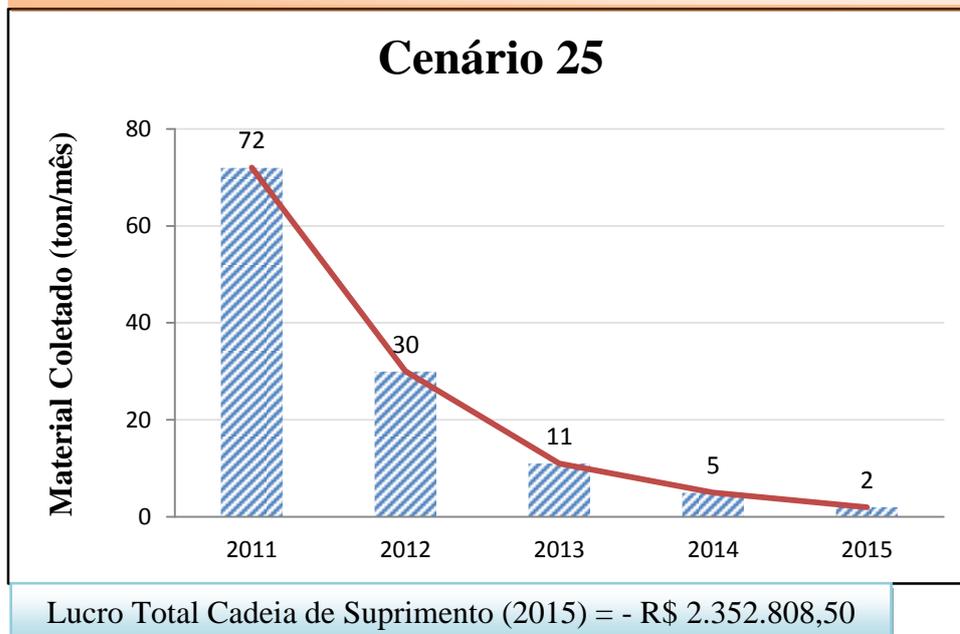
Agora quanto ao Cenário 24, a situação demonstra que sem uma capacidade de coleta aprimorada, quando se obtém a situação ótima de entrega de materiais, o programa de coleta seletiva não consegue atender a demanda e, neste caso, não seria o problema dos municípios, mas sim da própria execução do programa. A meta seria de estabelecer novos padrões para aprimorar a capacidade da coleta seletiva. Para este cenário apresentado na Figura 5.24, em todos os meses o lucro apresenta déficit e, concomitantemente, o lucro total da cadeia de suprimento.

Figura 5.24: Cenário 24 – Situação Ótima x Redução Capacidade Coleta



O Cenário 25 equivale ao Cenário 7 pois ambos descrevem o cenário na situação péssima e a variável na situação atual do modelo. Por isso, de acordo com a Figura 5.25, os resultados são idênticos assim como as considerações.

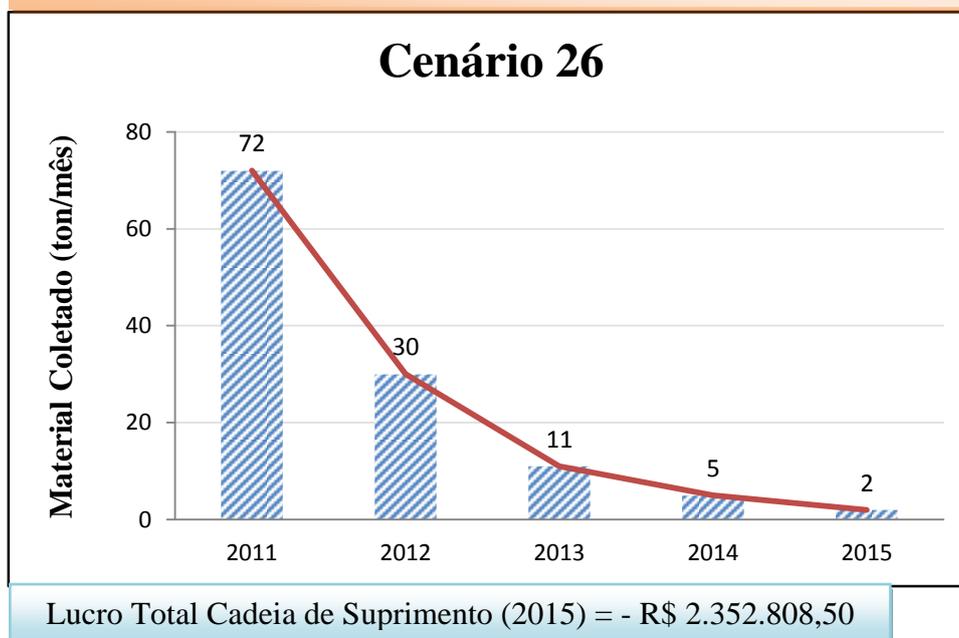
Figura 5.25: Cenário 25 – Situação Péssima x Atual Capacidade Coleta



O Cenário 26 apresenta os mesmos resultados do Cenário 25, pois o aumento da capacidade não gera qualquer interferência na quantidade de material coletado, visto que esta quantidade é drasticamente inferior ao aumento da capacidade. Sendo assim, não há obrigação

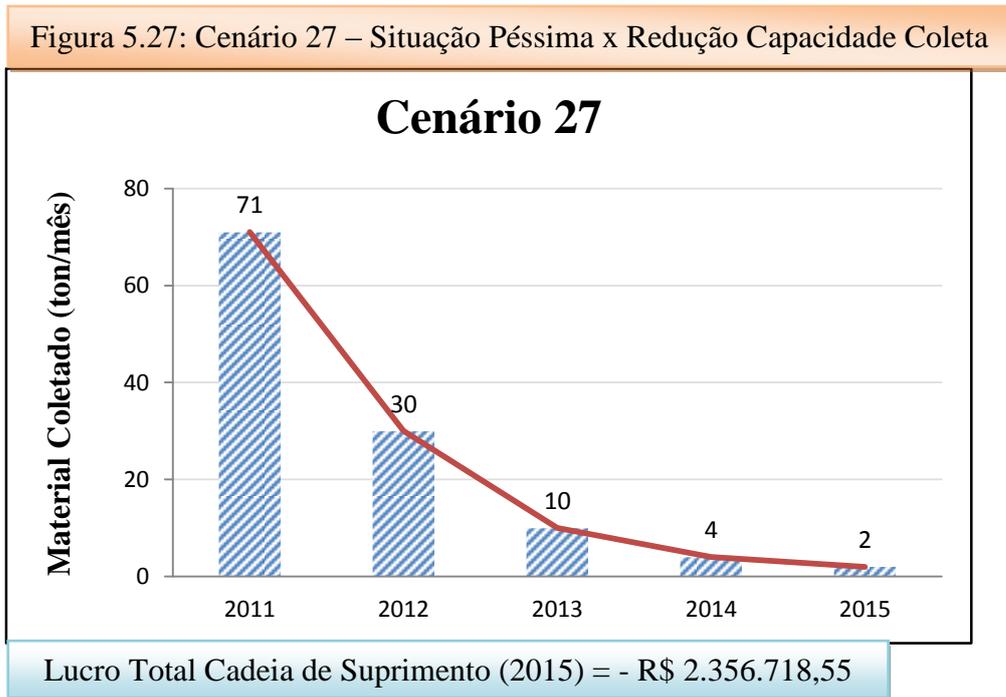
em políticas para o planejamento da capacidade salvo novas perspectivas de aumento na entrega de recicláveis pelos municípios. Tanto o lucro como o lucro total da cadeia apresenta déficit em todo o horizonte de planejamento de cinco anos, conforme exposto na Figura 5.26.

Figura 5.26: Cenário 26 – Situação Péssima x Aumento Capacidade Coleta



Em comparação aos Cenários 25/26, o Cenário 27 não apresenta uma variação significativa na quantidade coletada, pelo simples fato de que na situação péssima a quantidade coletada fica ainda inferior à capacidade de coleta reduzida em praticamente todo o período. Isso se diferencia caso a capacidade de coleta seja menor que a quantidade coletada; nesse caso, tende a ficar constante com a capacidade de coleta definida e fica ainda mais agressivo com uma situação caótica, como no caso de um sistema que possui capacidade de operação muito aquém ou um programa que foi implantado recentemente.

Dessa maneira, conforme apresentado na Figura 5.27, a redução na capacidade não implica em grandes avanços para o quadro do programa de coleta seletiva. Ademais, ambos os lucros apresentam déficit em todo o ciclo.



5.2.4 – Cenários da Legislação Ambiental x Custo de Transporte

Os cenários da legislação ambiental são a situação normal, otimista e pessimista. Suponhamos que há variação no custo de transporte devido ao aumento da capacidade de coleta, em que se torna imprescindível uma reestruturação no número da frota. Além disso, caso este custo não seja mais fixo e sim variável, em que o próprio programa de coleta seletiva elabora e gerencia esta atividade. Ainda mais, devido a um mau dimensionamento, pode ocorrer o aumento dos custos de transportes, como por exemplo, devido à má roteirização e outros aspectos críticos envolvidos. Por isso, a combinação destes elementos é transmitida conforme as figuras apresentadas, sendo em seguida realizadas algumas considerações para cada cenário.

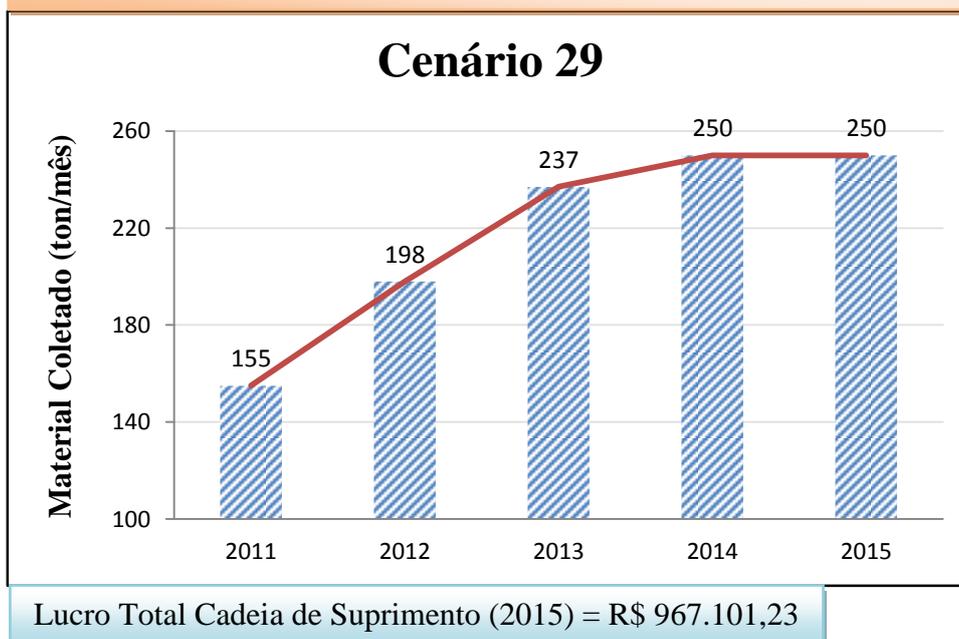
O Cenário 28 em comparação à situação atual e o custo de transporte atual (que é idêntico à Figura 5.1: Cenário 1 – situação atual x atual índice per capita), com lucro total da cadeia de suprimento de R\$ 12.786,51, prova que o custo tem efeito sobre o cenário em questão provocando um déficit considerável no lucro da cadeia (vide Figura 5.28); caso este que não ocorreria em uma situação normal.

