

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEPS

MODELOS PARA CONFIGURAÇÃO DA REDE LOGÍSTICA DO PROGRAMA
‘COMPUTADORES PARA INCLUSÃO’

Maritha Gomes Silva de Oliveira

Sorocaba

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEPS

MODELOS PARA CONFIGURAÇÃO DA REDE LOGÍSTICA DO PROGRAMA
‘COMPUTADORES PARA INCLUSÃO’

Maritha Gomes Silva de Oliveira

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

Orientadora: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Sorocaba

2014

Oliveira, Maritha Gomes da Silva.
O48m Modelos para configuração da rede logística do Programa
'Computadores para Inclusão' / Maritha Gomes da Silva Oliveira. --
2014.
123 f. : 28 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos,
Campus Sorocaba, Sorocaba, 2014
Orientador: Eli Angela Vitor Toso
Banca examinadora: Maristela Oliveira dos Santos, Deisemara
Ferreira
Bibliografia

1. Logística empresarial. 2. Resíduos sólidos. 3. Modelos
matemáticos. I. Título. II. Sorocaba-Universidade Federal de São
Carlos.

CDD 658.5

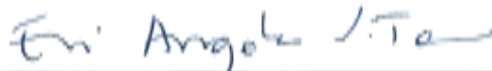
MARITHA GOMES SILVA DE OLIVEIRA

**MODELOS PARA CONFIGURAÇÃO DA REDE LOGÍSTICA
DO PROGRAMA "COMPUTADORES PARA INCLUSÃO"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão de Operações.

Sorocaba, 4 de abril de 2014

Orientador (a):



Prof. (a), Dr. (a), Eli Angela Vitor Toso
DEPS/UFSCar

Examinadores (as):



Prof. Dr. Maristela Oliveira dos Santos
USP-ICMC



Prof. (a), Dr. (a), Deisemara Ferreira
DFQM/UFSCar

Dedicatória

A minha Mãe, pelos ensinamentos sobre a importância da educação e pelo apoio incondicional.

Agradecimentos

Agradeço a Deus que guiou meus passos para chegar até aqui.

Ao Arthur Andrade, por estar ao meu lado há sete anos compreendendo e lutando, independente das minhas escolhas.

Mãe, Pai, Marcus e Cacá obrigado por ter incentivado meus estudos e ter compreendido minha ausência.

A minha orientadora Eli, por ter feito muito mais que me orientar, sendo uma mãe, com paciência, compreensão e muito carinho ao longo desses dois anos.

Agradeço à Natália por ter me incentivado a começar essa caminhada e me apoiado ao longo dela.

Para transformar um local em uma verdadeira casa é preciso de pessoas que sejam como irmãs, Nadya e Renata, obrigada por todo carinho e paciência.

A Karim por me ajudar sempre que precisei, por ter sido não apenas uma irmã de orientação mas uma de coração que levarei para toda a vida.

Ao Pedro pelo socorro com softwares e com as disciplinas, pelo apoio em momentos difíceis e pela imensa amizade.

AMônica do Amaral pela compreensão, paciência e amizade. E a Thigo Silva por não concordar comigo sempre mas ser sempre um apoio.

A todos os meus amigos que sempre acreditaram em especial a Lorena Prissinoto, Tábata Assunção, Laura Zatti, Isabella Morais e Mariana Belato.

A CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Sorocaba, pela oportunidade.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o estudo da configuração da rede de logística reversa pós-consumo de equipamentos de informática do projeto intitulado ‘Computadores para a Inclusão’ do Governo Federal (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2012). A motivação para desenvolvimento do trabalho são os desafios logísticos inerentes ao descarte de resíduos sólidos urbanos, que envolvem o comprometimento entre sociedade, governo e empresas privadas. Particularmente, no caso de equipamentos eletroeletrônicos, além dos aspectos legais previstos no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), as oportunidades de recuperação de valor para os produtos são relevantes e podem aumentar sua vida útil. Os equipamentos de informática, por exemplo, podem ser recuperados nos Centros de Recondicionamento de Computadores (CRCs), que são locais onde os equipamentos são recondicionados e disponibilizados para utilização por comunidades carentes. Os CRCs fazem parte do projeto ‘Computadores para a Inclusão’. Uma das dificuldades para o planejamento neste projeto é a configuração da rede logística, que consiste: (i) na localização dos centros de recondicionamento (CRCs), considerando os locais existentes e possibilidades de expansão; (ii) na determinação da quantidade de computadores presentes nos Telecentros respeitando a quantidade máxima e mínima de computadores; e, (iii) na definição dos fluxos de material entre pontos de descarte, CRCs, Telecentros e pontos de destinação final. Neste contexto, a abordagem deste trabalho é a proposição de modelos matemáticos para auxiliar a configuração da rede logística do projeto ‘Computadores para a Inclusão’ contribuindo para coleta e destinação apropriada de equipamentos de informática pós-consumo em todo território nacional.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the configuration of the reverse logistical chain post consumption of the computer equipments from the project called ‘Computadores para a Inclusão’ from the Federal Government (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2012). The motivations for the development of this study are the logistical challenges inherent to the disposal of solid human residues, which involve the compromising of society, government and private companies. Particularly, in the case of the electronic equipments, besides the legal aspects foreseen in the Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) the opportunities of value recovery for the products are relevant and may increase it’s life cycle. The computer equipments, for example, may be recovered at the Centro de Recondicionamento de Computadores (CRC) which are located where the computers are reconditioned and then made available for needy communities to use. The CRCs belong to the “Computers for Inclusion” project. One of the difficulties in planning this project is configuring the logistics network, which consists of: (i) defining the computers discharge points; (ii) locating the reconditioning centers, considering the existing places and the possibility of expanding; (iii) in determining the amount of computers present in Telecentros respecting the maximum and minimum number of computers; and (iv) defining the material flow amongst the discharge points, CRCs, Telecentros and the final destination points. In this context, the approach of this study is to propose a mathematical model to help the configuration of the logistical network of the ‘Computadores para a Inclusão’ project, contributing to the gathering and appropriate destination of the computer equipments post consumption in all national territory.

Lista de Figuras

Figura 2.1 Gráfico Evolução da Quantidade de Computadores no País	20
Figura 2.2 Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos	21
Figura 2.3 Cidades que Possuem Telecentros Nucleadores.	24
Figura 2.4 Funcionamento do Projeto Computadores para a Inclusão.....	26
Figura 2.5 Fluxograma de Funcionamento do Projeto	28
Figura 2.6 Esquema de estrutura da nova do programa ‘Computadores para a Inclusão’	30
Figura 3.1 Canais de Distribuição pós-venda e pós-consumo.....	34
Figura 3.2 Cenário de sub-processos 4R's para produtos pós consumo.....	36
Figura 3.3 Fatores para tomada de Decisões na Logística Reversa.....	38
Figura 3.4 Rede Modelo Alumur et al. (2012)	56
Figura 4.1 Funcionamento da rede do projeto ‘Computadores para a Inclusão’	64
Figura 4.2 Rede do MCLA	66
Figura 4.3 Rede do MCLAM	68
Figura 5.1. Mapa estado do Rio Grande do Sul com destaque para cidades com Telecentros.....	83
Figura 5.2. Distribuição CRCs do MCLA	86
Figura 5.3 Distribuição dos CRCs para o MCLAM.....	93
Figura 5.4 Distribuição dos CRCs pelo MCLAM-FR.....	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Cidades que possuem Telecentros Nucleadores	25
Tabela 3.1 Modelos de Localização para a Logística Reversa.....	50
Tabela 5.1 Distribuição dos Telecentros	78
Tabela 5.2. Distâncias (Km) entre cidades com Telecentros no Rio Grande do Sul.....	84
Tabela 5.3. Resultados do MCLA para Exemplo Ilustrativo	84
Tabela 5.4. Resultados Obtidos pelo MCLA.....	88
Tabela 5.5. Resultados do MCLAM para Exemplo Ilustrativo.....	91
Tabela 5.6 Resultados Obtidos pelo MCLAM	95
Tabela 5.7- Telecentros que recebem material de Retorno	98
Tabela 5.8. Porcentagem de Utilização	100
Tabela 5.9 Fluxo de Material e Computadores recondicionados	100
Tabela 5.10.Porcentagem de Ocupação de Computadores nos Telecentros	101
Tabela 5.11. Número de Máquinas a serem encaminhadas a instituições públicas	101
Tabela 5.12. Fluxo de Computadores Reformulados CRC Telecentros.....	102
Tabela 5.13 Fluxo de Material para a Destinação Final (em KG).....	102
Tabela 5.14 Resultados Obtidos pelo MCLAM-FR.....	106
Tabela 5.15. Ocupação Média dos Telecentros	110
Tabela 5.16. Quantidade (em Kg) de material para a destinação	112
Tabela 0.1- Localização da Empresas recicladoras	125

LISTA DE SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CI	Computadores para a Inclusão
CFLNDP	<i>The Capacitated Facility Location/ Network Design Problem</i>
CLM	<i>Council of Logistics Management</i>
CRC	Centro De Recondicionamento De Computadores
EAESP	Escola de Administração de Empresas de São Paulo (Fundação Getulio Vargas)
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
EG	Gases Estufa
FGV	Fundação Getúlio Vargas
MCLA	Modelo Capacitado de Locação-Alocação
MCLAM	Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo
MCLAM-FRD	Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionada
PNRS	Política Nacional De Resíduos Sólidos
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
REVLOG	<i>The European Working Group On Reverse Logistics</i>
SESC	Serviço Social do Comércio
UFLNDP	<i>The Uncapacitated Facility Location/ Network Design Problem</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa e Objetivo	14
1.2	Metodologia	16
1.3	Organização da Dissertação	17
2	A LOGÍSTICA REVERSA DO PROGRAMA ‘COMPUTADORES PARA A INCLUSÃO’	18
2.1	Contextualização	18
2.2	O Programa Computadores Para a Inclusão	22
2.3	Desafios para Operacionalização e Ampliação do Programa	27
2.3.1	Problema a ser Modelado	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1	Logística Reversa	32
3.1.1	Definição	32
3.1.2	Classificação	33
3.1.3	Motivações para Logística Reversa	38
3.1.4	Práticas Atuais e Tendências	39
3.2	Modelos para Configuração de Rede Logística	41
3.2.1	Modelos de Localização	42
3.2.2	Modelos de Localização para Logística Reversa	44
3.2.3	Modelo Jayaraman; Patterson e Rolland (2003)	50
3.3	Modelos para Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos	52
3.3.1	Modelo Achilles et al. 2012	53
3.3.2	Modelo Alumur et al. 2012	55
3.4	Avaliação da literatura revisada para representação do problema estudado	61
4	ABORDAGENS PROPOSTAS PARA O PROBLEMA	63
4.1	Considerações para a Modelagem	63
4.2	Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA)	65
4.3	Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM)	67
4.4	Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)	71
5	ESTUDOS COMPUTACIONAIS	77
5.1	Dados do Problema	77
5.1.1	Os dados dos exemplos ilustrativos	82
5.2	Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA)	84

5.2.1	Exemplo Ilustrativo para o MCLA	84
5.3	Análise do Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM)	91
5.3.1	Exemplo Ilustrativo	91
5.3.2	Dados Reais	91
5.4	Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)	99
5.4.1	Exemplo Ilustrativo	100
5.4.2	Experimentos com Dados Reais	103
6	CONCLUSÕES	114
7	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	116
	Referências Bibliográficas	118
	Apêndice	125
1.	Empresas Recicladoras	125

1 INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento tecnológico tem aumentado a frequência das trocas de equipamentos eletrônicos, como computadores, celulares, impressoras, televisores, etc. O resultado deste novo padrão de consumo é a geração de um tipo de resíduo: o resíduo eletroeletrônico, também conhecido como lixo *high tech*, e-lixo ou Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). O descarte apropriado destes resíduos tem sido um desafio para as empresas de tecnologia. Segundo uma pesquisa da ONU (Organização das Nações Unidas), somente em 2010 foram geradas 50 milhões de toneladas dessa espécie de lixo pelo mundo.

Ao mesmo tempo em que representam um enorme risco para o meio ambiente, os REEE tem um potencial de reaproveitamento bastante lucrativo. Estudos indicam que até 2020 o mercado global de recuperação de lixo eletroeletrônico pode lucrar cerca de 21 bilhões de dólares. Para evitar o risco de contaminação pelos resíduos gerados, alguns países exportam grande parte de seu lixo eletroeletrônico para reciclagem, enquanto outros reprocessam estes produtos, atingindo taxas de mais de 80% de reciclagem. No Brasil, relatórios da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2012) mostram que os resíduos compostos por aparelhos de telefones fixos e celulares, televisores e computadores atingem o patamar de 200 mil toneladas ao ano, o que significa mais de 1 kg por habitante do país. No ritmo de crescimento atual, as estimativas são de que até 2030 serão geradas 6,6 milhões de toneladas deste tipo de lixo no Brasil.

Em agosto de 2010 foi sancionada a Lei nº 12305, que instituiu no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), o que representa um marco para a regulamentação e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Especificamente, o artigo 33 desta lei trata dos produtos eletroeletrônicos e seus componentes, determinando que produtores e distribuidores sejam responsáveis pela disposição final ambientalmente adequada dos produtos, além de estender a responsabilidade pelas suas embalagens. Uma prática já observada é a disponibilização de pontos para entrega dos resíduos reutilizáveis e recicláveis gerados após o consumo.

De acordo com Sachs (1986) *apud* Caixeta-Filho e Bartholomeu (2010), não é possível inverter a direção de desenvolvimento e transformar sociedades industriais em sociedades primitivas. Daí a importância da busca por formas de desenvolvimento mais sustentáveis. Diversas abordagens tanto práticas quanto acadêmicas sobre este tema têm sido propostas nos últimos tempos.

Neste contexto, o Governo Federal criou em 2004 um projeto chamado ‘Computadores para a Inclusão’ (CI) com o objetivo de: criar oportunidades de formação educacional e profissional para jovens de baixa renda; apoiar iniciativas de inclusão digital; estimular políticas de descarte planejado e ecologicamente sustentável; entre outros (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2012). Para operacionalização do projeto, foram implantados os Centros de Recondicionamento de Computadores (CRCs). Estes CRCs recebem equipamentos de informática pós-consumo de órgãos governamentais, fazem uma triagem e processamento para recuperação destes equipamentos e enviam para os chamados Telecentros comunitários, além de escolas públicas, bibliotecas e outros projetos com impacto social nas comunidades nas quais estão inseridos. Atualmente existem 6 CRCs que atendem, aproximadamente, 2.000 Telecentros nos 26 estados brasileiros e Distrito Federal. O objetivo do programa é ampliar a destinação adequada de computadores pós-consumo. Uma alternativa considerada pelo governo é atribuir aos Telecentros a função de recebimento de computadores pela comunidade. Isto implica em um redimensionamento da quantidade de CRCs para processar todo o material recebido. Além disso, o programa tem estimulado o aumento do número de Telecentros, visando tanto a ampliação da inclusão digital a comunidades carentes como a ampliação de pontos de coleta de equipamentos eletrônicos pós-consumo.

Os modelos a serem apresentados nesse trabalho tratam de alguns desafios associados a esta proposta de ampliação, como: (i) definição do número de CRCs necessários para processar o material; (ii) determinação da quantidade de computadores presentes nos Telecentros respeitando a quantidade máxima e mínima de computadores; (iii) determinação da localização destes CRCs, considerando a localização, a região de atendimento dos já existentes e as restrições orçamentárias. Além disso, é necessário considerar o volume de computadores descartados, as taxas destes computadores que podem ser recondicionados, o tempo de utilização (vida útil) dos computadores recondicionados e a localização de empresas recicladoras, para viabilizar os custos de transporte relacionados com todo o processo de descarte.

1.1 Justificativa e Objetivo

De acordo com Bartholomeu e Caixeta-Filho (2011), dois fatores definem a destinação dos resíduos sólidos urbanos: incentivos econômicos e imposições legais. No caso de resíduos eletroeletrônicos, estes dois fatores são relevantes. Em relação às imposições legais, a criação em 2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece

que a estruturação e implementação de sistemas de logística reversa para resíduos eletroeletrônicos e seus componentes é responsabilidade de fabricantes, importadores e comerciantes (Artigo 33 da Lei nº 12.305/10). Desta forma, práticas e iniciativas relacionados à logística reversa pós-consumo passaram a ser uma obrigatoriedade para muitas empresas. Esta imposição legal sobre o descarte ambientalmente correto é particularmente importante, pois os resíduos eletroeletrônicos podem ser muito perigosos, por exemplo, algumas substâncias que compõe estes materiais podem trazer sérios danos à saúde, como o Zinco (Zn) e o Chumbo (Pb). Em relação aos fatores econômicos, o potencial de lucratividade relacionado a esses resíduos é bastante significativo. Apesar de ser necessária alta tecnologia para a reciclagem e recuperação de metais valiosos, uma tonelada de resíduos eletroeletrônicos possui aproximadamente 22,24 gramas de ouro enquanto uma tonelada de minério possui apenas 0,4 gramas, ou seja, são 5,6 vezes mais. (PALLONE, 2008).

Do ponto de vista acadêmico, a crescente preocupação acadêmica com este problema é demonstrada pela quantidade de trabalhos recentes sobre temas como: Gerenciamento sustentável de redes de suprimento (*Sustainable Supply Network Management*); Gerenciamento ambiental de cadeias de suprimento (*Supply Chain Environmental Management*); Logística Verde (*Green Logistics*); Cadeias de Suprimento Verde (*Green Supply Chain*); e, Gerenciamento de Cadeias de Suprimento Verde (*Green Supply Chain Management*) (DEKKER; BLOEMHOF; MALLIDIS, 2012; LAMBERT; RIOPEL; ABDUL-KADER, 2011; SARKIS; ZHU; LAI, 2011; SBIHI; EGGLESE, 2009; SRIVASTAVA, 2007). Particularmente os trabalhos de (DEKKER; BLOEMHOF; MALLIDIS, 2012) e (SBIHI; EGGLESE, 2009) apontam direções e oportunidades de pesquisas acadêmicas sobre aplicações de Pesquisa Operacional para Logística Verde. Segundo estes mesmos autores, dentre as oportunidades de pesquisa relevantes destacam-se os problemas de configuração de rede logística.

Considerando as perspectivas acadêmicas relacionadas à problemática, o desenvolvimento deste projeto pode contribuir tanto para aplicação prática e obtenção de resultados interessantes para os gestores públicos, quanto para a proposta e estudo de modelos que representem adequadamente o problema.

O objetivo deste trabalho é estudar a logística reversa de equipamentos de informática do projeto ‘Computadores para a Inclusão’ e propor modelos matemáticos para auxiliar na decisão da configuração da rede logística destes equipamentos pós-consumo, incluindo as perspectivas de ampliação do projeto. Estimando a quantidade e a localização

de novos centros de condicionamento de computadores (CRCs), realizando o controle de uma quantidade mínima e máxima de máquinas nos Telecentros, através do direcionamento dos fluxos de materiais para o condicionamento e do fluxo de computadores condicionados.

Do ponto de vista de modelagem matemática o problema consiste na localização e alocação de instalações para a configuração de uma rede logística. A rede é composta por pontos de coleta (Telecentros), pontos de armazenamento e processamento (CRCs) e por empresas responsáveis pelo descarte ambientalmente correto.

O problema é dinâmico, ou seja, os parâmetros variam ao longo dos períodos de planejamento. Existem restrições de capacidade tanto nos Telecentros quanto nos CRCs, o problema também envolve decisões sobre o fluxo de equipamentos e considerações das taxas de obsolescência, assim como restrições orçamentárias.

1.2 Metodologia

Após uma revisão bibliográfica, observa-se que a maioria dos trabalhos da literatura sobre a logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos apresenta modelos teóricos. Nos trabalhos que apresentam casos aplicados, as particularidades de cada país e as características dos diferentes produtos são importantes para direcionar propostas efetivas para o problema de configuração da rede de logística reversa para descarte. Desta forma, neste trabalho o foco será o estudo da logística reversa de equipamentos eletrônicos e de modelos de programação matemática para representar as decisões envolvidas na configuração da rede logística.

A configuração da rede deve considerar que, embora a vida útil dos equipamentos seja de cerca de cinco anos, os consumidores trocam seus aparelhos mais frequentemente, gerando uma grande demanda pela coleta e destinação adequada para estes produtos. Para propor um modelo matemático para o problema em questão é necessário conhecer detalhadamente toda operação, coletar dados e parâmetros para construção e validação das abordagens propostas. Desta forma, para garantir que esta pesquisa esteja de acordo com a realidade do problema, ela é baseada no estudo de caso do projeto governamental ‘Computadores para a Inclusão’ e toda a rede logística envolvida nas suas operações.

Segundo a definição proposta por Morabito e Pureza (2010), a metodologia de pesquisa proposta nesse projeto pode ser classificada como uma pesquisa quantitativa empírica normativa, pois esse trabalho visa o desenvolvimento, através da modelagem da

problemática do projeto ‘Computadores para a Inclusão’, de um resultado que possa contribuir para melhorar a situação corrente.

1.3 Organização da Dissertação

Essa dissertação está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 descreve detalhadamente a logística reversa do programa ‘Computadores para a Inclusão’, apresentando o contexto no qual o programa está inserido, suas características e seus principais desafios logísticos para operacionalização. O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica acerca do tema, abordando sua definição, a classificação, relatando as motivações para a aplicação, tratando das práticas atuais e tendências, apresentando modelos de configuração e detalhando dois modelos matemáticos da logística reversa.

O Capítulo 4 apresenta os modelos matemáticos desenvolvidos para o problema. O capítulo está dividido em quatro seções: a primeira apresenta as considerações a cerca da modelagem e as três seguintes seções correspondem uma para cada um dos três modelos desenvolvidos: Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA), Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM) e Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionada (MCLAM-FRD).

No Capítulo 5 temos os resultados dos estudos computacionais dos modelos propostos no Capítulo 4. Finalizando esse trabalho temos: o Capítulo 6 com as conclusões gerais e o Capítulo 7 com propostas futuras para a pesquisa.

2 A LOGÍSTICA REVERSA DO PROGRAMA ‘COMPUTADORES PARA A INCLUSÃO’

O objetivo deste capítulo é descrever o programa ‘Computadores para a Inclusão’, particularmente os desafios associados à configuração da rede logística. Para contextualizar o cenário do projeto, a Seção 2.1 apresenta o problema de inclusão digital brasileiro. A Seção 2.2 detalha o projeto governamental ‘Computadores para a Inclusão’ ao passo que a Seção 2.3 apresenta os principais desafios logísticos para a sua operacionalização. Finalmente a Seção 2.4 apresenta o delineamento e escopo do problema que é abordado neste trabalho.

2.1 Contextualização

Uma população incluída digitalmente significa que a mesma possui um amplo acesso a computadores conectados a rede mundial de computadores (internet) e o mínimo de conhecimento necessário para utilizá-los, (SILVEIRA, 2005). De acordo com Schwarzelmüller (2000), a inclusão digital permite que a população tenha mais consciência da sua cidadania e pode implicar em maior renda. Desta forma, capacitar a população e a comunidade local implica em inserir a Tecnologia da Informação e Comunicação na realidade de todo o país.

Em 2000, apenas 10,6% dos domicílios brasileiros possuíam computadores e somente 7,74% tinham acesso a internet. Consciente da importância da inclusão digital, em 2000, o Governo lançou o Livro Verde, que consiste em uma reunião de medidas e ideias de vários pesquisadores e funcionários do Ministério da Ciência e Tecnologia sobre o que seria necessário para mudar a situação da inclusão digital nacional. A prática dessas medidas e ideias levou a inclusão digital brasileira a outro patamar, dados de 2010 refletem bem o sucesso dessas medidas e ideias, com 38,3% de domicílios com computadores sendo 30,7% com acesso a internet. Outro fator importante é que, em 2010, 94,8% dos estudantes de ensino médio no país já possuíam acesso a Internet em escolas ou projetos assistenciais do governo (EAESP, 2010).

Apesar dessa evolução na primeira década do século XXI, ainda havia muitos desafios a serem superados para alavancar o desenvolvimento digital, como o analfabetismo de muitos adultos, a falta de qualificação dos docentes e a falta de infraestrutura em determinadas regiões do país para abrigar o desenvolvimento digital (DEMO, 2005). Para melhorar a infraestrutura de um país de grandes dimensões territoriais como o Brasil são

necessárias diversas iniciativas das esferas públicas e privadas. Por isso diversos programas, em ambas as esferas, tem surgido recentemente.

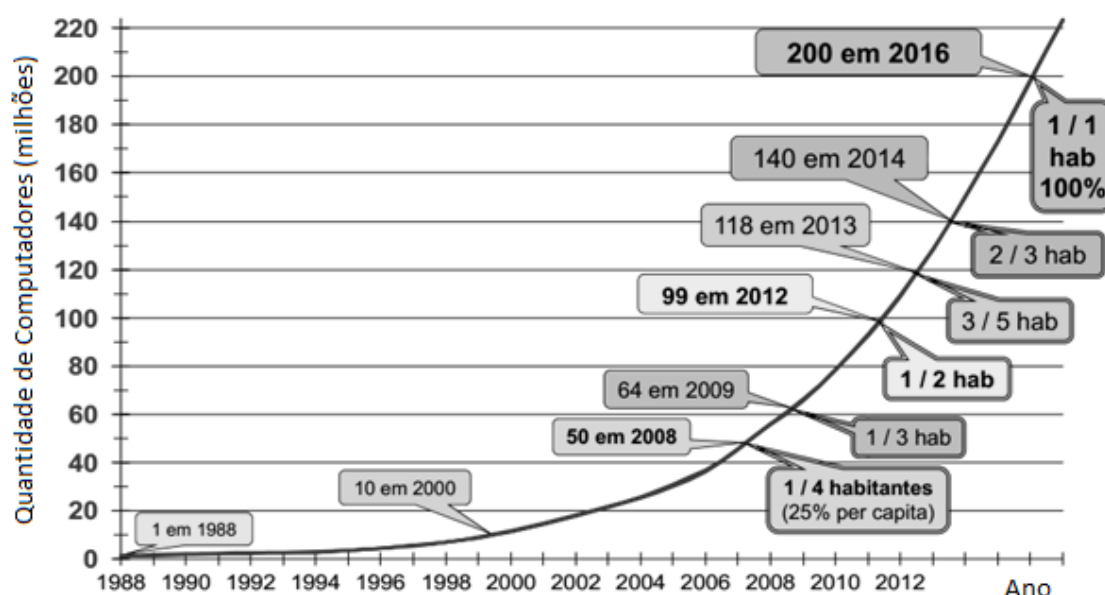
Dentre as políticas não governamentais podemos destacar o Comitê para a Democratização da Informática, que é uma organização sem fins lucrativos totalmente voltada ao trabalho de diminuir a exclusão digital entre a população em geral e os menos favorecidos. Desde 1995 no Brasil, mais de 48.000 crianças, jovens e adultos já foram capacitados nas escolas de informática implementadas pelo programa (BAGGIO, 2000).

O atual Governo Brasileiro, através do Ministério das Comunicações e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, tem utilizado diversos métodos para desenvolver a democratização digital. Dentre as várias medidas governamentais podemos destacar o Programa Aprendizagem Informacional, para alunos do ensino fundamental e médio de escolas públicas.

A necessidade de medidas para promover a inclusão digital surgiu para democratizar o acesso a informações e ampliar o conhecimento da população nas mais diversas áreas, além de ser uma das formas mais eficientes de comunicação a grandes distâncias. Pela praticidade e comodidade fornecida pelo acesso digital a quantidade de computadores pelo Brasil, e pelo mundo, têm aumentado substancialmente.