Figura 5.28: Cenário 28 – Situação Atual x Aumento Custo Transporte

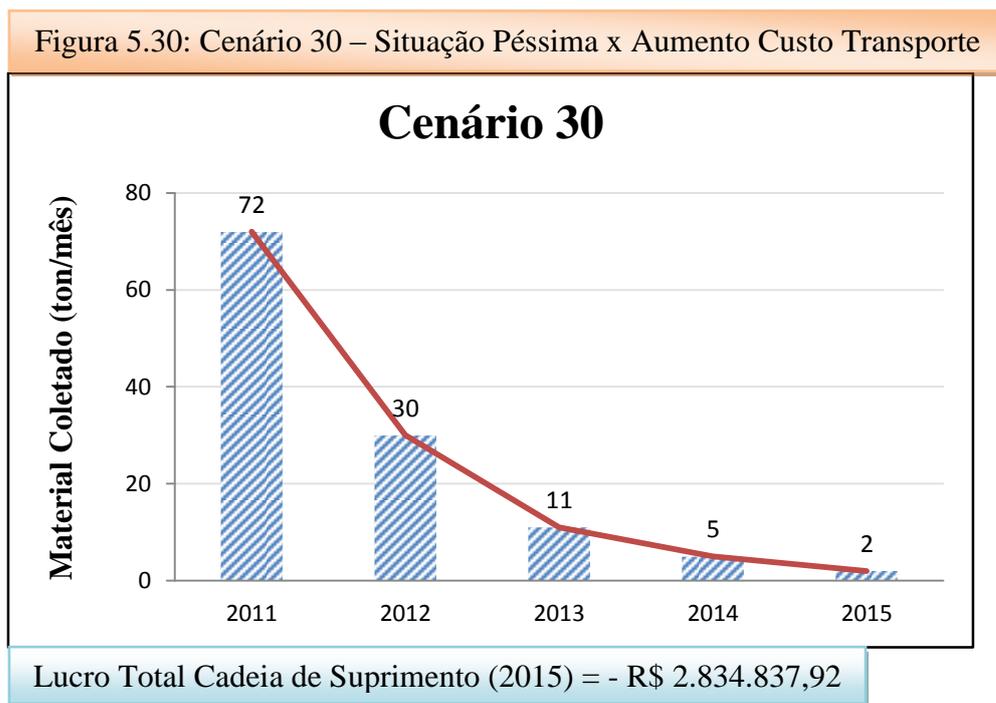


O Cenário 29 em comparação à situação ótima e o custo de transporte atual (que é idêntico à Figura 5.4: Cenário 4 – situação ótima x atual índice per capita), com lucro total da cadeia de suprimento de R\$ 1.449.130,65, prova que o custo tem efeito sobre o cenário em questão provocando uma redução de lucro da cadeia de aproximadamente R\$ 500.000,00 para o caso, conforme demonstrado pela Figura 5.29.

Figura 5.29: Cenário 29 – Situação Ótima x Aumento Custo Transporte



O Cenário 30 em comparação à situação péssima e o custo de transporte atual (que é idêntico à Figura 5.7: Cenário 7 – situação péssima x atual índice per capita), com lucro total da cadeia de suprimento de - R\$ 2.352.808,50, prova que o custo tem efeito sobre o cenário em questão provocando um aumento no déficit do lucro da cadeia de aproximadamente R\$ 500.000,00 para o caso, conforme demonstrado pela Figura 5.30.



5.3 – RESUMO DOS CENÁRIOS ANALISADOS

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos cenários analisados no item anterior em que se verifica, a partir dos gráficos e considerações destes, a atratividade para com o material coletado e a viabilidade do lucro total da cadeia de reciclagem, ambos para o horizonte da rede de planejamento de 5 anos.

Tabela 5.1: Resumo dos cenários analisados.

Cenário	Material Coletado		Lucro Total da Cadeia de Suprimento		
	Atrativo		Viável		
	SIM	NÃO	SIM	NÃO	
Legislação Ambiental X Índice per Capita	1	X	X		
	2	X	X		
	3	X	X		
	4	X	X		
	5	X	X		
	6	X	X		
	7		X		X
	8		X		X
	9		X		X
Legislação Ambiental X Tempo de Coleta	10	X	X		
	11	X		X	
	12	X	X		
	13	X	X		
	14	X	X		
	15	X	X		
	16		X		X
	17		X		X
	18		X		X
Legislação Ambiental X Capacidade de Coleta	19	X	X		
	20	X	X		
	21		X		X
	22	X	X		
	23	X	X		
	24		X		X
	25		X		X
	26		X		X
	27		X		X
Leg. Amb. X Custo Transp.	28	X		X	
	29	X	X		
	30		X	X	

Legenda para as cores dos cenários:

Situação Atual x Atual
Situação Atual x Aumento
Situação Atual x Redução

Situação Ótima x Atual
Situação Ótima x Aumento
Situação Ótima x Redução

Situação Péssima x Atual
Situação Péssima x Aumento
Situação Péssima x Redução

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi desenvolver um estudo que contribua para uma eficiente logística reversa nas atividades de uma rede de reciclagem qualquer, a qual foi atingida com êxito. Para tanto, utilizou-se um problema de gerenciamento estratégico como modelo a ser aplicado para o canal reverso, mais especificamente, em uma rede de coleta seletiva, sendo que o sistema é analisado através da simulação do modelo baseado nos princípios da metodologia de dinâmica de sistemas.

Ademais, foi também estabelecer referencial teórico para que outras organizações, tanto do mesmo setor como para as diversas áreas da cadeia de suprimento reversa, possam aplicar a metodologia discutida para avaliar o desempenho de suas atividades.

Sem contar também que foi apresentar um levantamento bibliográfico dos principais modelos quantitativos que atenda ao gerenciamento da cadeia de suprimento reversa, referenciar e categorizar os trabalhos em sua respectiva temática, priorizando a busca às pesquisas mais recentes.

Logrou êxito o objetivo precípua nesta pesquisa: adaptar um modelo europeu baseado no comportamento sistêmico – por intermédio da DS como ferramenta de tomada de decisão – à realidade brasileira, mais especificamente, uma rede de reciclagem. Por fim, aplicar o conhecimento aprendido em um programa municipal de coleta seletiva.

Sabe-se que não somente os objetivos econômicos estão envolvidos, mas também aspectos que atualmente vem merecendo destaque no cenário mundial – como imagem verde e pressões da sociedade e legislação – visto que o mercado se torna exigente e, por isso, uma organização precisa se adaptar rapidamente frente às mudanças do cenário.

Assim sendo, novos conceitos são imprescindíveis para atingir a variedade de restrições estabelecidas, possibilitando priorizar uma ou mais variáveis dependendo do objetivo traçado. Por isso, entre os tipos de modelos quantitativos citados, a DS tem grande potencial em regulamentar quais os preceitos que se quer atingir e quais os fatores a serem destacados no sistema.

As sanções europeias para com as rígidas imposições legais, associadas a grandes avanços operacionais e tecnológicos, são modelos a serem seguidos por qualquer país que busca aprimorar uma rede de reciclagem. Não levando somente em conta aspectos culturais como fatores que podem intensificar o fluxo reverso, mas sim de aspectos técnicos, buscou-se adaptar ao modelo brasileiro algumas inovações verificadas nos modelos europeus.

De nada vale um grande polo gerador de resíduos sólidos, com grande atratividade para o mercado de reciclagem, sem contar com uma correta gestão dos resíduos e sua destinação final, além de rígidas atribuições na legislação e conscientização/colaboração da sociedade, mas que não possua um gerenciamento estratégico adequado da rede com metodologias e ferramentas que contribuam com a viabilidade e autossuficiência da rede. Esta somatória de condições possui interdependências e por isso devem seguir em sintonia, sendo que um colapso em qualquer delas pode provocar situações inesperadas e impróprias para a continuidade de suas atividades.

De acordo com os mecanismos propostos para atingir o objetivo da pesquisa, primeiramente foram consultados os modelos quantitativos matemáticos para a logística reversa, que podem ser de análise operacional, tática e estratégica. Em seguida, foi realizado um estudo minucioso do objeto a ser aplicado a título de aplicação do estudo, com a caracterização do programa municipal de coleta seletiva da cidade de São Carlos, destacando-se os fatores operacionais que vinculam os dados inseridos na simulação do modelo. Por fim, é feito um estudo comparativo do quadro atual brasileiro quanto a sua reciclagem com países desenvolvidos europeus e com os Estados Unidos.

Em seguida, definido e justificado o modelo estratégico como aquele a ser aplicado na pesquisa, foi estudado um modelo geral europeu para a cadeia de suprimento de ciclo fechado ao qual serviu de base para a adaptação ao caso brasileiro, ajustando-o a toda caracterização do programa de coleta seletiva.

Concluída a etapa de parametrização do modelo, de modo que refletisse os padrões atuais do programa na prática, o próximo passo foi a atribuição de cenários para análise de

acordo com o planejamento da rede com a projeção de cinco anos, sendo por último feitas considerações a respeito dos resultados gerados.

6.1 – CONCLUSÕES

Entre as principais conclusões do presente trabalho está que a DS é um conceito de grande versatilidade que permite englobar fatores específicos de uma estrutura para transmitir situações que refletem a realidade abordada. Nada impede que sua metodologia seja aplicada fora do campo estudado, mas sim em inúmeras áreas do conhecimento pela facilidade na sua adaptação e aplicação ao caso específico.

Apesar de possuir um grande número de variáveis envolvidas, além de um diagrama muitas vezes difícil de entendimento devido a interdependência entre essas variáveis, a DS provém de um modelo mais simples e flexível comparado a outros modelos quantitativos que tratam exclusivamente de equações matemáticas complexas e difíceis de manipular. O auxílio com base na linguagem sistêmica do diagrama do ciclo causal, com todas as suas influências e relações, é a maneira que serve de apoio em explicar ao leitor toda a caracterização do problema.

Sem contar que modelos matemáticos, mais especificamente, os de análise operacional ou tática, exprimem resultados para o presente momento e a curto prazo; pelo contrário, para um modelo de DS é importante reproduzir resultados ao logo do tempo e com o período desejado, de maneira que se antecipe às escolhas estratégicas para reverter o quadro adverso previsto. Além disso, a possibilidade de simular cenários manipulando diferentes variáveis é um forte indicativo para a tomada de decisão em problemas que requerem o planejamento futuro.

Lembra-se que a DS possui um importante diferencial que é de admitir incorporar fatores externos que refletem a realidade e que influem, direta ou indiretamente, nos lucros, custos e fluxos da cadeia analisada. Tais fatores podem ser tangíveis ou até mesmo intangíveis, que representam aspectos mais qualitativos, contudo intensificam e produzem sistemas mais próximos da realidade.

Em relação ao *software* aplicado, no caso o Powersim[®], este se mostrou muito útil e versátil no sentido de oferecer ampla técnica para o desenho da rede e estruturação com as devidas equações nas variáveis. Apesar de ser um programa obtido sob licença, em

comparação com o Vensim® PLE por ser um programa gratuito, este último apresentou alguns aspectos que não permitiram simular o mesmo sistema antes verificado pelo Powersim®.