Uma recente pesquisa do Centro de Tecnologia de Informação Aplicada da Fundação Getúlio Vargas (FGV), aponta que em 2013 havia 180 milhões de computadores no Brasil. Em 1998 existiam 1 milhão de computadores no país, em 2000 esse número havia aumentado para 10 milhões. A perspectiva é que em 2016 exista no país 1 computador para cada habitante. A Figura 2.1 mostra o crescimento da quantidade de computadores no país nos últimos trinta anos.

Figura 2.1 Gráfico Evolução da Quantidade de Computadores no País



Fonte: Fundação Getúlio Vargas

Para abastecer um mercado digital crescente, no Brasil e no mundo, a indústria de equipamentos eletroeletrônicos cresce de forma bastante acentuada. Segundo uma pesquisa do Programa Ambiental das Nações Unidas, a taxa de equipamentos eletroeletrônicos descartados pelo mundo pode atingir 50 milhões de toneladas ano (KUEHR, WILLIAMS, 2003). Segundo Miguez (2007), quase 75% dos equipamentos eletroeletrônicos antigos pelo mundo ainda encontram-se nas residências, pois a maior parte dos proprietários acredita que eles ainda possam ser úteis no futuro ou desconhecem uma forma de descartá-los.

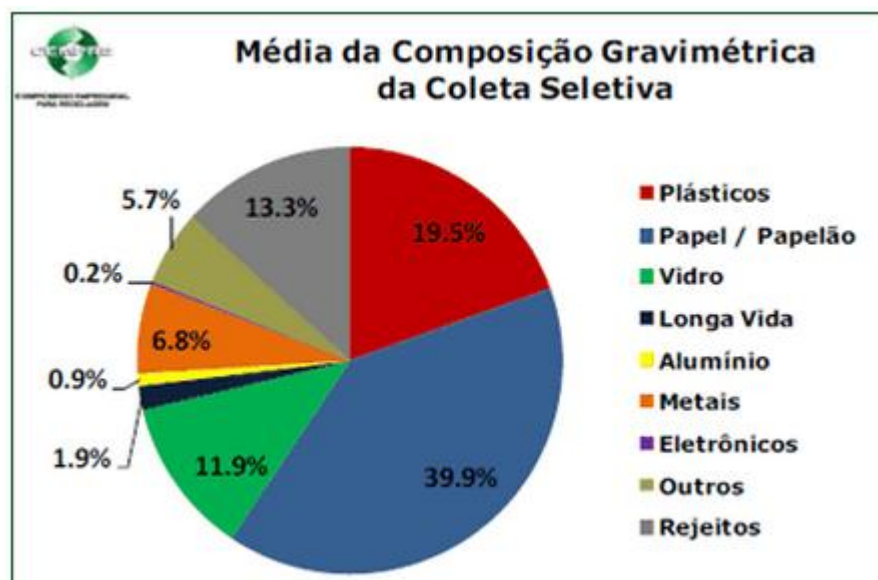
Diversas medidas para reverter essa situação têm surgido pelo mundo. Desde 1997 existe um projeto para a implementação internacional da Logística Reversa intitulado *The European Working Group On Reverse Logistics* (REVLOG). Sobre a coordenação *Erasmus University Rotterdam*, na Holanda, pesquisadores de várias universidades pelo mundo defendem que se as empresas adotarem os conceitos de Logística Reversa isso levaria: ao cumprimento das legislações ambientais; a um gerenciamento de qualidade do processo reverso de produtos e/ou matérias primas; e, a uma diminuição de desperdícios (CONCEIÇÃO; PACHECO, 2012). A União Europeia criou em 2004 um programa para reduzir a quantidade de material eletroeletrônico que chega aos aterros sanitários da União Europeia, através de metas para coleta, tratamento, recuperação e reciclagem dos produtos (GOOSEY, 2004).

No Brasil, uma associação de grandes empresas brasileiras denominada Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), promove os conceitos de

reciclagem e ideias sobre o gerenciamento de lixo. Desde 1994 o CEMPRE realiza uma pesquisa, denominada Ciclosoft, que abrange todo o território nacional, e reuni diversas informações sobre programas de coleta seletiva e dados da composição do lixo reciclado. Esta pesquisa envolve a participação governamental, de diversas empresas e da própria população. A última pesquisa realizada em 2010 apontou que apenas 443 municípios brasileiros, ou seja, aproximadamente 8% do total, possuem algum programa de coleta seletiva.

A Figura 2.2 apresenta a composição gravimétrica do material envolvido na coleta seletiva da pesquisa Ciclosoft 2010 (CEMPRE 2013). Note que a maior parte dos resíduos coletados é composta por papel/papelão (39,9%), seguido pelos plásticos (19,5%), podemos observar que apenas 0,2% do total de material coletado são resíduos eletroeletrônicos.

Figura 2.2 Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos



Fonte - Pesquisa CICLOSOFT 2010.

A PNRS se destaca pela proposta de elaboração de um plano de resíduos sólidos para as cidades, pelo incentivo à coleta seletiva, e pela implementação de sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A PNRS está em fase de implantação, uma das metas estabelecidas é que até 2015 não existam mais aterros sanitários no Brasil.

O Acordo Setorial para a Implementação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes estabelece a responsabilidade compartilhada sobre o ciclo de vida, ou seja, fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e os serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos passam

a ter responsabilidade sobre a destinação final correta dos produtos. O edital para a elaboração do Acordo Setorial ficou sobre a responsabilidade do Ministério do Meio Ambiente (Edital 01/2013-Chamamento para a Elaboração de Acordo Setorial para a Implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes). Este edital foi lançado em junho de 2013 e ainda está em processo de negociação.

Neste contexto, o programa ‘Computadores para a Inclusão’ deverá ser usado pelo Governo Federal Brasileiro como uma forma de descarte de materiais eletroeletrônicos coerente com a PNRS, além de fomentar a inclusão digital no país. Ou seja, o programa está alinhado com os preceitos da sustentabilidade na medida em que promove a reutilização, tornando o projeto economicamente mais viável; o descarte ambientalmente adequado; e, a inclusão digital (socialmente justo).

2.2 O Programa Computadores Para a Inclusão

O programa ‘Computadores para a Inclusão’ foi proposto em 2004 e iniciou suas atividades em 2005. O programa é de responsabilidade da Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e faz parte da política de Inclusão Digital do Governo Federal.

O principal objetivo do programa é promover a inclusão digital e a formação de jovens de baixa renda, que se encontra em situação de vulnerabilidade social. O programa oferece oficinas, cursos, treinamentos e outras atividades que podem contribuir para a formação desses jovens. Outro foco do programa é o condicionamento e manutenção de equipamentos de informática e a conscientização ambiental sobre a destinação correta dos resíduos eletroeletrônicos.

Para estruturar esse programa o Governo desenvolve programas em parceria com diversos órgãos, entidades e/ou empresas. Um deles é o Projeto intitulado ‘+ Telecentros: Educação, Tecnologia e Cultura para Inclusão Digital’, realizado em parceria entre o Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) do Campus de Sorocaba e a Coordenação de Formação da Secretaria de Inclusão Digital do Ministério das Comunicações.

O projeto ‘+ Telecentros’ tem como principais objetivos construir ou aprimorar a rede que envolve os atuais e potenciais parceiros do Governo no processo de inclusão digital, desenvolvendo estudos e pesquisas relacionadas à educação, cultura, tecnologia e sustentabilidade. Além disso, o projeto tem como objetivo promover eventos para

determinar novas parcerias e consolidar as já existentes entre os Telecentros e os CRCs. O projeto ‘Computadores para a Inclusão’ é gerenciado pelos Centros de Referência da Assistência Social (CRAs) que oferecem às comunidades de vulnerabilidade e risco social acesso a várias políticas públicas de combate a pobreza e proporciona direitos aos cidadãos, como acesso a educação, exercício da cidadania, etc. São esses centros que gerenciam a rede de assistência básica da comunidade na qual estão inseridos articulando a necessidade de vários órgãos, dentre eles os Telecentros.

Os Telecentros são ambientes aonde são oferecidos cursos e treinamentos presenciais e a distância, acesso a informação, serviços e oportunidades para pequenas e microempresas, assim como para a sociedade em geral. Os Telecentros possuem computadores que foram encaminhados pelos CRCs, com acesso a Internet e contam com a orientação de monitores capacitados para atender a demanda particular de cada Telecentro.

Atualmente, o Brasil conta com cerca de 2.000 Telecentros espalhados por várias comunidades. Desses Telecentros, oitenta são considerados principais, ou seja, são Telecentros nucleadores. Esses chamados nucleadores estão em contato direto com o governo e com os CRCs, para receberem computadores e enviarem materiais defeituosos para recondicionamento.

A Figura 2.3 apresenta um mapa da malha rodoviária brasileira, no qual estão indicadas as cidades onde estão instalados os Telecentros Nucleadores. A localização das cidades com Telecentros nucleadores neste mapa é interessante para avaliar a viabilidade de acesso a estes Telecentros. Note que a malha rodoviária é escassa no extremo norte do país, principalmente se comparada à malha da região sudeste, e que os Telecentros Nucleadores estão concentrados nas capitais e regiões metropolitanas, principalmente no sudeste do país. Este figura mostra o acesso à alguns Telecentros é significativamente limitado.

Tabela 2.1 Cidades que possuem Telecentros Nucleadores

Número de Telecentros Nucleadores por Cidade	Cidades
Um	Salvador-BA, Vila Velha-ES, Uberaba-MG, Foz do Iguaçu-PR, Niteroi-Rj, Nova Iguaçu-RJ, Caxias do Sul-RS, Santa Maria-RS, São Leopoldo-RS, Amparo-SP, Bragança Paulista-SP, Campinas-SP, Diadema-SP, Guarulhos-SP, Indaiatuba-SP, Osasco-Sp, Piracicaba-SP, Santos-SP, Santo André-SP.
Dois	Rio Branco-AC, Macapá-AM, Manaus-AM, Vitória-ES, Goiania-Go, São Luís, Cuiabá-MT, Campo Grande-MS, Belem-PA, João Pessoa-PB, Curitiba-PR, Teresina-PI, Natal-RN, Porto Alegre-RS, Porto Velho-RO, Boa Vista-RR, São Paulo-SP, Aracaju-SE, Palmas-TO.
Três	Belo Horizonte-MG, Recife-PE, Rio de Janeiro-RJ, Florianopolis-SC.
Quatro	Fortaleza-CE, Brasília-DF

Fonte - Elaborado pela Autora

Para operacionalização do programa ‘Computadores para a Inclusão’, além dos Telecentros, foram criados os Centros de Recondicionamento de Computadores. Os CRCs surgiram como um espaço onde os jovens em situação de vulnerabilidade social pudessem ter acesso a oficinas com cursos profissionalizantes no setor de tecnologia digital. Para que os cursos sejam oferecidos existe demanda por computadores, desde máquinas em boas condições de uso até máquinas cujo recondicionamento seja improvável. Para suprir essa demanda o governo passou a encaminhar para os CRCs os computadores que são trocados em diversos órgãos governamentais, como por exemplo, Fóruns, Delegacias, etc.. Algumas empresas privadas também colaboram com o projeto enviando máquinas usadas. Neste sentido, os CRCs também exercem um papel importante para dar destinação correta aos equipamentos de informática pós-consumo.

O país conta atualmente com seis CRCs: CESMAR (em Porto Alegre), GAMA (em Brasília), Belo Horizonte Digital (em Belo Horizonte), Lauro de Freitas (na Bahia), Recife e Belém, todos instalados em periferias. Dentro dos CRCs os computadores passam por um processo de verificação de *software* e *hardware*. Os computadores que estão aptos ao reuso são recondicionados pelos professores e alunos, desta forma, além de obter computadores aptos a serem utilizados em projetos assistenciais, os jovens aprendem uma profissão.

A Figura 2.4 esquematiza a rede logística atual referente ao projeto Computadores para a Inclusão. A comunidade, os Órgãos Públicos e as Empresas Privadas encaminham

seus computadores diretamente para os CRCs. Após o processamento do material, os computadores recondicionados são encaminhados para Bibliotecas e Escolas Públicas, além de retornarem aos Telecentros para garantir a manutenção das salas de inclusão digital que existe nos mesmos. Todo o resíduo eletrônico gerado é encaminhado para empresas de destinação final.

Figura 2.4 Funcionamento do Projeto Computadores para a Inclusão



Fonte - Adaptado do Documento Propositivo do Programa Computadores para a Inclusão.

A proposta do projeto governamental é que os Telecentros também passem a receber equipamentos de informática da comunidade. No entanto, diante da instabilidade da quantidade desse material descartado pela comunidade e pelas dificuldades operacionais relacionadas com sua coleta e envio para os CRCs, ficou estabelecido que apenas os Telecentros Nucleadores deverão receber equipamentos de informática pós-consumo da comunidade.

Outra questão relacionada à operacionalização deste projeto é a definição de: quais Telecentros enviarão equipamentos descartados para quais CRCs; quais CRCs enviarão equipamentos recondicionados para quais Telecentros; e, quais CRCs enviarão equipamentos para quais empresas de descarte. Por ser um país de grande extensão territorial e considerando que a principal forma de transporte é por rodovia, algumas cidades localizadas em regiões remotas podem ser de difícil acesso.

O Brasil conta com poucas empresas capacitadas e que cumprem as exigências governamentais para tratar os produtos eletroeletrônicos. No total são dezenove empresas, todas na região sudeste. Uma lista dessas empresas e suas respectivas localizações está disponível no Apêndice 1.

Até pouco tempo atrás não existia nenhuma perspectiva sobre o processo de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos no Brasil, ou seja, a destinação correta do material considerado sucata era dificultada pela ausência de empresas aptas a fazer o processo. Porém o crescente consumo desse tipo de equipamento alertou o Governo Federal de que seria importante estabelecer políticas públicas para tratar o problema.