No que tange a análise dos cenários, pode-se concluir que, dos 30 cenários investigados, o investimento atrativo geralmente é viável, salvo dois cenários apresentados, em que ambos retratam a situação atual do programa, onde o aumento progressivo do tempo de coleta (Cenário 11) e do custo de transporte (Cenário 28), o sistema ainda é atrativo, contudo se torna inviável. Por isso, o total de cenários atrativos/inviáveis é de 2 cenários e 16 são os cenários atrativos/viáveis.

Ademais, conclui-se que todo o investimento não atrativo é inviável, ou seja, o programa depende do aumento progressivo da quantidade de material coletado. Se esta quantidade não é vantajosa ao longo dos anos, a situação não possui meios que façam o programa ser autossuficiente.

Por esta razão, especificamente, entre as três vertentes analisadas – índice per capita, tempo de coleta e capacidade de coleta – a situação péssima, independente da sensibilidade das variáveis, não apresenta atratividade/viabilidade para a atribuição de suas atividades (Cenários 7 a 9, Cenários 16 a 18 e Cenários 25 a 27, respectivamente). No mesmo raciocínio está para a capacidade de coleta, em que sua redução na operação, tanto para uma situação atual (Cenário 21) quanto uma ótima (Cenário 24), o sistema é desvantajoso; sem contar quando há o aumento no custo de transporte onde a situação é péssima (Cenário 30). Com isso, o total de cenários não-atrativos/inviáveis é de 12 cenários.

De todos os cenários apresentados, pôde se ter uma base de como o sistema se comporta no caso do grau de influência das variáveis analisadas. Primeiramente, a variável “capacidade de coleta” possui fator decisivo para o desempenho da atratividade/viabilidade do sistema, ou seja, sem uma capacidade de coleta considerável a rede em questão sofre para atender grandes demandas de materiais. Sem contar que tanto as variáveis “tempo de coleta” e “índice per capita” possuem grande dependência desta variável, pois restringe o aumento progressivo na coleta de material mesmo com a contribuição da população com a disposição de recicláveis (relação do “índice per capita”) ou com o planejamento eficaz da operação na coleta dos recicláveis (relação do “tempo de coleta”).

Ainda quanto à análise atrativa/viável, comparado ao “índice per capita”, a variável “tempo de coleta” é mais agressiva e tem maior influência, sem deixar de considerar que a primeira tem grande relevância no sistema. De acordo com as variáveis escolhidas para

análise, poderia haver aquelas que apresentassem pouca ou até nenhuma influência, caso este que não foi comprovado pelas escolhas. Mesmo assim, caso a escolha fosse de tais variáveis sem importância, estas poderiam representar uma análise para futuras projeções em que não seria necessário investir nestas operações, seguido da estratégia de decidir priorizar outros tipos de variáveis ou focar naquelas conhecidas com grande influência.

Seguindo a mesma análise, também vale ressaltar que o custo de transporte tem papel importante no sistema, visto que com seu aumento, a situação ótima é a única que faz do modelo viável/atrativo (Cenário 29).

Por fim, de acordo com a análise destes 30 cenários, conclui-se que a representatividade do modelo em questão apresentou versatilidade em definir caminhos a serem traçados e aqueles que não devem ser seguidos, inclusive com uma vasta riqueza de resultados que se pode verificar em diferentes casos para o planejamento da rede de reciclagem sob avaliação e, por isso, servem de orientação para projetos similares públicos e até mesmo privados.

Quanto à abordagem literária, primeiramente em se tratando do cenário nacional, pesquisas voltadas ao canal reverso apresentam ampla discussão, porém geralmente são tratadas apenas de modo descritivo e pouco profundo, o que torna um assunto bastante saturado para a pesquisa acadêmica.

Em se tratando de pesquisas de cunho quantitativo, ainda que haja alguns trabalhos para a análise operacional/tática, não se tem notícia até o presente momento de conclusão da pesquisa, para a esfera nacional, de trabalhos relacionados com a análise estratégica da logística reversa e que serviriam de complemento ou sustentação para o assunto.

Para o cenário internacional, o que se pôde constatar pela revisão da literatura atual é que ultimamente, mais precisamente nas últimas duas décadas, houve o crescimento de temáticas para com a rede logística reversa e sua quantificação, o que demonstra um grande avanço para a área, comparado com o passado pouco promissor que a área exercia. Para se ter ideia, há pouco tempo atrás estavam disponíveis somente publicações voltadas a modelos da cadeia de suprimento da logística tradicional utilizando abordagens quantitativas. Tal paradigma perdeu sua razão no sentido de que, no século XXI, o crescimento de aspectos reversos e ambientais aliados a assuntos quantitativos vem merecendo destaque e acompanha um crescimento gradativo e emparelhado àquelas com a logística direta.

Dessa maneira, para a esfera global, pode-se dizer que a pesquisa tem caráter um tanto quanto promissor, pois não se tem notícia até o momento de conclusão do trabalho, de assuntos relacionados ao estudo de um programa de coleta seletiva e que trata de vários materiais ao mesmo tempo.

Mesmo que o programa se constitua por uma organização voltada a fins não lucrativos, recebendo subsídios e incentivos para suas atividades, o estudo tenta desmistificar este conceito de apenas buscar o lucro como alternativa de continuidade das operações reversas, mas sim de integrar fatores primordiais e não salientados atualmente. Visto pelas análises, a simulação do sistema apresenta resultados que incentiva em rever os preceitos de estabelecer uma organização que dependa de outros setores para sua autossuficiência.

Por isso também, o estudo incentiva programas municipais brasileiros em rever seu planejamento e estratégia para associar aspectos econômicos e ambientais, integrantes básicos para uma rede logística reversa.

Ampliando a discussão, empresas privadas necessitam deste incentivo para implantar uma logística reversa, ou aquelas que já o tem, de aprimorar seus conceitos. Imagina-se que com a convicção de que os resíduos podem acarretar grande atratividade para o mercado, aliado a uma precisa rede reversa, com estratégias a longo prazo e situações que antecipem possíveis oscilações e queda de rendimento – objeto da pesquisa – estes fatores serão os direcionadores para a reestruturação da cadeia organizacional, integrando logística tradicional e reversa e assim formando uma cadeia de suprimento de ciclo fechado que possua autossuficiência, rendimentos atrativos e, além de contribuir com os anseios particulares, acarrete em melhorias para a sociedade.

6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na tentativa de trazer melhorias ao método proposto e também nos resultados apresentados, seria interessante que trabalhos futuros abordassem alguns pontos:

- ⇒ Explorar os cenários definidos para a mesma pesquisa que não foram analisados previamente;
- ⇒ Buscar estudos que produzam a definição de mais cenários que ainda não foram tratados e que podem representar grandes avanços para incentivar as organizações em implementar os processos logísticos reversos em sua cadeia de suprimento tradicional;

- ⇒ Aplicar a metodologia específica em uma empresa privada e comparar com os resultados desta pesquisa. Ademais, aplicar em outro programa municipal e fazer comparações;
- ⇒ Comparar a aplicação do modelo europeu com o brasileiro e verificar os aspectos positivos e negativos e assim buscar aprimorar ambas as análises;
- ⇒ Aplicar em uma cadeia de suprimento de ciclo fechado brasileira e, por último;
- ⇒ Fazer novo levantamento para o estudo de modelos quantitativos da rede reversa e suas técnicas e metodologias aplicadas, verificando seu progresso em nível nacional e internacional.

REFERÊNCIAS*

ABREU, A. M. T. (2010). **Print Media Paper Consumption Patterns through a System Dynamics Approach**. M.S. Degree Thesis: Rochester Institute of Technology, Rochester, New York. Disponível em: <<https://ritdml.rit.edu/bitstream/handle/1850/12360/ATEjadaAbreuThesis5-2010.pdf?sequence=1>>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

AGUIRRE, L.A. (2007). **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 728p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE (2010). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2010**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acesso em 20 de outubro de 2011

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1990). **NBR 11175: Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho**.

_____. (1992). **NBR 8419: Apresentação de Projetos de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**.

_____. (2004). **NBR 15114: Resíduos Sólidos da Construção Civil – Áreas de Reciclagem – Diretrizes para Projeto, Implantação e Operação**.

BARBIERE, J. C.; DIAS, M. (2002). **Logística Reversa como Instrumento de Programas de Produção e Consumo Sustentáveis**. Revista Tecnológica, São Paulo, ano VI, n. 77, abril/2002.

* De acordo com: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2002). **NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro.

A Comissão de Pós-Graduação da EESC-USP decidiu adotar a data de publicação logo após o nome do autor, alterando assim, as recomendações da ABNT.

BARROS, A. I.; DEKKER, R.; SCHOLTEN, V. (1998). **A Two-Level Network for Recycling Sand: A Case Study**. *European Journal of Operational Research*, 110, p. 199-214. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6VCT-3TXTFCH-3-2&_cdi=5963&_user=5674931&_orig=search&_coverDate=10%2F16%2F1998&_sk=998899997&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzS&md5=a216bbd6c64b1dacda7f606e13ac14f7&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

BEAMON, B. M.; FERNANDES, C. (2004). **Supply-chain Network Configuration for Product Recovery**. *Production Planning & Control*, 15 (3), pp. 270–281. Disponível em: <<http://faculty.washington.edu/benita/paper15.pdf>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

BIEHL, M.; PRATER, E.; REALFF, MJ. (2007). **Assessing Performance and Uncertainty in Developing Carpet Reverse Logistics Systems**. *Computers & Operations Research*; 34(2), p. 443–463. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC5-4G0002F-2&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=571dbc2f966a2c8248f10ea9b2c376a0>. Acesso em 25 de outubro de 2011.

BIRGE, J.R.; LOUVEAUX, F. (1997). **Introduction to Stochastic Programming**. New York: Springer-Verlag, 440 p. Disponível em: <<http://www.filestube.com/673d9b74ece7f1e103ea,g/introduction-to-stochastic-programming-birge.html> >. Acesso em 13 de novembro de 2009.

BRITO, M. P. de (2004). **Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management?** Thesis (Doctor's Degree) – Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, The Netherlands, 2004. Disponível em: <http://publishing.eur.nl/ir/repub/asset/1132/EPS2004035LIS_9058920585_DEBRITO.pdf>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

CARTER, C. R.; ELLRAM, L. M. (1998). **Reverse Logistics: A Review of the Literature and Framework for Future Investigation**. *Journal of Business Logistics*, vol.19, n.1, p.85-103.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE (2002). **Senior Officials Meeting on the 3R Initiative: Promotion of 3Rs at the National Level** (Apresentação). Disponível em: <http://www.env.go.jp/recycle/3r/en/s_officials/02_03/02.pdf>. Acesso em 02 de novembro de 2011.

_____. (2010). **A Evolução da Reciclagem no Brasil**. Disponível em: <<http://www.portalapas.org.br/imagens/ReuniaoAPAS2010CEMPRE.pdf>>. Acesso em 27 de outubro de 2011.

_____. (2010a). **Pesquisa Ciclosoft 2010 com Dados da Coleta Seletiva no país**. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/ciclosoft_2010.php>. Acesso em 27 de outubro de 2011.

CHAERUL, M.; TANAKA, M.; SHEKDAR, A. V. (2008). **A System Dynamics Approach for Hospital Waste Management**. *Waste Management*, 28, p. 442–449. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6VFR-4NC5SXX-2-1&_cdi=6017&_user=5674931&_orig=search&_coverDate=12%2F31%2F2008&_sk=999719997&view=c&wchp=dGLbVzb-zSkzV&md5=79c10cedd98961eb7f324a3317e93fff&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

CHANGSIRIVATHANATHAMRONG, A.; MOORE, S.; LINARD, K. (2001). **Integrating System Dynamics with Life Cycle Assessment: A Framework for Improved Policy Formulation and Analysis**. In *Proceedings of the 2001 International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM 2001)*, pp. 1213-1218. Disponível em: <<http://www.mssanz.org.au/MODSIM01/Vol%203/Changsirivathanathamrong.pdf>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

CHENG, Y-T; YANG, T. (2005). **Simulation of Design and Analysis of a Container Reverse-Logistics System**. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 22, pp. 189-198. Disponível em: <http://www.jciie.ciie.org.tw:8080/archive/abstract/English/v22/22_3/22_3_1_en.htm>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

CHODAVARAPU, S. K.; ZHENG, A. (2001). **Control System Design for Recycle Systems**. *Journal of Process Control*, 11, pp. 459-468. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4N-43RCR3D-2&_user=604493&_coverDate=10%2F31%2F2001&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=5ae9d09de4d5a6f2953c3c9baa1e1bd5&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

CIMREN, E.; BASSI, A.; FIKSEL, J. (2010). **T21-Ohio, a System Dynamics Approach to Policy Assessment for Sustainable Development: A Waste to Profit Case Study**. *Sustainability* 2010, 2, pp. 2814-2832; doi:10.3390/su2092814. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/2/9/2814/pdf>>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

CRUZ-RIVERA, R.; ERTEL, J. (2009). **Reverse Logistics Network Design for the Collection of End-of-Life Vehicles in Mexico**. *European Journal of Operational Research*, 196, pp. 930-939. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-4SKB3CS-1&_user=604493&_coverDate=08%2F01%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583727175&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=abbbfd951a6c0e41cf1159dba72cb260&searchtype=a>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

DAGANZO, C. F. (1999). **Logistics Systems Analysis**. Berlin: Springer , 3rd edition.

DE, X.; ZHAOXIA, Z. (2009). **A Simulation Model of Recycling Discarded Products**. In *Proceedings of the 2009 International Symposium on Information Processing (ISIP'09)* Huangshan, P. R. China, pp. 294-297. Disponível em <<http://www.academypublisher.com/proc/isip09/papers/isip09p294.pdf>>. Acesso em 8 de dezembro de 2010.

DEMIREL, N. Ö; GÖKÇEN, H. (2008). **A Mixed Integer Programming Model for Remanufacturing in Reverse Logistics Environment**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (11-12), pp. 1197-1206. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/c36842813tu65707/fulltext.pdf>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

DYSON, B.; CHANG, N. (2005). **Forecasting Municipal Solid Waste Generation in a Fast-growing Urban Region with System Dynamics Modeling**. Waste Management 25, pp. 669–679. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6VFR-4F53N41-3-R&_cdi=6017&_user=500342&_orig=browse&_coverDate=12%2F31%2F2005&_sk=999749992&view=c&wchp=dGLbVIW-zSkzV&md5=13288ba0bc0cf4d92bb8ec18fd4a3b14&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

EASWARAN, G.; ÜSTER, H. (2010). **A Closed-loop Supply Chain Network Design Problem with Integrated Forward and Reverse Channel Decisions**. IIE Transactions, 42 (11), pp. 779 — 792. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/smpp/1665105715-31352432/content~content=a927000730~db=all~jumptype=rss>>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

EUROPEAN COMMISSION – EUROPEAN STATISTICS – EUROSTAT (2011). Centro de dados sobre resíduos na união europeia. Disponível em: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastemanagement/recycling>>. Acesso em 01 de novembro de 2011.

_____. (2011a). Centro de dados sobre resíduos na União Europeia. Dados sobre reciclagem de materiais para países da união europeia. Disponível em: <<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>>. Acesso em 01 de novembro de 2011.

_____. (2011b). Centro de dados sobre resíduos na União Europeia. Dados populacionais dos países da união europeia. Disponível em: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&language=en&pcode=tps00001&tableSelection=1&footnotes=yes&labeling=labels&plugin=1>>. Acesso em 01 de novembro de 2011.

FERNANDES, A. C. (2001). **Dinâmica de Sistemas e Business Dynamics: Tratando a Complexidade no Ambiente de Negócios**. Disponível em: <<http://www.gpi.ufrj.br/pdfs/artigos/Fernandes%20-%20Business%20Dynamics%20-%20XXI%20ENEGEP%20-%202001.pdf>>. Acesso em 25 de agosto de 2009.

FLEISCHMANN, M. et al. (1997). **Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review**. *European Journal of Operational Research*, 103, p. 1–17. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-3SX4N5311&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=a3502c313b392d1aeb0c75b19c4b80e7>. Acesso em 09 de junho de 2009.

FLEISCHMANN, M. (2000). **Quantitative Models for Reverse Logistics**. Phd Thesis: Erasmus University, Rotterdam, The Netherlands. Disponível em: <<http://publishing.eur.nl/ir/repub/asset/1044/EPS-2000-002-LIS%2BFLEISCHMANN.pdf>>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

FLEISCHMANN, M. (2001). **Quantitative Models for Reverse Logistics**. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 181 p.

FLEISCHMANN, M. et al. (2003). **Reverse Logistics Network Design**. In: R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth and L.N. Van Wassenhove, Editors, *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*, Berlin: Springer-Verlag (2003), p. 65-94.

FOLHA (2011). **Ribeirão Preto Lidera Ranking de Lixo per Capita na Região**. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/922494-ribeirao-preto-sp-lidera-ranking-de-lixo-per-capita-na-regiao.shtml>>. Acesso em 28 de outubro de 2011.

FORRESTER, J. W. (1961). **Industrial Dynamics**. MIT Press, Cambridge, MA.

GEORGIADIS, P.; ATHANASIOU E. (2009). **The Impact of Two-Product Joint Lifecycles on Capacity Planning of Remanufacturing Networks**. *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2009.05.022. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6VCT-4WBK79X-3-K&_cdi=5963&_user=5674931&_orig=search&_coverDate=05%2F21%2F2009&_sk=99999999&view=c&wchp=dGLbVzz-zSkzV&md5=7d00eb8ff62b5e1742d32eefc653e113&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 25 de agosto de 2009.

GEORGIADIS, P.; BESIOU, M. (2008). **Sustainability in Electrical and Electronic Equipment Closed-Loop Supply Chains: A System Dynamics Approach**. *Journal of*

Cleaner Production, 16, p. 1665-1678. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VFX-4SS8CGJ-1&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=07b6e38cc3ff8caceb26dd393e302110>. Acesso em 04 de março de 2009.

GEORGIADIS, P.; TAGARAS, G.; VLACHOS, D. (2003). **Long-term Analysis of Closed-loop Supply Chains**. In: R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth and L.N. Van Wassenhove, Editors, *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*, Berlin: Springer-Verlag (2003), pp. 313-332.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; TAGARAS, G. (2006). **The Impact of Product Lifecycle on Capacity Planning of Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing**. *Production and Operations Management*, 15(4), p. 514-527. Disponível em: <<http://proquest.umi.com/pqdlink?index=6&did=1288083961&SrchMode=3&sid=1&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1251228035&clientId=18110&aid=2>>. Acesso em 25 de agosto de 2009.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D. (2004a). **Decision Making in Reverse Logistics Using System Dynamics**. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 14, Number 2, p. 259-272. Disponível em: <<http://scindeks-clanci.nb.rs/data/pdf/0354-0243/2004/0354-02430402259G.pdf>>. Acesso em 25 de agosto de 2009.

_____. (2004b). **The Effect of Environmental Parameters on Product Recovery**. *European Journal of Operational Research*; 157(2): 449-464. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VFX-4SS8CGJ-1&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=07b6e38cc3ff8caceb26dd393e302110>. Acesso em 04 de março de 2009.

GUO, T.; LI, M. (2010). **System Dynamics Simulation of Used Productions Recovery Logistics Network for Manufacturing Companies**. In *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, pp. 1-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05554039>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

HANAFI, J.; KARA, S.; KAEBERNICK, H. (2008). **Reverse Logistics Strategies for End-of-life Products**. The International Journal of Logistics Management, 19 (3), pp. 367-388. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1752682&show=abstract>>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

HANS, C. ET AL. (2006). **Decision Support Systems in Plastic Recycling Plants**. In Proceedings of the 2006 World Conference Engineering Asset Management, Paper 229, pp. 1205-1211. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/145703j1p4rlw396/>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

HAO, J.L., HILLS, M. J.; CHAN, S.T. (2002). **An Integrated Simulation Model for Improving Construction Waste Management in Hong Kong**. In Proceedings of the Creating a Sustainable Construction Industry in Developing Countries, CIB, Vol. W107, pp. 563-70. Disponível em: <http://buildnet.csir.co.za/cdcproc/docs/3rd/hao_hills.pdf >. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

HAO, J.L.; HILLS, M. J.; HUANG, T. (2007). **A Simulation Model Using System Dynamic Method for Construction and Demolition Waste Management in Hong Kong**. Construction Innovation; 7 (1), pp. 7-21. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1589126&show=html>>. Acesso em 8 de dezembro de 2010.

HELLSTROM, D.; JOHANSSON, O. (2010). **The Impact of Control Strategies on the Management of Returnable Transport Items**. Transportation Research Part E, 46, pp. 1128–1139. Disponível em: <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-77954309475&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=reverse+logistics+and+simulation&sid=InqxnJv3zDgE_QdyAXe4agz%3a790&sot=b&sdt=b&sl=68&s=TITLE-ABS-KEY%28reverse+logistics+and+simulation%29+AND+PUBYEAR+AFT+1999&relpos=0&elpos=0&searchTerm=TITLE-ABS-KEY%28reverse%20logistics%20and%20simulation%29%20AND%20PUBYEAR%20AFT%201999>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

HOJI, M. (1999). **Administração Financeira: Uma Abordagem Prática**. São Paulo: Atlas, 428p.

HONG, I-H. ET AL. (2006). **Planning the e-Scrap Reverse Production System Under Uncertainty in the State of Georgia: A Case Study**. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 29 (3), pp. 1-13. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01707862>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

HUANG, X. -Y. , YAN, N. -N. AND QIU, R. -Z. (2009). **Dynamic Models of Closed-Loop Supply Chain and Robust H_{∞} Control Strategies**. International Journal of Production Research, 47 (9), pp. 2279-2300. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all?content=10.1080/00207540701636355>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2010). **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse.pdf>>. Acesso em 28 de outubro de 2010.

JAYARAMAN, V; GUIDE Jr., V.D.R.; SRIVASTAVA, R. (1999). **A Closed-Loop Logistics Model for Remanufacturing**. Journal of the Operational Research Society, 50 (5), p. 497-508. Disponível em: <<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=1&did=48249837&SrchMode=3&sid=1&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1258046058&clientId=18110&aid=1>>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

JEONG, H.; KIM, J.; PARK, J. (2007). **The Cost Valuation Model for Reverse Supply Chain using System Dynamics**. Systems Modeling and Simulation, Part 2, Part 8, pp. 173-177. Disponível em <<http://www.springerlink.com/content/n3457621131q37r3/fulltext.pdf>>. Acesso em 8 de dezembro de 2010.