2.3 Desafios para Operacionalização e Ampliação do Programa

Segundo dados da ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), cada brasileiro gera em média 1 KG de lixo TICC, composto por telefones fixos e celulares, televisores e computadores, por ano. Desta forma, o Ministério das Comunicações, através da Secretária de Inclusão Digital, avalia a possibilidade de que os 80 Telecentros, considerados nucleadores se tornem postos de coleta de material. Ou seja, as comunidades nas quais os projetos estão inseridos teriam uma opção de descarte correto para seus resíduos eletrônicos e ainda colaborariam para o projeto.

Nesta proposta, os Telecentros passam a ter uma taxa de entrada de material que pode variar de acordo com a comunidade a qual atende. Após receber esses materiais da comunidade local, os Telecentros devem encaminhá-los para os CRCs. No entanto, segundo estimativas, os Telecentros possuem uma baixa capacidade de armazenamento, cerca de 30 Kg de material, além de não terem pessoal com conhecimento adequado para realizar qualquer tipo de triagem do material recebido.

Ao chegar aos CRCs o material proveniente da comunidade juntamente com o material proveniente de empresas privadas e órgãos governamentais passa por um processo de triagem. Uma estimativa do tempo gasto por cada CRC para recondicionar uma máquina indica que, atualmente, cada CRC gasta, em média, 48 minutos para transformar 3 Kg de material de informática em bom estado em um computador recondicionado. Foi estimada também a quantidade de material de informática que o Governo envia para os CRCs, sendo que, em algumas regiões os CRCs recebem cerca de 50 Kg por semana enquanto em outras regiões chegam a receber cerca de 100 Kg por semana.

Através de relatórios de outros projetos que recolhem material da comunidade (como o da Fundação Banco do Brasil), percebe-se que a qualidade do material que é recolhido possui muita variação. O material proveniente de órgãos governamentais possui uma taxa de aproveitamento de cerca de 80% enquanto que o material proveniente da comunidade tem uma taxa de aproveitamento de 20%. Isto pode ser explicado pelo fato do

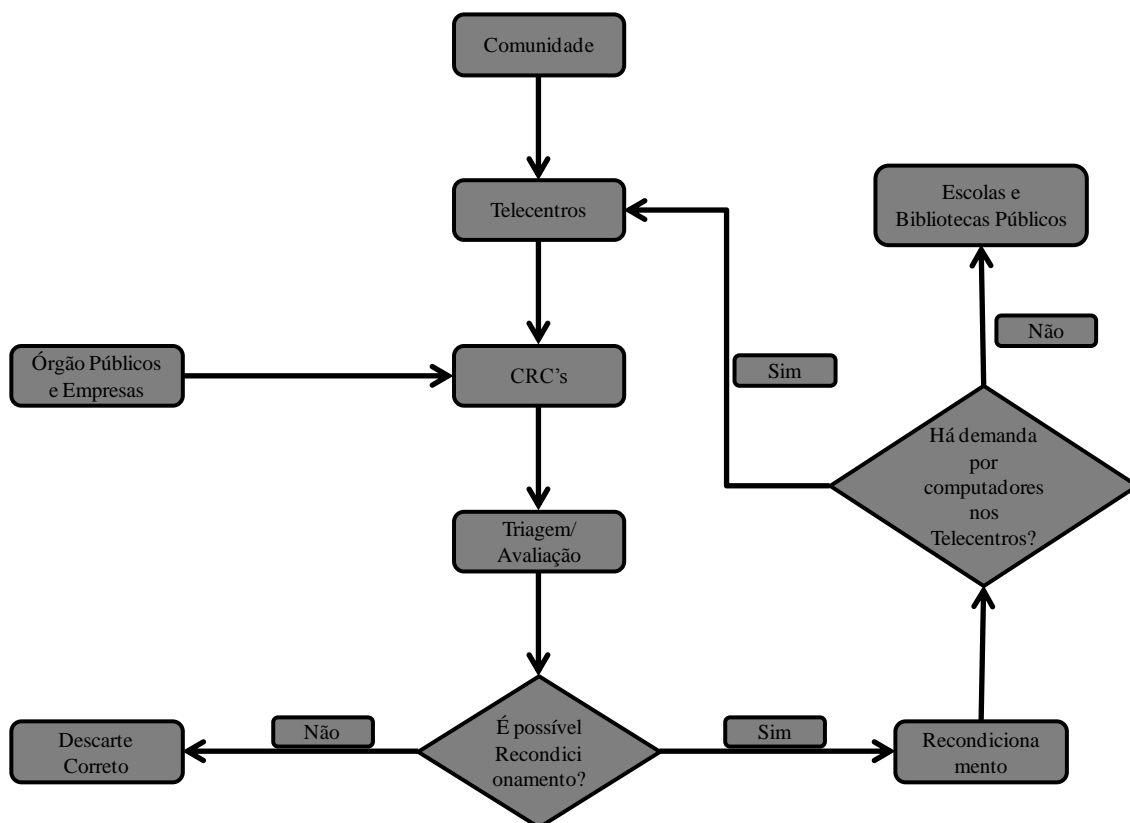
material vindo da comunidade ser de todo lixo tipo TICC, que podem envolver não somente peças de computadores, mas também outros componentes.

Durante o processo de acondicionamento, os computadores são testados para uma análise do potencial de aproveitamento de peças. As peças que podem ser aproveitadas são utilizadas para formar novos computadores enquanto as peças danificadas, juntamente com os demais componentes do lixo tecnológico, serão encaminhadas para empresas especializadas do setor, segundo os critérios da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Os computadores acondicionados são doados aos Telecentros que possuem demanda por computadores acondicionados. Quando a demanda por computadores nos Telecentros é menor que a disponibilidade de computadores acondicionados nos CRCs, estes são encaminhados para as escolas públicas, para as bibliotecas públicas e demais projetos de acesso digital gratuitos.

A Figura 2.5 apresenta o fluxograma com fluxo de retorno para os equipamentos eletrônicos no projeto proposto pelo governo. Note que, os Telecentros recebem material da comunidade e computadores acondicionados dos CRCs, esses computadores são enviados após o processo de acondicionamento. Os CRCs por sua vez, recebem material não processado dos Telecentros e de Órgão Públicos e Empresas.

Figura 2.5 Fluxograma de Funcionamento do Projeto

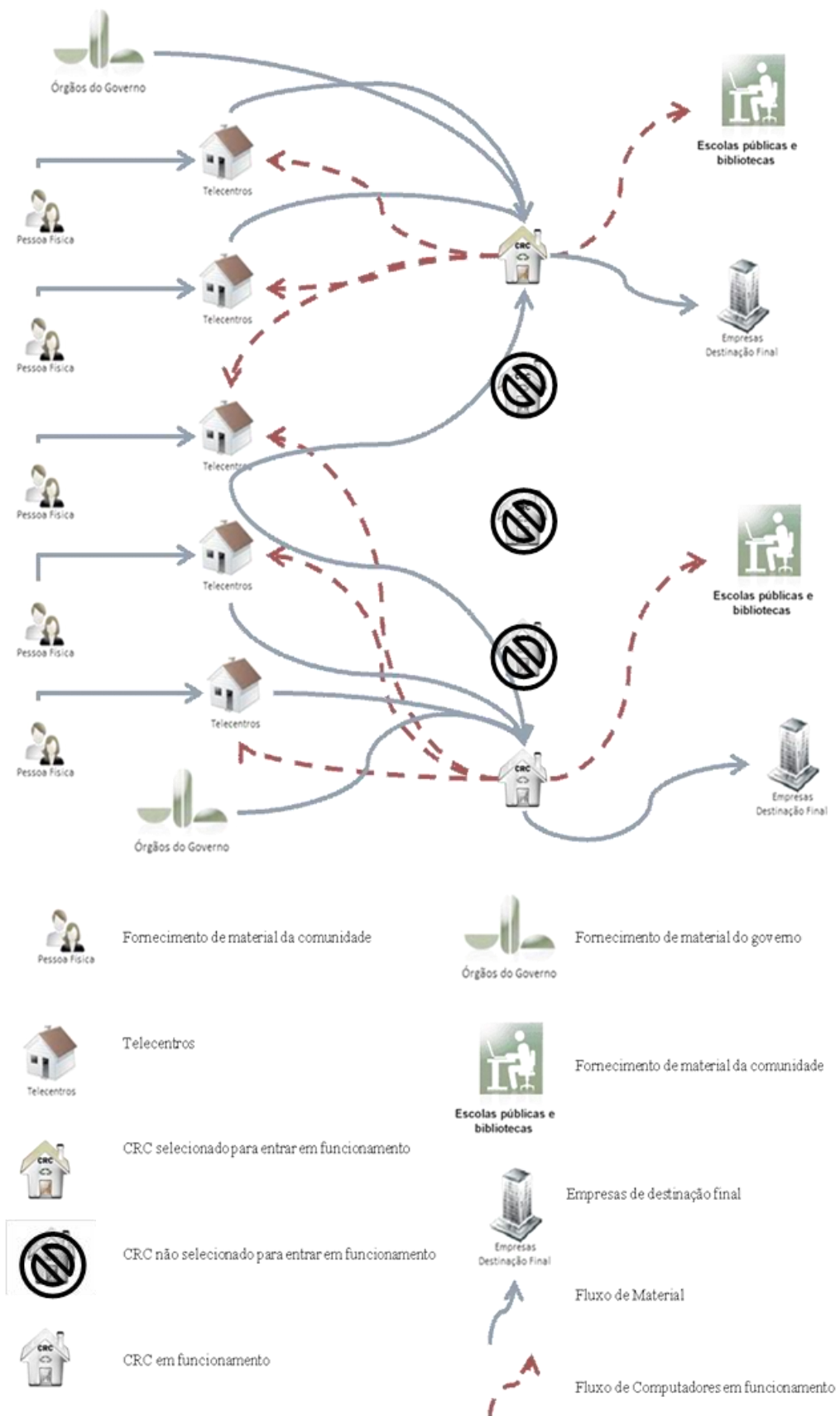


Fonte - Elaborado pela Autora

Na nova estrutura de funcionamento proposta pelo governo cada CRC deve receber material de Telecentros Nucleadores. Após o processamento do material, os CRCs devem enviar os computadores para os mesmos Telecentros nucleadores que suprirão a sua demanda e a de Telecentros menores e salas de informática.

Para demonstrar o funcionamento dessa nova rede foi elaborada a Figura 2.6. Nela estão representados alguns Telecentros, que recebem material eletrônico da comunidade na qual estão inseridos. Considerando que os Telecentros são instalados em locais que pertencem ao poder público (como por exemplo, delegacias, instalações dos SESC-Serviço Social do Comércio, etc.) localizado em grandes centros urbanos, o governo admite que em cada local onde existe um Telecentro há a possibilidade de instalar um CRC. Os CRCs abertos recebem material de Telecentros e de Órgãos Governamentais, cada CRC pode receber material de quantos Telecentros forem necessários desde que não exceda sua capacidade máxima de recebimento de material. Após o processamento do material pelos CRCs, o que é passível de aproveitamento formam Computadores Recondicionados que são direcionados a Telecentros, de acordo com a necessidade, enquanto que o excedente de computadores recondicionados é encaminhado para escolas públicas e bibliotecas. A sucata produzida nesse processo é encaminhada a empresas que realizam a destinação final, listadas no Apêndice 1.

Figura 2.6 Esquema de estrutura da nova do programa ‘Computadores para a Inclusão’



Fonte-Elaborada pela Autora

2.3.1 Problema a ser Modelado

Segundo os relatórios do Projeto +Telecentros o número de CRCs existente é insuficiente para que a proposta seja realizada, considerando as atuais taxas de lixo TICC. Desta forma, este trabalho propõe que a partir dos dados obtidos no site do Ministério das Comunicações e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (<http://www.mcti.gov.br/>), e do projeto intitulado ‘Rede Telecentro do Banco do Brasil’ (<http://www.redetelecentro.com.br/portal/>), estudar modelos de localização de instalações para determinar os melhores locais para a instalação de novos CRCs. Considerando como possíveis locais, para as instalações de novos CRCs, locais onde já existem Telecentros nucleadores, de forma a suportar a demanda crescente de lixo eletrônico nas mais diversas regiões do país, bem como definir quais Telecentros Nucleadores serão atendidos por quais CRCs, determinando não somente quais CRCs receberam materiais de informática dos Telecentros, mas também para quais Telecentros os CRC enviarão os computadores recuperados. Há também a questão do fluxo de sucata de materiais de informática que deve ser encaminhada às empresas de descarte final.

Para determinar o fluxo de materiais é necessário considerar as taxas de recondicionamento dos CRCs, a demanda de coleta de material nos Telecentros, a necessidade de reprocessamento de material, para manter a quantidade mínima de computadores nos Telecentros, e a incapacidade dos CRCs de acumularem uma grande quantidade de material não processado ou sucata, exigindo assim que haja um fluxo constante de material para as empresas recicladoras.

A configuração da rede proposta neste trabalho deve respeitar as restrições de orçamento disponível, tanto para abertura de novas instalações como para o funcionamento do programa (custos de transporte).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre logística reversa, modelos para configuração de rede logística e mais especificamente os modelos para logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos. O objetivo das duas primeiras seções é apresentar a fundamentação teórica para os temas abordados deste trabalho, enquanto que a seção 3 apresenta algumas propostas atuais de modelos quantitativos para auxiliar na solução do problema de descarte de equipamentos eletroeletrônicos. Desta forma, a seção 3.1 apresenta uma revisão sobre logística reversa, à seção 3.2 faz uma breve revisão dos modelos para configuração de rede logística presentes na literatura e na seção 3.3 são apresentados modelos específicos para a logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos.

3.1 Logística Reversa

3.1.1 Definição

O CLM (*Council of Logistics Management*), define logística como um processo para atender as exigências dos clientes. Este processo envolve o planejamento, a implementação e o controle eficiente e eficaz, a um custo justo, do fluxo e da armazenagem desde as matérias primas até o produto acabado, assim como, as informações inerentes a todas as etapas do processo.