JEUNG KO, H.; EVANS, G. W. (2007). **A Genetic Algorithm-based Heuristic for the Dynamic Integrated Forward/Reverse Logistics Network for 3PLs**. Computers & Operations Research, 34, pp. 346–366. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC5-4G0W77M-3&_user=604493&_coverDate=02%2F28%2F2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583744991&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=031e07ce9fd781fc9b9c138d7f07370d&searchtype=a>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

JIANGHONG, M. (2010). **An Integrated Supply Chain Modeling and Simulation Based on System Dynamics**. In Proceedings of the 2010 International Conference on Management and Service Science (MASS 2010), Wuhan, pp. 1-4. Disponível em: <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-78649422837&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=recycling+and+simulation&sid=InqxnJv3zDgE_QdyAXe4agz%3a280&sot=b&sdt=b&sl=60&s=TITLE-ABS-KEY%28recycling+and+simulation%29+AND+PUBYEAR+AFT+1999&relpos=10&relpos=10&searchTerm=TITLE-ABS-KEY%28recycling%20and%20simulation%29%20AND%20PUBYEAR%20AFT%201999>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

KANNAN, G.; NOORUL HAQ, A.; DEVIKA, M. (2009). **Analysis of Closed Loop Supply Chain using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization**. International Journal of Production Research, 47 (5), pp. 1175–1200. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/smpp/83308496-59164524/content~db=all~content=a783423624~frm=abslink>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

KANNAN, G.; SASIKUMAR, P.; DEVIKA, K. (2010). **A Genetic Algorithm Approach for Solving a Closed Loop Supply Chain Model: A Case of Battery Recycling**. Applied Mathematical Modelling, 34, pp. 655–670. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TYC-4WH8CD3-1&_user=604493&_coverDate=03%2F31%2F2010&_alid=1585857465&_rdoc=23&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5615&_sort=r&_st=4&_docanchor=&_ct=4309&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=dd0410665ed938c24577a52c75fdc699&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

KARA, S.; RUGRUNGRUANG, F.; KAEBERNICK, H. (2007). **Simulation Modelling of Reverse Logistics Networks**. *International Journal of Production Economics*, 106, pp. 61–69. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6VF8-4K66DYW-1-C&_cdi=6004&_user=604493&_pii=S0925527306000806&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_coverDate=03%2F31%2F2007&_sk=998939998&wchp=dGLbVlz-zSkzV&md5=9bb1b58e56b752f906d3c324a4a23ba1&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 21 de dezembro de 2010.

KARAVEZYRIS, V.; TIMPE, K-P; MARZI, R. (2002). **Application of System Dynamics and Fuzzy Logic to Forecasting of Municipal Solid Waste**. *Mathematics and Computers in Simulation*, 60, pp. 149–158. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImg&_imagekey=B6V0T-45FSV5S-1-R&_cdi=5655&_user=5674931&_orig=browse&_coverDate=09%2F30%2F2002&_sk=99939996&view=c&wchp=dGLbVIW-zSkzV&md5=a38be9237c2e8f4ab278b9ee28be932f&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

KAWA, A.; GOLINSKA, P. (2010). **Supply Chain Arrangements in Recovery Network**. *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications – Lectures Notes in Computer Science*, 6071, pp. 292-301. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/8w51k22634433150/>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

KLEINEIDAM, U. ET AL. (2000). **Optimising Product Recycling Chains by Control Theory**. *International Journal of Production Economics*, 66, pp. 185-195. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF8-40GJF8G-9/2/a6883525a3c34ff36ffd74259723a749>>. Acesso em 17 de dezembro de 2010.

KOLLIKATHARA, N.; FENG, H.; YU, D. (2010). **A System Dynamic Modeling Approach for Evaluating Municipal Solid Waste Generation, Landfill Capacity and Related Cost Management Issues**. *Waste Management*, 30, pp. 2194–2203. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VFR-509GPXP-1&_user=604493&_coverDate=11%2F30%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersio>

n=0&_userid=604493&md5=ea6eee33b512fc4045e3b0e9bcd95688&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

KRIKKE, H.R.; VAN HARTEN, A.; SCHUUR, P.C. (1999). **Business Case Océ: Reverse Logistic Network Re-Design for Copiers**. *OR Spektrum*, 21 (3), p. 381–409. Disponível em: <<http://www.springerlink.com.w10077.dotlib.com.br/content/y78t64eb9r86m8cx/fulltext.pdf>>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

KRIKKE, H.R.; BLOEMHOF, J.; VAN WASSENHOVE, L. (2003). **Concurrent Product and Closed-Loop Supply Chain Design with an Application to Refrigerators**. *International Journal of Production Research*; 41(16), p. 3689–3719. Disponível em: <<http://www.ise.ufl.edu/akcali/CLSC/Network%20design/KBRW-IJPR.pdf>>. Acesso em 25 de outubro de 2011.

KUMAR, S.; YAMAOKA, T. (2007). **System Dynamics Study of the Japanese Automotive Industry Closed Loop Supply Chain**. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 18 (2), p. 115–138. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/Insight/viewPDF.jsp?contentType=Article&Filename=html/Output/Published/EmeraldFullTextArticle/Pdf/0680180201.pdf>>. Acesso em 13 de novembro de 2009.

KUMAZAWA, T.; KOBAYASHI, H. (2006). **A Simulation System to Support the Establishment of Circulated Business**. *Advanced Engineering Informatics*, 20, pp. 127–136. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6X1X-4JMM07B-3&_user=604493&_coverDate=04%2F30%2F2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1586043675&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=c94748723f9892d2e59ab6177705111e&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

KWAN TAN, A. W.; KUMAR, A. (2006). **A Decision-Making Model for Reverse Logistics in the Computer Industry**. *The International Journal of Logistics Management*, 17 (3), pp. 331-354. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1581980>>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

LACERDA, L. (2002). **Logística Reversa: Uma Visão sobre os Conceitos Básicos e as Práticas Operacionais**. Revista Tecnológica, Janeiro/2002.

LEHR, C.; MILLING, P. M. (2009). **From Waste to Value – A System Dynamics Model for Strategic Decision Making in Closed-Loop Supply Chains**. In: 27th International Conference of the System Dynamics Society, July 26–30, 2009; Albuquerque USA. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2009/proceed/papers/P1294.pdf>>. Acesso em 13 de novembro de 2009.

LEITE, P. R. (2003). **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Prentice Hall, 250 p.

LIECKENS, K.; VANDAELE, N. (2006). **Reverse Logistics Network Design with Stochastic Lead Times**. Computers and Operations Research 34, p. 395-416. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6VC5-4G1V66P-2-1&_cdi=5945&_user=5674931&_orig=search&_coverDate=02%2F28%2F2007&_sk=999659997&view=c&wchp=dGLzVtb-zSkzS&md5=1d04d02f21e0b187c69a35e132b261a5&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 07 de novembro de 2009.

LIM, S.-K.; KIM, Y.-D. (1999). **An Integrated Approach to Dynamic Plant Location and Capacity Planning**. Journal of the Operational Research Society, 50, p. 1205-1216. Disponível em: <<http://proquest.umi.com/pqdweb?index=5&did=47679200&SrchMode=1&sid=2&Fmt=6&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1256826940&clientId=18110>>. Acesso em 29 de outubro de 2009.

LISTES, O.; DEKKER, R. (2005). **A Stochastic Approach to a Case Study for Product Recovery Network Design**. European Journal of Operational Research, 160, p. 268–287. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-4B3MTGD-3&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1091602330&_rerunOrigin=google&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=7c865d346c99dd0309b07ca508e73e59>. Acesso em 13 de novembro de 2009.

LU, Z.; BOSTEL, N. (2007). **A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows: The Case of Remanufacturing Activities**. *Computers & Operations Research*, 34, pp. 299–323. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC5-4G0002F-1&_user=604493&_coverDate=02%2F28%2F2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583716178&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=6e5354e41c fbb881b6278ea829a1e4db&searchtype=a>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

MAJUMDER, P.; GROENEVELT, H. (2001). **Competition in Remanufacturing**. *Production and Operations Management*, 10 (2), pp. 1-17. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00074.x/pdf>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

MARQUES, C. S. A.; FERREIRA, I. V. L.; AGUIAR, E. M. (2002). **A Logística Reversa e o Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. In: VI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos – ABES – Trabalhos Técnicos. Gramado, RS.

MATSUMOTO, M. (2010). **Development of a Simulation Model for Reuse Businesses and Case Studies in Japan**. *Journal of Cleaner Production*, 18, pp. 1284-1299. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VFX-4YXP17X-2&_user=604493&_coverDate=09%2F30%2F2010&_alid=1586076236&_rdoc=29&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=6022&_sort=r&_st=4&_docanchor=&_ct=1850&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=4c86ac1eb0421df734ee4c4bcba727ba&searchtype=a>. Acesso em 25 de outubro de 2011.

MIN, H.; KO, H.-J. (2008). **The Dynamic Design of a Reverse Logistics Network from the Perspective of Third-Party Logistics Service Providers**. *International Journal of Production Economics*, 113, pp. 176–192. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VF8-4P8B0RH-D&_user=604493&_coverDate=05%2F31%2F2008&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583173887&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=357fe589292f35f360a6ea58fbad8d98&searchtype=a>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

MIN, H.; KO, H-J.; KO, C. S. (2006). **A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-Echelon Reverse Logistics Network for Product Returns**. Omega 34, p. 56-69. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6VC4-4DGMP69-1-1&_cdi=5944&_user=5674931&_orig=na&_coverDate=01%2F31%2F2006&_sk=999659998&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkWA&md5=690b01832daec909764e4fca917c5ee6&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 07 de novembro de 2009.

MITRA, S.; WEBSTER, S. (2008). **Competition in Remanufacturing and the Effects of Government Subsidies**. International Journal of Production Economics, 111, pp. 287–298. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VF8-4NT84NY-B&_user=604493&_coverDate=02%2F29%2F2008&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1587686853&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=b5e82b4012bf34616f5877cdf2f07cb&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

MUKHOPADHYAY, S. K.; SETAPUTRA, R. (2006). **The Role of 4PL as the Reverse Logistics Integrator: Optimal Pricing and Return Policies**. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 36 (9), pp. 716-729. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1576166&show=html>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

NETO, T. C. (2003). **Introdução à Dinâmica de Sistemas**. Disponível em: <<http://www.corbett.pro.br/introds.pdf>>. Acesso em 08 de junho de 2008.

PATI, R. K.; VRAT, P. (2010). **Economic Paper Blending Optimization Model with Competing Materials**. Management of Environmental Quality: An International Journal, 21 (5), pp. 602-617. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1878277&show=html>>. Acesso em 10 de janeiro de 2011.

PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. (2006). **Economic Analysis of Paper Recycling vis- à-vis Wood as Raw Material**. International Journal of Production Economics, 103 (2),

pp. 489-508. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VF8-4K4WH1T-1/2/f21e923be4893275720b18f005246f6f>>. Acesso em 10 de janeiro de 2011.

PATI, R. K.; VRAT, P.; KUMAR, P. (2008a). **A MILP Model for Design of Paper Recycling Network**. International Journal of Ecology and Development, 9 (W08), pp. 69-86. Disponível em: <<http://ceser.res.in/ceserp/index.php/ijed/article/viewArticle/431>>. Acesso em 10 de janeiro de 2011.

_____. (2008b). **A Goal Programming Model for Paper Recycling System**. Omega, 36, pp. 405 – 417. Disponível em: <<http://dspace.iimk.ac.in/bitstream/2259/601/1/out.html>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

PIDD, M. (1998). **Modelagem Empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão**. Porto Alegre: Bookman, 314p.

PISHVAEE, M. S.; RABBANI, M.; TORABI, S. A. (2011). **A Robust Optimization Approach to Closed-loop Supply Chain Network Design Under Uncertainty**. Applied Mathematical Modelling, 35, pp. 637–649. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TYC-50HP310-3&_user=604493&_coverDate=02%2F28%2F2011&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583190210&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=de8feb4ffb3dad6716a0032c083d35d1&searchtype=a>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – PNRS (2010). **Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 05 de novembro de 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS – PMSC (2010). **Informações Gerais da coleta seletiva em São Carlos**. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/>>. Acesso em 14 de agosto de 2011.

_____. (2011). Tabelas com os desempenhos anuais da coleta seletiva em São Carlos do período de 2004 a 2010 preparados pela prefeitura municipal de São Carlos.

_____. (2012). **Conheça São Carlos**. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos.html>>. Acesso em 02 de abril de 2012.

QIN, Z.; JI, X. (2010). **Logistics Network Design for Product Recovery in Fuzzy Environment**. *European Journal of Operational Research*, 202, pp. 479–490. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-4WF4J3B-5&_user=604493&_coverDate=04%2F16%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583754691&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=3869e53227ec93f4e32ab5353639649c&searchtype=a>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

QINGLI, D.; HAO, S.; HUI, Z. (2008). **Simulation of Remanufacturing in Reverse Supply Chain Based on System Dynamics**. *Proceedings of the International Conference on Service Systems and Service Management 2008*, Melbourne, VIC, pp. 1-6. Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4598447>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

REALFF, M. J.; AMMONS, J. C.; NEWTON, D. J. (1999). **Carpet Recycling: Determining the Reverse Production System Design**. *The Journal of Polymer-Plastics Technology & Engineering*, Volume 38, Issue 3, p. 547–567. Disponível em: <http://pdfserve.informaworld.com/747968_793539726_792436714.pdf>. Acesso em 13 de novembro de 2009.

_____. (2004). **Robust Reverse Production System Design for Carpet Recycling**. *IIE Transactions*, Volume 36, Issue 8, p. 767 – 776. Disponível em: <<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a713772415>>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. (1998). **Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices**. Universidade of Nevada, Reno. Disponível em: <<http://www.rlec.org/reverse.pdf>>. Acesso em 12 de junho de 2006.

RONG, L. (2004). **Using System Dynamics in Decision Support for Sustainable Waste Management**. M.S. Degree Thesis: National Institute of Singapore. Disponível em:

<<https://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/10635/15595/LRong.pdf?sequence=1>>.
Acesso em 12 de dezembro de 2010.

SCHULTMANN, F.; ENGELS, B.; RENTZ, O. (2003). **Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries**. *Interfaces* 33, p. 57-71. Disponível em: <<http://interfaces.journal.informs.org/cgi/reprint/33/6/57>>. Acesso em 07 de novembro de 2009.

SCHULTMANN, F.; ENGELS, B.; RENTZ, O. (2004). **Flowsheeting-based Simulation of Recycling Concepts in the Metal Industry**. *Journal of Cleaner Production*, 12, pp. 737-751. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6VFX-48M7SJW-3-1V&_cdi=6022&_user=604493&_pii=S0959652603000507&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_coverDate=09%2F30%2F2004&_sk=999879992&wchp=dGLbVlzSkzV&md5=f4a015dd3f9f47180912fdf59aca4883&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

SHANKAR, R.; RAVI, V.; TIWARI, M. K. (2008). **Analysis of Interaction Among Variables of Reverse Logistics: A System Dynamics Approach**. *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 4, No.1, pp.1 - 20. Disponível em: <http://www.inderscience.com/search/index.php?mainAction=search&action=record&rec_id=15925&prevQuery=&ps=10&m=or>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

SINGER, M.; DONOSO, P.; TRAVERSO, P. (2003). **Quality Strategies in Supply Chain Alliances of Disposable Items**. *Omega*, 31, pp. 499 - 509. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC4-49KH8BB-2&_user=604493&_coverDate=12%2F31%2F2003&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1587075190&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=f79db94e3c1e071bc4650dbc5285a68c&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

SPENGLER, T. et al. (1997). **Environmental Integrated Production and Recycling Management**. *European Journal of Operational Research*, 97, p. 308-326. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6VCT-3SWV8DN-8-2&_cdi=5963&_user=5674931&_orig=search&_coverDate=03%2F01%2F1997&_sk=999029997&view=c&wchp=dGLbVIW-

zSkWz&md5=63e4c686e63e84a18a7d6f13a119e40e&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 12 de novembro de 2009.

SPENGLER, T.; SCHRÖTER, M. (2003). **Strategic Management of Spare Parts in Closed-Loop Supply Chains – A System Dynamics Approach**. *Interfaces*, 33(6), p. 7–17. Disponível em: <<http://interfaces.journal.informs.org.w10077.dotlib.com.br/cgi/reprint/33/6/7?maxtoshow=&HITS=10&hits=10&RESULTFORMAT=&searchid=1&FIRSTINDEX=0&sortspec=relevanc e&volume=33&resourcetype=HWCIT>>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

SRIVASTAVA, S. K.; SRIVASTAVA, R. K. (2006). **Managing Product Returns for Reverse Logistics**. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36 (7), pp. 524-546. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1563524&show=abstract>>. Acesso em 17 de dezembro de 2010.

STAVE, K. A. (2008). **Zero Waste by 2030: A System Dynamics Simulation Tool for Stakeholder Involvement in Los Angeles' Solid Waste Planning Initiative**. In *Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society*, Athens, Greece, pp. 1-12. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/STAVE416.pdf>>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

STERMAN, J. D. (2000). **Business Dynamics**. *Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw Hill Higher Education.

SUFIAN, M. A.; BALA, B. K. (2007). **Modeling of Urban Solid Waste Management System: The Case of Dhaka City**. *Waste Management* 27, pp. 858–868. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MiamiImageURL&_imagekey=B6VFR-4K66DY7-1-2&_cdi=6017&_user=604493&_pii=S0956053X06001395&_check=y&_origin=search&_coverDate=12%2F31%2F2007&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkzS&md5=73223fece39275a72d818c639d16e12f&ie=/sdarticle.pdf>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

THIERRY, M. et al. (1995). **Strategic Issues in Product Recovery Management**. California Management Review, 37(2):79-85.

TUZKAYA, G.; GÜLSÜN, B., (2008). **Evaluating Centralized Return Centers in a Reverse Logistics Network: An Integrated Fuzzy Multi-criteria Decision Approach**. International Journal of Environmental Science and Technology, 5 (3), pp. 339-352. Disponível em: <http://www.ceers.org/ijest/issues/abstract_result.asp?ID=503007>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

ULLI-BEER, S. (2003). **Dynamic Interactions Between Citizen Choice and Preferences and Public Policy Initiatives – A System Dynamics Model of Recycling Dynamics in a Typical Swiss Locality**. In Proceedings of the 2003 International Conference of the System Dynamics Society. New York City, U.S.A., pp. 1-40. Disponível em: <http://www.ikaoe.unibe.ch/personen/ulli-beer/dynamic_interactions.pdf>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

UMOH, U. A.; NWACHUKWU, E. O.; OKURE, O. E. (2010). **Fuzzy Rule-based Framework for Effective Control of Profitability in a Paper Recycling Plant**. Global Journal of Computer Science and Technology, 56 (10), pp. 1-12. Disponível em: <<http://computerresearch.org/stpr/index.php/gjcst/article/viewArticle/367>>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA (2009). **Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2009**, pp. 1-12. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2009-fs.pdf>>. Acesso em 01 de novembro de 2011.

VAMVAKERIDOU-LYROUDIA, L.S.; SAVIC, D.A. (2008). **System Dynamics Modeling: The Kremikovtzi Water System**. University of Exeter, Center for Water Systems, Report No: 2008/01, pp. 1-132. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&source=web&cd=95&ved=0CDwQFjAEOFo&url=http%3A%2F%2Fcentres.exeter.ac.uk%2Fcws%2Fdownloads%2Fdoc_download%2F29-aquastress-system-dynamics-modelling-the-kremikovtzi-water-system&rct=j&q=recycling%20system%20dynamics&ei=tL4ETdCbG5mU4gbT6ayUCg&us>

g=AFQjCNFYGzxr6J3g5IfnnrzvLF3ObBk7Vg&cad=rja >. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

VAN SCHAİK, A.; REUTER, M. A. (2010). **Dynamic Modelling of E-waste Recycling System Performance Based on Product Design**. *Minerals Engineering*, 23, pp. 192–210. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VDR-4XFNCS1-1&_user=604493&_coverDate=02%2F28%2F2010&_alid=1586069506&_rdoc=25&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5989&_sort=r&_st=4&_docanchor=&_ct=3044&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=2b193527f2f5a729c2b9a487d44b4b69&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

VÁSQUEZ, O. (2005). **Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile**. *Revista de Dinámica de Sistemas*; 1 (1), pp. 27-52. Disponível em: <http://dynamicsistemas.otalca.cl/Revista/Vol1Num1/vasquez_residuos.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2010.

VILLELA, P. R. C. (2005). **Introdução à Dinâmica de Sistemas** (Mini Curso).

VLACHOS, D.; GEORGIADIS, P.; IAKOVOU, E. (2007). **A System Dynamics Model for Dynamic Capacity Planning of Remanufacturing in Closed-Loop Supply Chains**. *Computers & Operations Research*, 34, p. 367–394. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC5-4G1PKMG-1&_user=5674931&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000049650&_version=1&_urlVersion=0&_userid=5674931&md5=11d4437ade42bdba03d336e639ecd42e>. Acesso em 04 de março de 2009.

XU, Z. (2010). **System Dynamics Model of the Third Party Take-back System for E-waste**. In *Proceedings of the 2010 7th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM 2010) Tokyo*, pp. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05530220>>. Acesso em 12 de dezembro de 2010.

YONG, L. (2010). **A System Dynamics Approach for Corporate Waste Recycling Capacity and Income**. In Proceedings of the 2010 International Conference on E-Business and E-Government, pp. 1-4. Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5591435&tag=1>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

WADHWA, S.; MADAAN, J.; CHAN, F.T.S. (2009). **Flexible Decision Modeling of Reverse Logistics System: A Value Adding MCDM Approach for Alternative Selection**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25, pp. 460–469. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4P-4S97JBN-1&_user=604493&_coverDate=04%2F30%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1583166090&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=1fd5a09420d3320f6ff65d7b55bd2652&searchtype=a>. Acesso em 18 de dezembro de 2010.

WÄGER, P. A.; HILTY, L. M. (2002). **A Simulation System for Waste Management – From System Dynamics Modelling to Decision Support**. In: Rizzoli A.E. and Jakeman A.J. Integrated Assessment and Decision Support. Proceedings of the 1st biennial meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, Lugano, June 24-27. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20uno/146_waeger.pdf>. Acesso em 14 de novembro de 2009.

WANG, C.; DING, X. (2009). **Analysis on the Impact of Reverse Logistics on the Dynamic Behaviors in a Two-stage Supply Chain**. In Proceedings of the 2009 International Conference on Management of e-Commerce and e-Government, pp. 1-4. Disponível em <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5279929>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY (2011). **Generation, Recycling and Per Capita data (1986-2009)**. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/programs/swfa/solidwastedata/recyclin.asp> >. Acesso em 01 de novembro de 2011.