A logística é composta por dois tipos de canais de distribuição: o direto e o reverso. O canal de distribuição direto é responsável pelo fluxo de produtos e informações no sentido do produtor ao cliente por diversos meios, como distribuidores, lojas de atacado e varejo, etc. O canal de distribuição reverso é responsável pelo fluxo oposto, a partir do consumidor final até o ponto de origem (COUNCIL OF LOGISTICS MANAGEMENT, 2010).

A prática de reutilização de produtos e materiais não é um fenômeno recente. Há algum tempo já era realizada a reciclagem de metais, papéis e garrafas de bebidas. No caso desses materiais, a reciclagem implica em grandes benefícios econômicos. A crescente preocupação ambiental, as ideias sobre redução e os esforços para ciclos de vida mais econômicos ganharam maior dimensão no fim do século XX (FLEISCHMANN et al., 1997).

Para Bai e Sarkis (2013) as atividades pertencentes à Logística Reversa podem estar relacionadas com a aquisição (através de coleta ou de rastreamento do material), com o gerenciamento do processo de transformação e, eventualmente, com a redistribuição do material transformado. As atividades de planejamento e gestão de estoque e armazenamento,

para os processos de transformação, podem ser consideradas como atividades de apoio para atingir os mais amplos objetivos da gestão da Logística Reversa.

Srivastava (2007) define logística reversa como um processo que permeia a mesma definição da logística direta, porém dedicada ao fluxo no sentido oposto, a partir do ponto de consumo de um determinado produto até o seu ponto de origem, com o objetivo de recapturar valor ou dar destinação adequada ao mesmo. A logística reversa pode ser considerada como um segmento, dentro da logística convencional especializada em devoluções de produtos para o reparo ou agregação de valor, movimentando e gerenciando o pós-venda e o pós-consumo (Vitasek, 2013).

Para Rogers e Tibben-Lembke (1999) a logística reversa é um processo que ocorre do ponto de consumo até o ponto de origem, envolvendo planejamento, implementação, controle de fluxo de matérias primas, estoque, produtos acabados e informações. Desta forma, a logística reversa passou a ser uma realidade em termos de investimento estratégico, modificando a visão das empresas que pararam de vê-la apenas como um gerador de altos custos internos e passaram a considerá-la como um diferencial competitivo.

As definições de logística Reversa permeiam sempre a ideia de agregar valor ao material que está na fase final de utilização. Para muitos materiais é possível a reutilização para as mesmas funções, como as latas de alumínio, para funções próximas as que desempenhavam, como por exemplo, computadores que podem ser reconicionados para o mercado de segunda mão, ou para funções completamente diferentes, como por exemplo, os pneus que se transformam em móveis, peças de moda, componente para o asfalto, etc.. A ideia é gerenciar partes ou integralmente a cadeia responsável pelo retorno desses materiais e suas perspectivas de transformação.

3.1.2 Classificação

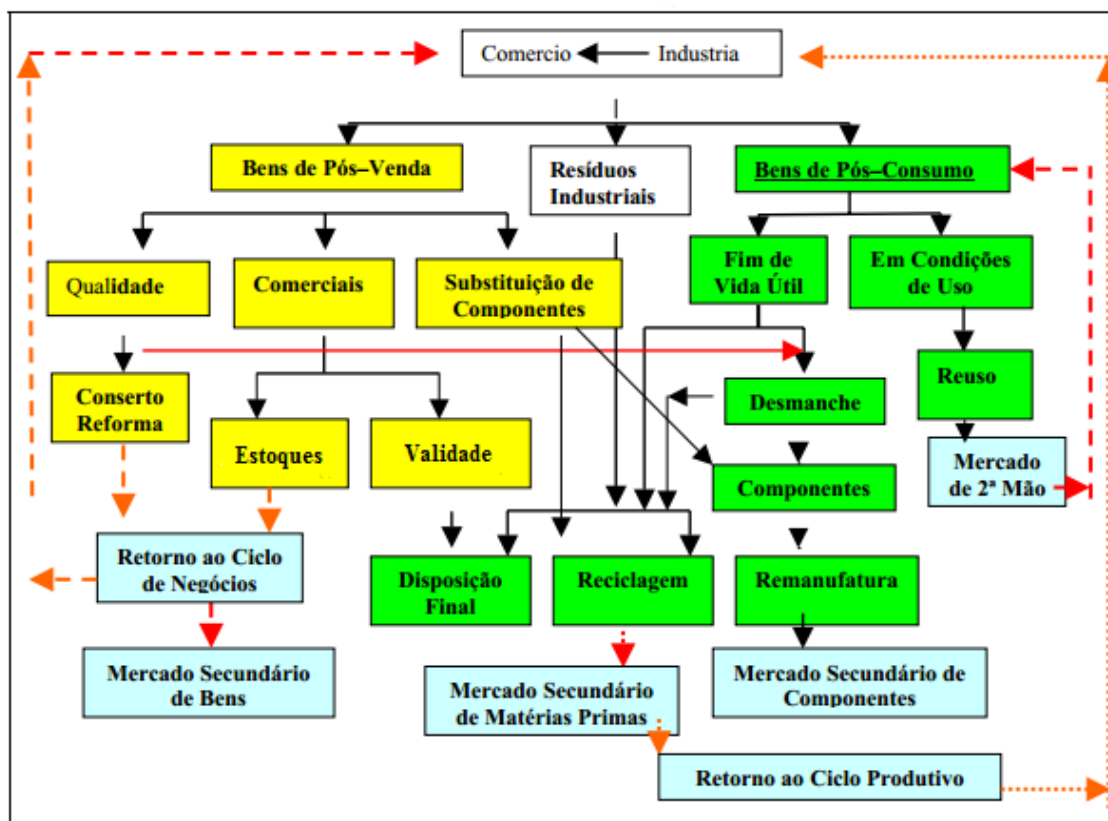
A logística reversa pode ser classificada quanto à natureza dos produtos que ela retorna, que podem ser pós-venda ou pós-consumo, quanto a forma como esse retorno será feito, quanto ao tipo de estoque e quanto a forma de inserção desse material na linha de produção. Savaskan, Bhattacharya e Van Wassenhove (2004) relatam em sua pesquisa que há três possibilidades de modelar o canal reverso. A primeira é quando o material retorna do cliente diretamente ao fabricante, sem passar por nenhuma instalação intermediária envolvida no canal direto. A segunda é quando o cliente envia seu material para instalações intermediárias envolvidas no canal direto que encaminham de volta ao fabricante. A terceira

é, quando o canal reverso possui alguma forma de terceirização desse serviço, seja através de cooperativas, de empresas especializadas, de políticas governamentais, etc..

A logística reversa pode ocorrer por dois canais reversos diferentes: o pós-venda e o pós-consumo. O canal logístico reverso pós-venda caracteriza-se pela reutilização e pela revenda como subproduto ou como produto de segunda linha, ou seja, em qualquer estágio da cadeia produtiva, o produto pode ser inserido novamente no mercado. Já a logística reversa pós-consumo envolve o planejamento, o controle e a disposição final de bens ao final de sua vida útil (GUARNIERI; OLIVEIRA; STADLER; KOVALESKI, 2005).

A Figura 3.1 mostra a atuação da Logística Reversa através do fluxo no canal de distribuição reverso, dos produtos pós-venda e pós-consumo.

Figura 3.1 Canais de Distribuição pós-venda e pós-consumo



Fonte: (LEITE, 2002)

Conforme pode ser visto na Figura 3.1, a Logística Reversa pós-venda se responsabiliza pelo planejamento, operação e controle do fluxo de retorno de produtos, motivada pelas questões relacionadas a problemas de ‘Qualidade ou produtos na Garantia’, por ‘Razões Comerciais’ ou pela necessidade de ‘Substituições de Componentes’ (LEITE, 2002). O fluxo reverso de produtos por problemas de qualidade ou garantia é caracterizado

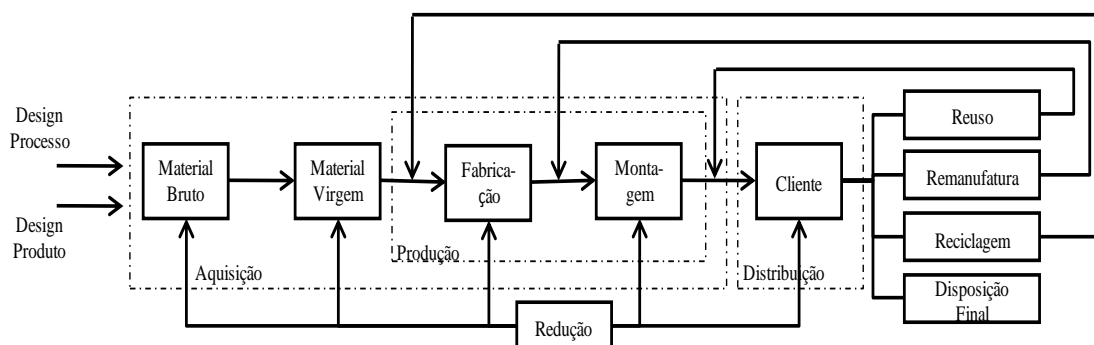
por tratar de produtos que possuam defeitos de fabricação ou que apresentem um mau funcionamento dentro do prazo de garantia, além de produtos que sofreram algum tipo de dano no processo logístico entre o local de fabricação e o consumidor final. Estes produtos podem ser concertados ou reformados de forma que retornem ao mercado primário ou são encaminhados a um possível mercado secundário.

O fluxo reverso motivado por questões ‘Comerciais’ pode ser dividido em duas categorias: produtos com prazo de validade expirado ou produtos com problemas na distribuição direta e que necessitam de retorno, como por exemplo, erros de expedição, excesso de estoques nos canais de distribuição, liquidações, etc. Os produtos retornados por esse motivo são direcionados novamente ao ciclo de negócios através de redistribuição em outros canais de vendas. Finalmente, o fluxo reverso pós-venda pode ser motivado pela ‘Substituição de Componentes’, que acontece em produtos classificados como bens duráveis ou semiduráveis, que necessitam de manutenção ao longo de sua vida útil, sendo remanufaturados sempre que possível para um retorno a um mercado primário ou secundário, (LEITE, 2002).

De acordo com Leite (2002), o canal de logística reversa pós-consumo pode ser subdividido de acordo com o estado do produto: “Em Condições de Uso” ou “Fim de Vida Útil”. Os produtos “Em Condições de Uso” consistem em bens semiduráveis e duráveis que possuem um potencial mercado de segunda mão. Esses produtos que entram no canal “reuso” são destinados novamente a um mercado consumidor e depois voltam à mesma categoria, esse processo ocorre até que se atinja o “Fim de Vida Útil”.

Helms e Sarkis (2005) citam uma série de práticas consideradas ambientalmente conscientes conhecidas como 4R's: reduzir, reutilizar, remanufaturar e reciclar. Jayaraman; Patterson e Rolland (2003) afirmam que os 4 R's incentivam os fabricantes a informar o público sobre as práticas de logística verdes e recolher os produtos para reparação, substituição, reembolso e destruição de qualquer produto que apresente um perigo para o meio ambiente. A Figura 3.2 adaptada de Sarkis (2003) especifica em qual parte do processo produtivo, cada um dos 4R's se encaixam para produtos pós-consumo. Esta figura é interessante para explicar as diferenças entre cada atividade de recuperação.

Figura 3.2 Cenário de sub-processos 4R's para produtos pós consumo.



Fonte: Adaptado de Sarkis (2003).

Das atividades que compõem os 4R's, três podem ser consideradas subsistemas reversos: reciclagem, remanufatura e reuso.

Os três subsistemas reversos: reciclagem, remanufatura e reuso, são chamados elementos de fim de linha. O tipo de subsistema reverso pelo qual um produto vai passar depende do estado no qual o material chega ao ponto de reciclagem e de acordos entre clientes, fornecedores e produtores. Quando um produto é destinado à reciclagem suas características físicas e químicas serão modificadas, por isso ele volta ao processo produtivo na etapa de transformação de matéria prima para a fabricação. A remanufatura envolve um processo de desmontagem e substituição de algumas peças, para isso a etapa da produção que se encaixa é depois da fabricação para que possa receber novas peças ou compor novas peças a serem fabricadas. Por fim, temos a reutilização que é quando um produto retorna a fábrica, mas mantém sua estrutura original antes de ser encaminhado a uma nova destinação (LACERDA, 2002; SARKIS, 2003).

A redução pode permear todo o processo de produção e juntamente com a disposição final correta consistem em medidas que pode ser adotadas por empresas, instituições públicas e privadas. A redução e a disposição final adequada são medidas ambientalmente conscientes. A redução é a única medida que podem ser considerada como pró-ativa, ou seja, capaz de ser realizada durante a produção dos produtos. A redução pode ser obtida por investimentos tecnológicos, melhorias na organização da linha de produção ou pela implantação de medidas de qualidade com a intenção de atingir a qualidade total com a minimização de desperdícios (SARKIS, 2003).

Para compreender melhor cada subsistema é importante também entender as fases pelas quais os produtos envolvidos na logística reversa passam, que são: coleta, inspeção/separação, reprocessamento, eliminação/descarte e redistribuição

(FLEISCHMANN et al., 2001). A coleta envolve todo o processo de movimentação do material até um posto de tratamento. Esse processo geralmente envolve as atividades de compra, transporte e armazenamento. A inspeção ou separação são as operações que determinam se um produto é reutilizável ou não e, de que forma pode ser reutilizado. O reprocessamento é a transformação de um produto que está inserido na cadeia logística reversa em algo utilizável novamente. A eliminação ou descarte ocorre somente com um produto que não pode mais ser reutilizável, seja por razões técnicas ou econômicas. Finalmente, a etapa de redistribuição que consiste em mover os produtos reutilizáveis para um mercado em potencial.

Fleischmann et al. (2000) apresentam uma classificação de Logística Reversa onde destacam que as redes devem ser classificadas de acordo com cinco critérios: (i) grau de centralização, que indica se a operação é realizada em vários locais em paralelo ou em apenas um local, (ii) número de níveis, se diferentes atividades são realizadas em diversos locais ou se apenas um local concentra os diversos níveis de processo, (iii) ligação com outras redes, (iv) estrutura aberta ou fechada, que consiste na relação entre o fluxo de entrada e de saída, e, (v) grau de cooperação, se a rede é composta por apenas uma empresa ou por diversas empresas terceirizadas.

Segundo Fleischmann et al. (1997) a logística reversa pode ser ainda classificada quanto a dois fatores: a estrutura de estoques e o planejamento da produção. No ponto de vista do estoque, existem dois tipos de indústrias que trabalham com processos de reciclagem: as que adquirem os materiais de empresas ou cooperativas recicladoras e as empresas que recolhem o material através de um canal reverso próprio. Quando uma empresa compra o material reciclado o controle de estoque é mais simples, pois o material pode ser comprado de acordo com a demanda e com a qualidade exigida. No caso da responsabilidade pela logística reversa do material ser da própria empresa, surgem dificuldades no processo, como por exemplo, controlar a qualidade, a quantidade e o tempo gasto para obter aquela matéria prima. Considerando que existem diversas incertezas no processo, o controle de estoques se torna um desafio.

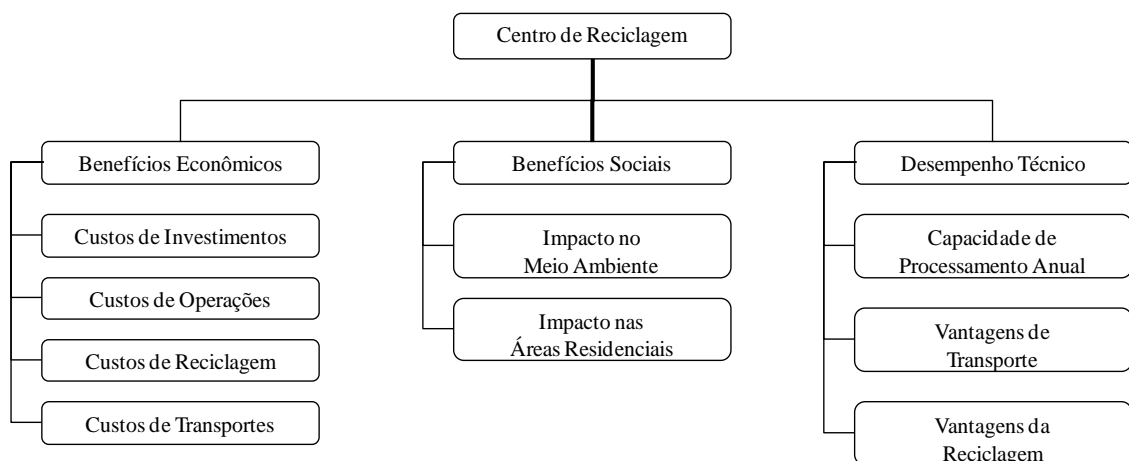
O processo de planejamento da produção reversa também pode ser dividido de acordo com o tratamento dos materiais. Muitos produtos podem ser reutilizados passando apenas por um processo de limpeza e pequenos reparos, ou seja, não é necessário voltar para a linha de produção. Outros produtos necessitam de um processo de remanufatura, entrando na linha de produção como peça ou como uma matéria prima como qualquer outra. Na indústria de eletroeletrônico temos ambos os processos.

3.1.3 Motivações para Logística Reversa

As motivações para a realização da Logística Reversa envolvem questões econômicas, ambientais e sociais. As questões econômicas envolvem o lucro passível do acondicionamento. As questões ambientais estão relacionadas com a preservação dos recursos naturais, ao diminuir a extração de material quando reaproveitamos outro, e a questão do descarte ambientalmente correto, evitando contaminações da população e do meio ambiente. As questões sociais estão associadas aos ganhos que podem ser obtidos para a sociedade, por exemplo, no caso do programa ‘Computadores para a Inclusão’, a questão social está relacionada com a ampliação do acesso digital a comunidades carentes. Em algumas situações podemos perceber a união dessas questões, muitas empresas apresentam programas de logística reversa para cumprir legislações e/ou receberem incentivos governamentais (TIAN, 2011), outras se dedicam a promover a logística reversa, pois acreditam que seus consumidores valorizam essas medidas (LORENA; CHAVES, 2006).

Para Seitz (2007) a logística reversa tem um lado social e ético, que vem recebendo o nome de: "responsabilidade social corporativa", isso ocorre quando uma empresa percebe que é moralmente, ou eticamente, responsável pelo impacto de suas ações. Baseando-se na responsabilidade social corporativa ferramentas multi-critério são usadas para conciliar fatores quantitativos e qualitativos. A Figura 3.3 apresenta os principais fatores que influenciam no processo decisório da logística reversa quantitativamente e qualitativamente.

Figura 3.3 Fatores para tomada de Decisões na Logística Reversa



Fonte : Adaptado de Hua-Dong (2010)

Os fatores quantitativos desse processo decisório estão ligados aos benefícios econômicos e ao bom desempenho técnico. Os benefícios econômicos estão relacionados

com a estabilidade econômica das instalações e das redes que manterão o funcionamento do Canal Reverso através do monitoramento e planejamento dos custos de investimento, operações, reciclagem e transportes. O desempenho técnico são as necessidades associadas ao funcionamento do centro de reciclagem, determinando a capacidade de processamento de material e as vantagens que ocorrerão caso a instalação seja em determinado lugar. O fator qualitativo está presente nos benefícios sociais, pois quando ocorre a implantação de um centro de reciclagem, deve-se considerar a comunidade na qual estará inserido e os possíveis impactos que podem ser causados ou evitados com a instalação.

3.1.4 Práticas Atuais e Tendências

A popularização da logística reversa se tornou muito mais forte no final da década de 80 com a indústria automotiva realizando os primeiros processos de remanufatura, (POKHAREL; MUTHA, 2009; SEITZ, 2007). Segundo Jingbo (2006), são três os principais fatores que contribuíram para isso: o surgimento de Leis Ambientais, ou seja, a intervenção governamental, a visão socioambiental da população e das próprias empresas, e os fatores econômicos.

Intervenções governamentais para incentivar as atividades relacionadas a Logística Reversa, ocorreram na Alemanha, em 1991. O governo criou exigências para que a indústria de embalagens reciclasse um determinado percentual mínimo de embalagens, já em 1996 surgiram às primeiras metas para reciclagem de produtos eletroeletrônicos. Nos Países Baixos a indústria automobilística é responsável pela reciclagem dos carros que produzem desde 1992. Em 1994 a Europa reciclou 27,7 milhões de toneladas de papel, o que corresponde a 43% da produção total de papel no continente naquele ano, e 7 milhões de toneladas de vidro, o correspondente a 60% da produção continental. Com essas medidas de conscientização a imagem "verde" passou a ser um excelente elemento de marketing (FLEISCHMANN et al., 1997).

Outros governos também incentivaram práticas de logística reversa. Kim *et. al* 2009 apresenta uma opção de logística reversa que vem sendo adotada na Coreia do Sul para os produtos eletroeletrônicos. Desde 2003 quando a política de ERP (Responsabilidade Estendida ao Produtor) passou a existir no país, ao comprar um produto novo, o consumidor tem direito que o produto seja recolhido. Cabe aos varejistas recolherem e enviarem o produto usado para um centro de reciclagem sem custo ao consumidor. Caso o consumidor queira se desfazer de um eletroeletrônico, sem adquirir um novo, deve procurar a autoridade

local e custear o retorno desses produtos a um centro de reciclagem. Assim essa política integra responsabilidade sobre o fim de vida de um produto a clientes, empresas e governo.

A visão socioambiental da logística reversa permeia a percepção de que considerar apenas os efeitos locais e imediatos dos produtos que comercializa e dos processos que realiza não é socialmente e economicamente aceitável. Isso levou empresas a aumentarem a complexidade do pensamento sobre a sua Cadeia de Suprimentos. Desta forma, a Cadeia de Suprimentos tradicional foi estendida para incluir atividades que visam minimizar impactos ambientais dos processos e dos produtos em todo o seu ciclo de vida GSCM (*Green Supply Chain Management*) (BEAMON, 1999).

Esse planejamento referente a logística reversa está inserido no conceito do que hoje é chamado de GSCM. A capacidade de integração entre o pensamento ambiental e a Gestão da Cadeia de Suprimentos é a base para a GSCM. A partir dessa integração o *design* de produtos (envolvendo desde a seleção de matérias primas até o abastecimento), o processo de fabricação, a entrega ao consumidor final e o gerenciamento de descartes passaram a ser fatores de análise para empresas que perceberam que essas mudanças não implicam apenas em despesas mas também em uma vantagem competitiva (ZHU; COTE, 2004).

Jingbo (2006) defende que seria mais fácil estabelecer uma cadeia de suprimentos verde considerando o planejamento da logística reversa desde o processo de criação de um produto. As empresas que buscam uma implantação da prática de *Green Supply Chain Management* querem resultados ambientais, econômicos e uma redução de custos, mas também podem obter resultados intangíveis nesse processo (ELTAYEB; ZAILANI; RAMAYAH, 2011). Para Hua-Dong (2010) esses resultados intangíveis estão ligados a melhoria da comunidade local e de seus empregados. Quando uma empresa investe em consciência ambiental transmite esses valores ao longo de sua Cadeia de Suprimentos influenciando fornecedores, prestadores de serviços, funcionários e até mesmo clientes, reforçando os conceitos de empresa socialmente consciente (JAYARAMAN; PATTERSON; ROLLAND, 2003; ZHU; COTE, 2004).

Entre os principais fatores que contribuíram para o desenvolvimento da logística reversa temos a motivação econômica, presente no caso dos EUA. Por volta de 1996, a motivação econômica de recuperar valor ainda incorporado em produtos usados levou a indústria de peças e máquinas, a recolher materiais em fim de vida útil e reaproveitá-los (FLEISCHMANN et al., 1997). Estimativas do governo americano apontam que são vendidos cerca de 60 milhões de computadores por ano, e esse valor não para de crescer. Na

outra ponta da cadeia logística dos computadores americanos temos a logística reversa de apenas 12% do material vendido anualmente, ou seja, 12 milhões de computadores descartados por ano passam pelo processo de reciclagem (“E-Waste,” 2013).

A EPA (Agencia de Proteção Ambiental Americana) estima que a taxa de lixo eletroeletrônico cresce de duas a três vezes mais rápido do que qualquer outro material. Ainda segundo dados da EPA, apenas de 15% a 20% desse material é reciclado dentro do território americano. A grande maioria do lixo eletroeletrônico americano é exportado para países em desenvolvimento, como: Índia, Nigéria e China. Para termos uma dimensão dessa lucratividade em 2008 o estado da Califórnia lucrou 20 milhões de libras com a exportação desse material. (“E-Waste,” 2013; RAVI; SHANKAR; TIWARI, 2005).

Savaskan; Bhattacharya e Van Wassenhove (2004) relatam o empenho de algumas empresas para colocar em prática um sistema de logística reversa eficiente. Segundo os autores, a empresa Xerox oferece caixas de transporte reverso pré-pagos para que seus clientes enviem de volta para a fábrica cartuchos ao fim da vida útil, além disso realizam a logística reversa de máquinas de grande porte, o que implica em economias de 40% a 65% no processo produtivo. Outro exemplo citado pelos autores é a empresa Kodak Company, que oferece aos varejistas um valor fixo por máquina coletada mais os custos de transporte, para que eles façam a coleta reversa de suas máquinas fotográficas junto aos clientes. Isso é justificado, pois 76% do peso de uma câmera fotográfica que retorna a empresa pode ser utilizada na confecção de uma nova.

3.2 Modelos para Configuração de Rede Logística

A rede logística é composta pelos participantes da cadeia de suprimentos envolvidos no armazenamento, manipulação, transferência, transporte e comunicação para o fluxo de mercadorias. O objetivo do planejamento de uma rede logística é desenvolver estratégias de controle de estoque e planejamento do transporte dos produtos internos a essa rede, otimizando tempo, custos de viagens e manutenção de estoques (BUDGETING; COSTING, 2010). Para a configuração de uma rede logística são necessárias decisões sobre a instalação das facilidades envolvidas em todo o processo (fábricas, armazéns, depósitos, etc.), decisões sobre as formas de transporte (opções de modal, terceirização de frota, etc.) e, quando há processo de logística reversa, decisão sobre se a rede direta servirá também como rede reversa, se haverá uma rede reversa independente ou se a logística reversa será terceirizada.

Diversos modelos são apresentados na literatura para configuração de rede logística. A maior parte é baseada nos modelos clássicos utilizados para a configuração da rede direta, como: p -mediana, p -centro e Cobertura. Segundo Melkote e Daskin, (2001) a maior parte desses modelos combina a localização das facilidades/instalações da rede com *tradeoff* entre os custos de instalação, custos de operação e custos de projetar a rede.

3.2.1 Modelos de Localização

A literatura dos problemas de localização de instalações é bastante extensa. A modelagem matemática desses problemas explora diversos aspectos como, por exemplo, a natureza do problema, como são tratadas as distâncias, o número de facilidades a serem abertas, a estrutura de tempo, etc. (DASKIN, 1995).

Os modelos de localização de instalações podem ser classificados como: modelo de localização no plano (*planar location models*), modelos de localização discretos (*discrete location models*) ou modelos de localização de rede (*network location*). Os modelos de localização no plano consideram que as facilidades a serem instaladas podem ser instaladas em qualquer local dentro de uma coordenada em um plano (X,Y). No modelo de localização discreto temos a formação da rede e só é possível localizar as instalações nos nós. No modelo *network location* a localização das instalações podem ser nos nós ou também ao longo das arestas (DASKIN, 1995).