ZHOU, G. ET AL. (2005). **A Genetic Algorithm Approach on Reverse Logistics Optimization for Product Return Distribution Network**. Computational Intelligence and

Security Lecture Notes in Computer Science, 3801, pp. 267-272. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/q0wkv606q7123057/>>. Acesso em 19 de dezembro de 2010.

ZHOU, L. ET AL. (2006). **Dynamic Performance of a Hybrid Inventory System with a Kanban Policy in Remanufacturing Process**. Omega, 34, pp. 585 – 598. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VC4-4FMHSS1-1&_user=604493&_coverDate=12%2F31%2F2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1584392625&_rerunOrigin=google&_acct=C000059656&_version=1&_urlVersion=0&_userid=604493&md5=7459e0894be7317378d74b36ad1e0f12&searchtype=a>. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

APÊNDICE A

A.1 – PARÂMETROS DO CENÁRIO BÁSICO

Primeiramente são apresentados os parâmetros do cenário básico, a saber:

- O horizonte de planejamento é de 60 meses, ou cinco anos, iniciando em janeiro de 2011 e finalizando em dezembro de 2015;
- Todos os dados inseridos no modelo são referentes a dezembro de 2010;
- Todos os estoques de material coletado para a parametrização são iguais a 80 toneladas/mês. Em contrapartida, para a simulação final dos cenários, os estoques de material coletada no início do horizonte de planejamento são iguais a 120 toneladas/mês;
- O estoque da população e trabalhadores é igual a 220.000 habitantes e 37 trabalhadores, respectivamente, para o ano de 2010;
- A duração de todas as atividades é atribuída em meses;
- A porcentagem de produtos rejeitados é de 0,003 %. O valor é praticamente nulo pois a triagem nos domicílios é bem realizada e apenas sobram resíduos que ainda não possuem técnicas de reciclagem e aqueles que são confundidos como recicláveis e enviados para a coleta;
- Os materiais vendidos são iguais aos coletados à título de simulação da análise;
- O custo de transporte é fixo, pois a prefeitura contrata uma empresa terceirizada para executar esta atividade;
- O custo de capital é baseado no investimento bancário atual para a situação em que a prefeitura deixa de investir em outro tipo de iniciativa;
- As capacidades de coleta e reciclagem são fixas pois o objetivo da pesquisa não está no planejamento das capacidades.

A.2 – VARIÁVEIS DO MODELO

A.2.1 – Variáveis de Estoque

As variáveis de estoque, na ordem que aparecem na rede de reciclagem em estudo, são as seguintes:

- **População:** número de habitantes em São Carlos a partir do levantamento do último IBGE em 2010 [habitantes];
- **Produtos Dispostos Descontroladamente:** estoque de produtos recicláveis que não são inseridos propriamente ao processo de reciclagem do programa de coleta seletiva [toneladas];
- **Produtos Usados:** estoque de produtos que já foram utilizados e não tem mais funcionalidade, ou seja, tem cessado seu ciclo de vida [toneladas];
- **Produtos Coletados:** estoque de produtos que foram coletados pelo programa de coleta seletiva municipal em estudo [toneladas];
- **Produtos Coletados sob Triagem:** estoque de produtos coletados que estão pronto para ser separados (sendo o único processo executado pela cooperativa) [toneladas];
- **Produtos Dispostos Controladamente:** estoque de produtos que foram separados porém não podem ser reaproveitados para reuso, ou seja, não avançam para o próximo processo da cadeia e são propriamente dispostos controladamente [toneladas];
- **Produtos Reusáveis:** estoque de produtos que podem ser aproveitados para reuso e avançam para o próxima etapa da cadeia [toneladas];
- **Produtos Reciclados:** estoque de produtos que foram realizadas as etapas de compressão e acondicionamento e posteriormente serão vendidos [toneladas];
- **Trabalhadores:** número de empregados na cooperativa a partir dos dados coletados em 2010 [trabalhadores].

A.2.2 – Variáveis de Fluxo

As variáveis de fluxo seguem de acordo com a ordem de suas respectivas variáveis de estoque, que são:

-
- **Nascimentos:** taxa de natalidade para a cidade de São Carlos calculada mensalmente [habitantes/mês];
 - **Mortes:** taxa de mortalidade para a cidade de São Carlos calculada mensalmente [habitantes/mês];
 - **Disposição Descontrolável:** produtos recicláveis consumidos pela população, em que são dispostos erroneamente como resíduos sólidos domiciliares, coletados por coleta municipal convencional [toneladas/mês];
 - **Produtos no fim do Período de Uso:** produtos que foram consumidos e não possuem mais atratividade ao consumidor [toneladas/mês];
 - **Taxa Coleta:** quantidade de produtos usados coletados pela cooperativa por mês [toneladas/mês];
 - **Transporte ao Centro de Triagem:** quantidade de material coletado enviado ao centro de triagem por mês [toneladas/mês];
 - **Produtos Rejeitados para Reuso:** taxa de produtos que mesmo coletados não tem aproveitamento para o processo de reciclagem; esses produtos são dispostos propriamente em disposições finais adequadas [toneladas/mês];
 - **Produtos Aceitos para Reuso:** taxa de produtos que são separados em 8 categorias (papel, vidro, plástico, metal, tetra pak, PET e outros) e podem ser reciclados [toneladas/mês];
 - **Taxa Reciclagem:** quantidade de produtos que são ou comprimidos ou acondicionados mensalmente [toneladas/mês];
 - **Vendas:** quantidade de material reciclado vendido por mês, dividido em 8 categorias [toneladas/mês];
 - **Contratações:** quantidade de admissão de trabalhadores por mês [trabalhadores/mês];
 - **Demissões/Outros:** quantidade de trabalhadores demitidos (ou porque saíram por algum outro motivo) mensalmente [trabalhadores/mês].

A.2.3 – Conversores e Constantes

Os conversores e constantes constituem a estrutura fina de uma variável de fluxo; estas são apresentadas a seguir:

-
- **Consumo Médio Mensal:** consumo médio de produtos (propícios para a reciclagem) por mês para a cidade de São Carlos [toneladas/mês];
 - **Unidade per Capita:** quantidade de material consumido (propício para a reciclagem) por habitante por mês para a cidade de São Carlos [toneladas/habitante/mês];
 - **Fertilidade:** quantidade de nascimentos por mês para a cidade de São Carlos [1/mês];
 - **Longevidade Média:** tempo de vida médio para os cidadãos de São Carlos calculada mensalmente [mês];
 - **Consumo Total:** distribuição normal sobre o consumo médio mensal, para refletir uma análise estatística do consumo que represente o cenário real [toneladas/mês];
 - **Produtos Consumidos sem Atraso:** quantidade de produtos que são consumidos até um mês após sua primeira utilização [toneladas/mês];
 - **Produtos Consumidos com Atraso:** quantidade de produtos que são consumidos em mais de um mês após sua primeira utilização [toneladas/mês];
 - **% PC até 1 mês:** porcentagem de produtos consumidos com um tempo de atraso de até um mês [adimensional];
 - **Produtos Consumidos após Atraso:** quantidade de produtos consumidos sob o efeito de atraso de material de ordem 3 e tempo médio de atraso [toneladas/mês];
 - **Tempo Médio PCA:** tempo médio para o atraso dos produtos consumidos a mais de um mês após sua primeira utilização [mês];
 - **Consumo Total após Atraso:** soma dos produtos consumidos sem atraso com aqueles consumidos após atraso [toneladas/mês];
 - **Consumo Médio:** consumo médio sob o consumo total após atraso usando atraso de informação de ordem 1 e fator de suavização ‘a C’ [toneladas/mês];
 - **Taxa Coleta Média:** taxa de coleta média sob a taxa de coleta usando atraso de informação de ordem 1 e fator de suavização ‘a TC’ [toneladas/mês];
 - **Index 1_Cumprimento Legislação:** relação entre a taxa de coleta média e o consumo médio [adimensional];
 - **Index 2_Comportamento Reciclagem:** relação entre o somatório de vendas e a taxa de coleta média [adimensional];

-
- **Index Final:** o produto entre o Index 1_cumprimento Legislação e o Index 2_compotamento reciclagem [adimensional];
 - **Cenários:** um dos tipos de cenários aplicados ao modelo, sendo este representando o da legislação ambiental [adimensional];
 - **Porcentagem Esperada:** representa em forma de gráficos os cenários para a legislação ambiental – normal, otimista e pessimista – para se obter a porcentagem esperada para o específico caso [adimensional];
 - **Porcentagem Atual:** porcentagem atual sob o efeito de atraso de material de ordem 3 e tempo médio de atraso. Ademais, esta porcentagem representa os produtos que são depositados pelos cidadãos para o programa de coleta seletiva [adimensional];
 - **Tempo Médio P:** tempo médio de atraso que se leva após a implantação da legislação ambiental para a sociedade assimilar a nova política e assim estabelecer a porcentagem atual [mês];
 - **Tempo Coleta:** tempo médio necessário para a organização coletar os produtos recicláveis em rotas e circuitos delimitados [mês];
 - **Capacidade Coleta:** capacidade máxima de material coletado que o programa consegue gerenciar ao longo do mês [toneladas/mês];
 - **Tempo Transporte CT:** tempo médio necessário para transportar os produtos coletados ao centro de triagem [mês];
 - **% Produtos Rejeitados:** Porcentagem de produtos coletados e triados que não tem qualquer utilidade reciclável e, por isso, não continuam no processo seguinte do sistema [adimensional];
 - **Tempo Triagem:** tempo médio necessário para a triagem dos produtos coletados em: aceitáveis para reuso, rejeitados para reuso e entre tipos de produtos [mês];
 - **Soma Produtos Aceitos Reuso:** somatória dos diferentes tipos de produtos aceitos para reuso [toneladas/mês];
 - **Tempo Reciclagem:** tempo médio necessário para comprimir ou empacotar os produtos reusáveis. Devido ao tempo não ser tão diferente entre ambos os processos, adota-se um único tempo de reciclagem [mês];

- **Capacidade Reciclagem:** capacidade máxima de material reciclado que o programa consegue gerenciar para cada tipo de processo (compressão e acondicionamento). Neste caso é adotado dois tipos de capacidade, dependendo do tipo do material pois este que define o processo de reciclagem de acordo com sua característica [toneladas/mês];
- **Soma Taxa de Reciclagem:** somatória da taxa de reciclagem para os diferentes tipos de produtos [toneladas/mês];
- **Tempo Venda Recicláveis:** tempo médio necessário para vender os produtos recicláveis para os agentes interessados, a saber: indústrias de matérias-primas e/ou de recicláveis e, intermediários ou sucateiros [mês];
- **Soma Vendas:** somatória de venda para os diferentes tipos de produtos [toneladas/mês].

A.2.4 – Parâmetros de Receita/Custos

Os parâmetros de receita/custos do modelo são:

- **Aumento:** aumento de trabalhadores por mês na organização estudada [1/mês];
- **Abstenção Média:** tempo médio que um empregado para de trabalhar na organização por qualquer motivo (pede demissão, muda de emprego ou é demitido) [mês];
- **Salário:** salário para cada trabalhador da organização por mês (salário mínimo estipulado pelo governo) [R\$/mês/trabalhador];
- **Custo Mão-de-Obra:** custo total da mão-de-obra na organização estudada por mês [R\$/mês];
- **Preços:** preços de venda para as 8 categorias de material reciclável definidas [R\$/toneladas];
- **Receita Total por Período:** receita total por mês [R\$/mês];
- **Soma Receita Total por Período:** somatória da receita total das 8 categorias de produtos vendidos [R\$/mês];
- **Custo Triagem por Unidade:** custo de triagem por tonelada [R\$/toneladas];
- **Custo Triagem:** custo total de triagem por mês [R\$/mês];
- **Custo Novas Tecnologias:** custo de novos equipamentos/maquinários por mês [R\$/mês];
- **Custo Transporte:** custo total fixo de transporte por mês [R\$/mês];

-
- **Despesas Cooperativa:** despesa total com a conservação da cooperativa por mês [R\$/mês];
 - **Custo Coleta por Unidade:** custo de coleta por tonelada [R\$/toneladas];
 - **Custo Coleta:** custo total de coleta por mês [R\$/mês];
 - **Custo Reciclagem por Unidade:** custo de reciclagem (compressão e acondicionamento) por tonelada [R\$/toneladas];
 - **Custo Reciclagem:** custo total de reciclagem (compressão e acondicionamento) por mês [R\$/mês];
 - **Custo Capital:** representa o caso da área do galpão poder ser investida em um estabelecimento qualquer, com um taxa de juros de banco do país estudado [adimensional];
 - **Gastos Armazém:** despesa total com aspectos físicos do armazém por mês [R\$/mês];
 - **Custo Armazenagem:** custo total de armazenagem, incluindo os fixos e variáveis, por mês [R\$/mês];
 - **Custo Total por Período:** somatória de todos os custos incluídos no modelo por mês [R\$/mês];
 - **Lucro Total por Período:** diferença entre a receita total por mês e o custo total por mês [R\$/mês];
 - **Fator Desconto:** taxa de juros para o Valor Presente Líquido por mês [%/mês] (como a taxa de juros usual é 12% ao ano, com isso a taxa mensal equivale a 1% ao mês);
 - **Lucro Total Cadeia Suprimento:** lucro total da cadeia de suprimento por mês, calculada pelo método do Valor Presente Líquido (VPL). Desde que o horizonte de planejamento do modelo é mensal, o VPL é também calculado mensalmente [R\$/mês].

APÊNDICE B

B.1 – EQUAÇÕES DO MODELO

B.1.1 – Variáveis de Estoque

- População (0) = 220.000

$$\begin{aligned} \text{População } (t + dt) = & \qquad \qquad \qquad \text{População } (t) \\ & + dt * \text{Nascimentos} \\ & - dt * \text{Mortes} \end{aligned}$$

- Produtos Dispostos Descontroladamente (0) = 0

$$\begin{aligned} \text{Produtos Dispostos Descontroladamente } (t + dt) = & \text{Produtos Dispostos Descontrolad. } (t) \\ & + dt * \text{Disposição Descontrolável} \end{aligned}$$

- Produtos Usados (0) = 120

$$\begin{aligned} \text{Produtos Usados } (t + dt) = & \qquad \qquad \qquad \text{Produtos Usados } (t) \\ & - dt * \text{Taxa Coleta} \\ & + dt * \text{Produtos no fim do Período de Uso} \end{aligned}$$

- Produtos Coletados (0) = 120

$$\begin{aligned} \text{Produtos Coletados } (t + dt) = & \qquad \qquad \qquad \text{Produtos Coletados } (t) \\ & - dt * \text{Transporte ao CT} \\ & + dt * \text{Taxa Coleta} \end{aligned}$$

- Produtos Coletados sob Triagem (0) = 120

$$\begin{aligned} \text{Produtos Coletados sob Triagem } (t + dt) = & \text{Produtos Coletados sob Triagem } (t) \\ & - dt * \text{Produtos Rejeitados para Reuso} \\ & - dt * \text{Produtos Aceitos para Reuso} \\ & + dt * \text{Transporte ao CT} \end{aligned}$$

- Produtos Dispostos Controladamente (0) = 0

$$\begin{aligned} \text{Produtos Dispostos Controladamente } (t + dt) = & \text{Produtos Dispostos Controladamente } (t) \\ & + dt * \text{Produtos Rejeitados para Reuso} \end{aligned}$$

- Produtos Reusáveis (0) = {62,4; 16,8; 14,4; 12; 7,2; 4,8; 1,2; 1,2}
 Produtos Reusáveis ($t + dt$) = $\text{Produtos Reusáveis } (t)$
 $- dt * \text{Taxa reciclagem}$
 $+ dt * \text{Produtos Aceitos para Reuso}$
- Produtos Reciclados (0) = {62,4; 16,8; 14,4; 12; 7,2; 4,8; 1,2; 1,2}
 Produtos Reciclados ($t + dt$) = $\text{Produtos Reciclados } (t)$
 $- dt * \text{Vendas}$
 $+ dt * \text{Taxa Reciclagem}$
- Trabalhadores (0) = 37
 Trabalhadores ($t + dt$) = $\text{Trabalhadores } (t)$
 $+ dt * \text{Contratações}$
 $- dt * \text{Demissões Outros}$

B.1.2 – Variáveis de Fluxo

- Nascimentos = População * Fertilidade;
- Mortes = População / Longevidade Média;
- Disposição Descontrolável = $(1 - \text{Porcentagem Atual}) * \text{Consumo Total após Atraso}$;
- Produtos no fim do Período de Uso = $\text{Porcentagem Atual} * \text{Consumo Total após Atraso}$;
- Taxa Coleta = $\min(\text{Produtos Usados} / \text{Tempo Coleta}; \text{Capacidade Coleta})$;
- Transporte ao CT = $\text{Produtos Coletados} / \text{Tempo Transporte CT}$;
- Produtos Aceitos para Reuso = $\text{Produtos Coletados sob Triagem} * (1 - \% \text{Produtos Rejeitados}) / \text{Tempo Triagem}$;
- Produtos Rejeitados para Reuso = $\text{Produtos Coletados sob Triagem} * \% \text{Produtos Rejeitados} / \text{Tempo Triagem}$;
- Taxa Reciclagem = $\min(\text{Produtos Reusáveis} / \text{Tempo Reciclagem}; \text{Capacidade Reciclagem})$;
- Vendas = $\text{Produtos Reciclados} / \text{Tempo Venda Recicláveis}$;
- Contratações = $\text{Trabalhadores} * \text{Aumento}$;
- Demissões/Outros = $\text{Trabalhadores} / \text{Abstenção Média}$;

B.1.3 – Conversores e Constantes

As equações para o modelo são:

- Consumo Médio Mensal = População * Unidade per Capita;
- Consumo Total = NORMAL (Consumo Médio Mensal; 0);
- Produtos Consum com Atraso = $(1 - \% \text{ PC até 1 mês}) * \text{Consumo Total}$;
- Produtos Consum sem Atraso = $\% \text{ PC até 1 mês} * \text{Consumo Total}$;
- Produtos Consum após Atraso = DELAYMTR (Produtos Consum com atraso; Tempo Médio PCA; 3; Produtos Consum com atraso);
- Consumo Total após atraso = Produtos Consum sem atraso + Produtos Consum após atraso;
- Consumo Médio = DELAYINF (Consumo Total após atraso; a C; 1; Consumo Total após atraso);
- Taxa Coleta Média = DELAYINF (Taxa Coleta; a TC; 1; Taxa Coleta);
- Index 1_ Cumprimento Legislação = Taxa Coleta Média / Consumo Médio;
- Index 2_ Comportamento Reciclagem = SOMA Vendas / Taxa Coleta Média;
- Index Final = Index 1_ Cumprimento Legislação * Index 2_ Comportamento Reciclagem;
- Porcentagem Esperada = {GRAPHLINAS (Index Final; 0; 0,25; {0; 0,25; 0,50; 0,75; 1}); GRAPHLINAS (Index Final; 0; 0,25; {0; 0,50; 0,75; 0,875; 1}); GRAPHLINAS (Index Final; 0; 0,25; {0; 0,125; 0,25; 0,50; 1})} * Cenários;
- Porcentagem Atual = DELAYMTR (Porcentagem Esperada; Tempo Médio P; 3; Porcentagem Esperada);
- SOMA Produtos Aceitos Reuso = ARRSUM (Produtos Aceitos para Reuso);
- SOMA Taxa Reciclagem = ARRSUM (Taxa Reciclagem);
- SOMA Vendas = ARRSUM (Vendas);

As constantes para o modelo são:

- Longevidade Média = 1.200;

-
- Fertilidade = 0.01449;
 - Unidade per Capita = 0.0008;
 - % PC até 1 mês = 0.625;
 - Tempo Médio PCA = 2.5;
 - a C = 1;
 - a TC = 1;
 - Cenários = {1; 0; 0};
 - Tempo Médio P = 3;
 - Tempo Coleta = 1.1;
 - Capacidade Coleta = 250;
 - Tempo Transporte CT = 0.9;
 - % Produtos Rejeitados = 0.003;
 - Tempo Triagem = 1;
 - Tempo Reciclagem = 1;
 - Capacidade Reciclagem = {200; 200; 200; 200; 200; 200; 100; 100};
 - Tempo Venda Recicláveis = 1.

B.2 – PARÂMETROS DE RECEITA/CUSTOS DO CENÁRIO BÁSICO

Em seguida são expostos os parâmetros de receita/custos para o cenário básico, a saber:

- Aumento = 0.02;
- Abstenção Média = 65.33;
- Preços = {300; 500; 180; 250; 950; 110; 1.500; 100};
- Salário = 545;
- Custo Triagem por Unidade = 0;
- Custo Transporte = 12.074,15;

- Despesas Cooperativa = 7.000;
- Custo Coleta por Unidade = 0;
- Custo Reciclagem por Unidade = 0;
- Gastos Armazém = 6.750;
- Custo Capital = 0.07;
- Fator Desconto = 0.01;

B.3 – EQUAÇÕES DE RECEITA, CUSTO E LUCRO

Abaixo são fornecidas as equações de receita, custo e lucro para o modelo, a saber:

- Receita Total por Período = Vendas * Preços;
- SOMA Receita Total por Período = ARRSUM (Receita Total por Período);
- Custo Mão-de-Obra = Trabalhadores * Salário;
- Custo Triagem = (SOMA Produtos Aceitos Reuso + Produtos Rejeitados para Reuso) *
Custo Triagem por Unidade;
- Custo Novas Tecnologias = IF (Novas Tecnologias; 1.000; 0);
- Custo Coleta = Taxa Coleta * Custo Coleta por Unidade;
- Custo Reciclagem = SOMA Taxa Reciclagem * Custo Reciclagem por Unidade;
- Custo Armazenagem = (1 + Custo Capital) * Gastos Armazém;
- Custo Total por Período = Custo Mão-de-Obra + Custo Coleta + Custo Reciclagem +
Custo Triagem + Custo Transporte + Custo Armazenagem + Custo Novas Tecnologias +
Despesas Cooperativa;
- Lucro Total por Período = SOMA Receita Total por Período – Custo Total por Período;

O lucro total da cadeia de suprimento, que é a função objetivo utilizada no modelo proposto para avaliar a eficácia de uma política, é o valor presente líquido do lucro total por período, ou seja:

- Lucro Total Cadeia Suprimento = NPV (Lucro Total por Período; Fator Desconto).