Existem diversas aplicações para os modelos de localização de facilidades, seja no setor privado ou no setor público. Os problemas no setor público envolvem, geralmente, a maximização da satisfação da população em detrimento aos custos ou a minimização de distância entre a população e as instalações. Grande parte desses problemas dizem respeito à instalação de escolas, hospitais, pontos de ônibus, etc. quando o objetivo é a instalação de uma determinada quantidade de facilidades temos os modelos de capacidade ilimitada (Daskin, 1995). No setor privado destacam-se os problemas de minimização de custos na instalação de fábricas, depósitos e lojas, há também modelos de minimização dos custos de fluxo da rede. A maior parte desses problemas há a necessidade de uma capacidade de armazenamento, processamento e fluxo de rede associada. Os modelos que abordam essas questões são os modelos capacitados (LORENA et al., 2001). O número de facilidades a serem abertas pode ser conhecido, nos modelos de Cobertura, de p -centro e de p -mediana, ou não, como em alguns modelos de localização que consideram a decisão da quantidade de facilidades a serem abertas endógenas ao problema, ou seja, o próprio modelo determina quantas facilidades serão abertas.

O Problema de Cobertura pode ser considerado um problema de designação e são muito utilizados para determinar instalações de facilidades como ambulâncias, delegacias, hospitais, etc. O problema de localização p -centro envolve a localização de facilidades e a designação de clientes a elas, de modo a minimizar a distância máxima envolvida, entre os clientes e as facilidades. O Problema de p -mediana possui uma função assemelha-se ao de p -centro só que há na função objetivo uma determinação a minimizar dos custos de se atender à demanda. Uma revisão detalhada desses modelos pode ser encontrada em Daskin (1995).

O *Uncapacitated Fixed Charge Facility Location Problem* (UFCLP) é um problema de localização de facilidades incapacitado, semelhante ao da p -mediana, porém é adicionado um custo fixo à abertura de novas instalações, o resultado é um modelo que determina endogenamente o número de instalações e os locais a serem abertas as facilidades de modo a minimizar o total (abertura mais viagens) dos custos (OWEN e DASKIN, 1998). Semelhante ao modelo UFCLP temos o *Capacitated Fixed Charge Facility Location Problem* (CFCLP) a formulação dos dois modelos é idêntica, porém há um parâmetro de capacidade relacionado às instalações passíveis de abertura, com o uma alteração na restrição de cumprimento da demanda (DASKIN, 1995).

A grande maioria dos problemas de localização busca a minimização de custos, que geralmente estão relacionados diretamente ou indiretamente com as distâncias. Nem sempre as distâncias são conhecidas, mas existem métodos para de calcular a distância entre dois pontos, por exemplo: a Distância Métrica Unidimensional, a distância Euclidiana e a distancia Métrica N-Dimensional. Os dois primeiros métodos são mais adequados quando temos dois planos, já a terceira pode ser utilizada para múltiplos planos. A distância métrica em linha reta usa um cálculo de distância simples para determinar a distancia entre dois pontos. Já a Euclidiana e a Métrica usam o Teorema de Pitágoras para calcular as distâncias.

Dentro dos problemas de localização, os parâmetros relacionados ao tempo, podem ser tratados de maneira estática ou dinâmica. Muitos problemas de são de alta complexidade, por isso não consideraram a mudança do valor de parâmetros ao longo tempo simplificando o problema (ALUMUR et al., 2012). Para alguns modelos a variação de parâmetros ao longo do tempo deve ser considerada, considerando que decisões sobre localização envolvem um horizonte de planejamento estendido, resultando em modelos dinâmicos (OWEN; DASKIN, 1998).

Os dados referentes às redes de problemas de localização frequentemente apresentam incertezas. Os modelos cujos parâmetros apresentam um comportamento incerto são chamados de modelos estocásticos, ou probabilísticos. Nesses modelos uma distribuição

de probabilidade é considerada para estimar os parâmetros ou é utilizado um conjunto de cenários discretos. Os modelos determinísticos são aqueles em que os parâmetros são conhecidos (ALUMUR et al., 2012; OWEN; DASKIN, 1998).

Quanto ao objetivo dos problemas de otimização, estes podem ser divididos em simples ou multi objetivos. A maior parte dos problemas de localização possuem apenas uma função objetivo que deve ser otimizada. Porém muitos modelos possuem mais que uma função objetivo, sejam elas de minimização ou maximização, sendo classificados como problemas multi-objetivo (TICONA; DELBÉM 2008). Alguns exemplos de modelos multi-objetivo podem ser encontrados nos trabalhos de Mallidis; Dekker e Vlachos (2010) e de Du e Evans (2008). Os primeiros autores propõem um modelo multiobjetivo para uma rede de cadeia de abastecimento, visando à minimização tanto dos custos quanto das emissões de gases poluentes. A metodologia proposta pelos autores ajuda a identificar os custos ambientais, tanto da instalação de centros de distribuição, quanto da alocação ou terceirização das operações de transporte. Du e Evans (2008) propõem um modelo bi-objetivo para redes de logística reversa que lidam com os retornos que necessitam de serviços de reparação. O modelo busca minimizar os custos globais e os custos de atraso no tempo de ciclo.

Algumas redes reversas são integradas a rede direta, compartilhando algumas instalações e fazendo com que o ciclo do produto seja fechado, isto é, após o final da vida útil o produto volta para os fabricantes. Outras redes concentram totalmente nas atividades reversas, a rede de recuperação. Desta forma, os modelos para planejamento desta rede podem ser divididos em: recuperação (*recovery*) e ciclo fechado (*closed loop*).

3.2.2 Modelos de Localização para Logística Reversa

Dentre os modelos de logística reversa presentes na literatura podemos destacar dois modelos incapacitados, de ciclo fechado, determinísticos, mono-objetivo e estático: Lu e Bostel (2007) e Melkote e Daskin (2001).

Lu e Bostel (2007) apresentam um problema de localização de dois níveis com três tipos de instalação a serem localizadas em um sistema de logística reversa. Para este problema, os autores propõem um modelo de programação inteira mista não capacitado que considera simultaneamente os fluxos diretos e reversos e suas interações mútuas. Para o modelo de localização de instalações tradicional sem restrições de capacidade, sabemos que a demanda de cada cliente será totalmente alocada a uma única instalação, no entanto, isso não ocorre sempre o caso de redes com fluxo reverso. Neste exemplo, a demanda de

produtos para os clientes será fornecida por centros de remanufatura e fábricas, isso é resultado de restrições mútuas de fluxos diretos e reversos que são impostas.

O modelo matemático proposto por Melkote e Daskin (2001) para o problema de localização de instalações e configuração de rede sem restrições de capacidade (UFLNDP - do termo em inglês *The Uncapacitated Facility Location/ Network Design Problem*) ou Modelo De Problema De Rede De Projetos De Instalação, está relacionado à possibilidade de ser mais vantajoso economicamente alterar uma rede subjacente para realizar a logística reversa, ao invés de se obter novas instalações, assim esse modelo reúne a lógica de uma logística direta, mas com capacidade operacional para a logística reversa. O modelo se aplica a situações em que se faz necessário um equilíbrio entre custos de instalações, custos de projeto de rede e custos operacionais.

Os demais modelos a serem apresentados são capacitados, porém diferem-se em como abordam seus objetivos (mono-objetivo e multi-objetivo), como atribuem valores a seus parâmetros (determinísticos e estocásticos), como o comportamento referente ao tempo é abordado (estático ou dinâmico) e como o ciclo do produto foi abordado (ciclo fechado ou recuperação).

Os trabalhos de ciclo fechado como o de Cruz-Rivera e Ertel (2009) discutem a gestão Rede Logística de Ciclo Fechado para automóveis. Segundo os autores a realidade do ciclo reverso é muito diferente entre países da União Europeia e de outros países em desenvolvimento. Nos países em desenvolvimento a gestão de produtos na sua fase de fim de vida ainda não foi abordado pelas autoridades ambientais como uma questão importante. Assim a atual administração dos veículos em fim de vida útil é conduzido pelas condições de mercado, onde os materiais e componentes mais valiosos são recuperados e o alvo principal dos recicladores é obter a maior rentabilidade. A partir do problema descrito Cruz-Rivera e Ertel (2009) buscam uma solução lógica para uma rede de coleta dos veículos no fim de sua vida útil. O cenário ideal seria localizar um centro de retorno nos mesmos lugares onde os veículos são produzidos, assim, cada localidade teria uma oferta de instalação para devolução, despoluição e desmontagem. No entanto, do ponto de vista operacional, a solução é inviável. Assim, uma outra configuração teve de ser encontrada, a fim de maximizar o uso dos recursos e conceder uma rede bem sucedida de recolha. A configuração se baseou em três características: (i) número de pontos possíveis para alocar instalações, (ii) cumprir os objetivos do sistema em termos de cobertura e custos, e (iii) respeitar a capacidade em todas as instalações.

Demirel e Gökçen (2008) e Jayaraman e Ross (2003) também apresentam modelos para a logística de ciclo fechado através da programação inteira mista. O primeiro otimiza a produção e o transporte de quantidades fabricadas e remanufaturadas de produtos, considerando que os materiais que o compõe ou no fim da vida útil, podem ser reinseridos na cadeia produtiva e servir como matéria prima da linha de produção. Nesse modelo o estudo de localização envolve não apenas centros de coleta e distribuição, mas também o centro de produção, onde os produtos são desmontados para que as peças sirvam de matérias primas para a produção. Já Jayaraman e Ross (2003) descrevem um sistema que trata de uma classe de problemas de projeto de rede de distribuição, que é caracterizada por várias famílias de produtos. O modelo determina a quantidade necessária de famílias de produtos que precisam ser transportadas: da fábrica para os centros de distribuição, da fábrica para os armazéns, dos armazéns para os estabelecimentos dos clientes e, posteriormente, determina o fluxo reverso. São propostos dois modelos inteiros mistos, onde o primeiro é uma modelagem integrada da rede, já o segundo é um modelo de distribuição para demonstrar a eficiência da utilização de *cross-docking* (processo de distribuição sem estocagem) na rede.

Outro modelo de programação linear inteira mista para a cadeia logística de ciclo fechado é apresentado por Schultmann; Engels e Rentz (2003). É abordado o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos de recuperação para baterias e pilhas, o modelo proposto busca minimizar os custos fixos de abertura de instalações e transporte, selecionando dentro de um determinado grupo de possibilidade de locais para a abertura das instalações.

A cadeia logística de ciclo fechado aparece ainda em Min, Jeung e Seong, (2006-a). Com a proposta de um modelo de programação não linear inteira mista e um algoritmo genético para modelar o problema de logística reversa da devolução de produtos em cadeias reversas de varejos on-line e televendas. O modelo proposto é projetado para encontrar o local ideal, número e tamanho dos pontos de coleta inicial e centros de retorno na rede de logística reversa sob limites de capacidade e exigências de serviço, minimizando os custos totais da rede. Min; Jeung e Seong (2006-b) tratam do mesmo problema anteriormente apresentado, porém com diferencial em relação ao tratamento do tempo, nesse segundo trabalho temos um modelo dinâmico, e com a capacidade das instalações de maneira estocástica.

Há outros modelos estocásticos que abordam a logística reversa de ciclo fechado, como em Min; Jeung e Seong (2006-b). Listes (2007) consideram um modelo estocástico genérico para o projeto de redes que incluam a oferta de logística reversa em canais

organizados dentro de um sistema de Ciclo Fechado. O modelo apresenta a possibilidade de se construir diversos cenários mesmo com níveis críticos de dados de projeto, como demanda da rede e quantidade de material a ser retornado.

O trabalho dinâmico e estático para a logística reversa de ciclo fechado de Barros; Dekker e Scholten (1998), que configuraram a rede de reciclagem de areia, na Holanda, propondo um modelo de rede de reutilização com localizações de dois níveis para o problema da areia considerando a sua otimização através de procedimentos heurísticos, serve de base para um modelo de ciclo fechado estocástico. Listes e Dekker (2005) retomam este trabalho, propondo uma abordagem baseada em programação estocástica concentrando em encontrar um local apropriado para as novas instalações. A motivação para o uso do método estocástico refere-se ao fato de que as decisões sobre localização são investimentos de longo prazo com muitas incertezas associadas.

Os modelos de Jayaraman; Patterson e Rolland (2003) e Mallidis; Dekker e Vlachos, (2010) tratam dos problemas da logística de recuperação.

O modelo proposto por Jayaraman; Patterson e Rolland (2003), trata da coleta de material para três processos de condicionamento: produtos perigosos, produtos com defeito e produtos que tenham chegado ao final de sua vida útil. O objetivo é encontrar uma estratégia eficiente para retornar os produtos através de pontos de coleta, que posteriormente envia os produtos a um local de remanufatura ou descarte adequados, sendo que os varejistas e atacadistas envolvidos no processo de logística direta são os pontos de coleta inicial. Neste modelo são determinados custos fixos para locais de coleta e para locais de condicionamento, e são estabelecidos limites para o número de locais. As variações de decisão do modelo estão associadas às quais locais devem ser abertos ou não. Este modelo é particularmente interessante para este trabalho e será apresentado em detalhes na próxima subseção.

Já Mallidis; Dekker e Vlachos, (2010) propõem desenvolver uma metodologia de apoio à decisão estratégica e tática, através de um modelo de programação linear inteira mista. O modelo minimiza os custos totais da logística e da quantidade de diferentes tipos de emissões. Especificamente, a ferramenta permite a elaboração de um projeto de rede da cadeia de suprimentos e tomadas de decisões sobre os custos de *leasing*. A análise da aplicabilidade da metodologia proposta é feita por meio do desenvolvimento de uma rede de cadeia de suprimentos sustentável na região do Sudeste da Europa. Os resultados indicaram que na maioria dos casos a terceirização de centros de distribuição para operadores logísticos melhora tanto o custo quanto o desempenho ambiental de uma empresa. Em todos

os casos a terceirização de operações de transporte minimiza a quantidade de gases poluentes enquanto minimiza os custos de *leasing*. Os autores relatam que apesar de ser difícil obter a emissão exata dos gases EG e seus custos, é possível obter valores realistas. A partir dos resultados observou-se que a otimização da cadeia de suprimentos com base nas emissões de EG não aumenta substancialmente os custos de rede da cadeia de suprimentos. Isto implica que, ao adotar uma política de minimização de emissões de EG que uma empresa pode alcançar um equilíbrio satisfatório entre custos e eficiência ambiental.

Ko e Evans (2007) tratam da cooperação entre empresas individuais como membros de uma cadeia de suprimentos. Assim, os prestadores de serviços logísticos terceirizados devem operar nas cadeias de fornecimento para um número considerável de diferentes clientes e melhorar suas operações logísticas para ambos os fluxos, direto e reverso. O trabalho apresenta um modelo de programação linear inteira mista integrando a otimização da rede direta e reversa ao mesmo tempo.

Em Salema; Barbosa-Povoa e Novais (2007) um modelo inteiro misto é proposto. O principal objetivo desse modelo é ser o mais generalista possível, podendo ser utilizado nas mais diversas situações de logística reversa, não apenas em casos específicos. Ele contempla uma rede de logística reversa genérica capacitada, multi-produto e que há considerações acerca das incertezas sobre as demandas de produtos e as taxas de retorno.

O artigo publicado por Hoshino, Yura e Hitomi (2005) apresenta um modelo de recuperação multi-objetivo de recuperação determinístico e estático. Incorpora a questão governamental nos problemas de logística reversa. No modelo uma variável refere-se à política governamental, para considera que uma determinada taxa da demanda deve ser, obrigatoriamente, reciclada. Ainda dentro dos modelos de recuperação e multi-objetivo, porém com o tratamento do tempo de madeira dinâmica, temos também o trabalho de Kumar; Vrat e Kumar (2008), que propõem através da utilização de um caso sobre a reciclagem de papel na Índia, uma formulação de um modelo inteiro misto para auxiliar na gestão adequada do sistema de logística reversa específico para esse problema.

Tian (2011) propõe um modelo multi-objetivo que descreve um sistema de reciclagem em empresas de produto único. Os clientes compram diretamente da fábrica e o governo utiliza práticas de incentivo fiscal e inserção de taxas para incentivar o processo de reciclagem. Neste modelo o autor considera as incertezas na demanda resultando em um modelo de programação estocástica.

A complexidade de alguns modelos deve-se ao fato de serem multi-objetivo, apresentarem incertezas quanto aos parâmetros e tratarem o tempo de maneira dinâmica.

Dentre os modelos de Recuperação destaca-se Lee e Dong (2008). Esses autores discutem o projeto de rede logística para computadores propondo um modelo de programação inteira mista que considera os produtos recuperados pela cadeia reversa como idênticos aos produtos novos, essa consideração ocorre em modelos reversos onde o produto recuperado possui um alto valor de mercado. O objetivo desse modelo é a recuperação de produtos gerenciando de forma sistemática os fluxos logísticos diretos e reversos.

Nos problemas de recuperação temos modelos apresentados por Lieckens e Vandaele (2007) e Zhang; Huang e He (2011). Lieckens e Vandaele (2007) apresentam um modelo estocástico usando uma versão estendida de modelos já presentes na literatura para uma rede de um único nível e um único produto. Os autores mostram que é possível obter melhores resultados em redes de logística reversa usando modelos de filas e considerando incertezas inerentes a logística reversa, *lead time* e questões de estoque, além das considerações que a maior parte dos modelos já consideram, como os custos de instalação, transporte e processamento, capacidade das instalações, cumprimento da demanda e penalidades. Já Zhang; Huang e He (2011) propõe um modelo considerando incerteza nas variáveis que apontam como fundamentais para tratar um sistema interativo de transporte e estoque de resíduos sólidos, considerando três níveis de organização: (i) estações de coleta, para de separar e transportar duas categorias de materiais: os recicláveis e os reutilizáveis que podem ser remanufaturados, (ii) centros de distribuições de resíduos, que devem armazenar e transferir material dos postos de coletas para as instalações de destinação final, (iii) instalações de eliminação, responsáveis pelo tratamento dos resíduos de forma a respeitar as condições ambientais.

Todos os modelos apresentados na seção 3.2.2 estão classificados de acordo com seu tipo de estrutura, características e métodos de modelagem na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Modelos de Localização para a Logística Reversa

	Tipo de Rede		Características do Modelo			
	Ciclo Fechado	Recuperação	Capacitado	Dinâmico	Multi-Objetivo	Estocástico
Barros; Dekker e Scholten (1998)	✓		✓	✓		
Cruz-Rivera e Ertel (2009)	✓		✓			
Demirel e Gökçen (2008)	✓		✓			
Hoshino, Yura e Hitomi (2005)		✓	✓		✓	
Jayaraman e Ross (2003)	✓		✓			
Jayaraman; Patterson e Rolland (2003)		✓	✓			
Ko e Evans (2007)	✓		✓	✓		
Kumar; Vrat e Kumar (2008),		✓	✓	✓	✓	
Lee e Dong (2008)	✓		✓	✓	✓	✓
Lieckens e Vandaele (2007)		✓	✓	✓	✓	✓
Listes (2007)	✓		✓			✓
Listes e Dekker (2005)	✓		✓	✓		✓
Lu e Bostel (2007)	✓					
Mallidis; Dekker e Vlachos, (2010)		✓	✓			
Melkote e Daskin (2001)	✓					
Min, Jeung e Seong, (2006-a)	✓		✓			
Min, Jeung e Seong, (2006-b)	✓		✓	✓		✓
Salema; Barbosa-Povoa e Novais (2007)	✓		✓			✓
Schultmann; Engels e Rentz (2003)	✓		✓			
Tian (2011)		✓	✓		✓	✓
Zhang; Huang e He (2011)		✓	✓	✓	✓	✓

Fonte - Elaborado pela Autora

3.2.3 Modelo Jayaraman; Patterson e Rolland (2003)

O modelo proposto por Jayaraman; Patterson e Rolland (2003), apresenta características que são particularmente interessantes para o problema de localização de CRC e determinação do fluxo de materiais dos CRCs para os Telecentros. Desta forma o modelo é apresentado de forma mais detalhada.

Seja I o conjunto de postos de coleta a partir do cliente (atacadista ou varejista), J o conjunto de locais de coleta intermediário e K o conjunto de locais onde ocorrem os possíveis processos de acondicionamento, indexados por i , j e k respectivamente. A notação do modelo está representada abaixo:

Índices

- i Postos de coleta a partir do cliente (atacadista ou varejista).
 j Locais de coleta intermediários (recebe os produtos recolhidos dos postos de coleta).
 k Locais onde ocorre um dos possíveis processos de acondicionamento

Parâmetros

- C_{ijk} Custo de transportar de i para j para realizar o acondicionamento no local k .
 F_j Custo de abrir o local de coleta j .
 G_k Custo de abrir o local de k para acondicionamento.
 a_i Quantidade de produtos que precisam de acondicionamento no posto i .
 B_j Capacidade máxima do local de coleta j .
 D_j Capacidade máxima do local de acondicionamento k .
 P_{min} Número mínimo de pontos de coleta.
 P_{max} Número máximo de pontos de coleta.
 Q_{min} Número mínimo de instalações de acondicionamento.
 Q_{max} Número máximo de instalações de acondicionamento.

Variáveis

- X_{ijk} Fração de unidades que se origina em i é encaminhado a j e depois ao posto de acondicionamento k .
 P_j Indica se o local de coleta intermediário j é aberto $P_j = 1$ ou não $P_j = 0$.
 Q_k Indica se o local de acondicionamento k é aberto $Q_k = 1$ ou não $Q_k = 0$.

$$\min Z: \sum_i \sum_j \sum_k c_{ijk} a_i X_{ijk} + \sum_j F_j P_j + \sum_k G_k Q_k \quad (3.1)$$

$$\sum_j \sum_k X_{ijk} = 1, i \in I \quad (3.2)$$

$$\sum_i \sum_k a_i X_{ijk} \leq B_j, j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_i \sum_j a_i X_{ijk} \leq D_k, k \in K \quad (3.4)$$

$$X_{ijk} \leq P_j, i \in I, j \in J, k \in K \quad (3.5)$$

$$X_{ijk} \leq Q_k, i \in I, j \in J, k \in K \quad (3.6)$$

$$P_{min} \leq \sum_j P_j \leq P_{max} \quad (3.7)$$

$$Q_{\min} \leq \sum_k Q_k \leq Q_{\max} \quad (3.8)$$

$$0 \leq X_{ijk} \leq 1, P_j \in \{0,1\}, Q_k \in \{0,1\} \quad (3.9)$$

A função objetivo (3.1) visa minimizar os custos de transferência dos produtos entre os pontos de coleta i passando pelos pontos intermediários j para as instalações de destino k , somados aos custos fixos de se abrir uma nova instalação de coleta intermediária (j) e uma instalação de acondicionamento (k). A restrição (3.2) garante que toda a oferta de produtos disponíveis nos postos de coleta i chegam a um posto de acondicionamento k passando por um determinado local de coleta intermediário j .

As equações (3.3) e (3.4) são restrições de capacidade. A primeira limita a quantidade de material que passa pelo local de coleta intermediário j , enquanto a segunda garante que a quantidade de material recebida nos postos de acondicionamento k não seja excedida.

Só é possível que um local, seja ele intermediário ou de acondicionamento, receba material caso seja selecionado para a abertura, as restrições (3.5) e (3.6) garantem isso para as unidades intermediárias j e para os postos de acondicionamentos k , respectivamente. As restrições (3.7) e (3.8), garantem que os números mínimos e máximos de locais de coletas intermediários e locais de acondicionamento, respectivamente, devam ser respeitados.

A restrição (3.9) representa o domínio das variáveis, garantindo que as variáveis P e Q sejam binárias e que a variável x seja linear e assumam valores entre 0 e 1, note que isso implica que a demanda por coleta (a_i) pode ser parcialmente atendida por um determinado local intermediário j e ponto de acondicionamento k .

3.3 Modelos para Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos

Particularmente em relação à logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos, existem poucos trabalhos na literatura. Em geral, os trabalhos abordam as várias questões envolvidas no processo, como por exemplo: o custo de transporte, a periculosidade dos componentes, o valor agregado de algumas peças, os impactos ambientais que o processo pode causar, etc. A seguir são apresentados dois modelos para a configuração de rede logística reversa de eletroeletrônicos, o primeiro inclui no problema os custos do impacto ambiental do transporte de material, o segundo apresenta um modelo multi-período que é particularmente interessante para esse trabalho.

3.3.1 Modelo Achilles et al. 2012

O modelo matemático proposto por Achilles et al. (2012) formula um problema de Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) usando Programação Linear Múlti-objetivo. A proposta do modelo é minimizar os custos logísticos, buscar minimizar a emissão de poluentes, considerando diferentes tipos de transporte e minimizar os gastos de combustíveis fósseis no transporte através da utilização de diferentes tipos de contêiner.

Seja I o conjunto de postos de coleta de material, J o conjunto das facilidades de tratamento e T o conjunto dos diferentes tipos de contêineres, indexados por i , j e t respectivamente. A notação do modelo está representada abaixo:

Parâmetros

X_i	Quantidades de REEE a serem coletados em i .
c_{ij}^t	Custos de transporte entre os pontos de coletas i e as facilidades de tratamento j no contêiner tipo t .
B^t	Custo do contêiner tipo t .
X_{\max_j}	Capacidade máxima de tratamento da instalação j .
X_{\min_j}	Quantidades mínimas de REEE enviada a facilidade de tratamento j .
S^t	Capacidade máxima de armazenamento do contêiner tipo t .
α^t	Área necessária para a colocação de um contêiner tipo t .
k_i^t	Custo da área ocupada pelo contêiner tipo t no ponto de coleta i .
A_i	Área disponível no ponto de coleta i .
M	Número grande.
e_{ij}^t	Valor das emissões de poluentes do ar devido ao transporte do ponto de coleta i à instalação de tratamento j no contêiner tipo t .
r_{ij}^t	Consumo de combustível fóssil para o do ponto de coleta i à instalação de tratamento j no contêiner tipo t .
b_1	Desvio percentual função objetivo (3.10).
b_2	Desvio percentual da função objetivo (3.11).
b_3	Desvio percentual da função objetivo (3.12)

Variáveis

x_{ij}^t	Quantidade de material transportado entre os pontos de coleta i e as
------------	--

facilidades de tratamento j no contêiner tipo t .

z_{ij}^t Quantidade de contêineres do tipo t transportando material entre os pontos de coletas i e as facilidades de tratamento j .

y^t Indica se o contêiner do tipo t será utilizado ($y^t = 1$) ou não ($y^t = 0$)

$$\min: \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T c_{ij}^t \cdot x_{ij}^t + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T B^t \cdot z_{ij}^t + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T a^t \cdot k_i^t \cdot y_i^t \quad (3.10)$$

$$\min: \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T e_{ij}^t \cdot z_{ij}^t \quad (3.11)$$

$$\min: \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T r_{ij}^t \cdot z_{ij}^t \quad (3.12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ij}^t = X_i, \forall i \in I \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T x_{ij}^t \leq X_{\max j}, \forall j \in J \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T x_{ij}^t \geq X_{\min j}, \forall j \in J \quad (3.15)$$

$$x_{ij}^t \leq S^t \cdot z_{ij}^t, \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (3.16)$$

$$a^t \cdot y_i^t \leq A_t, \forall i \in I, t \in T \quad (3.17)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{ij}^t \leq M \cdot y_i^t, \forall i \in I, t \in T \quad (3.18)$$

$$\sum_{t=1}^T y_i^t = 1, \forall i \in I \quad (3.19)$$

$$x_{ij}^t \in \mathfrak{R}^+ \quad (3.20)$$

A função objetivo (3.10) minimiza a soma dos custos de transporte entre os pontos de coleta e as facilidades de tratamento, dos custos de utilização de diferentes tipos de contêiner, e dos custos de ocupação dos contêineres nas coletas. A função objetivo (3.11) visa minimizar a emissão de poluentes, ou seja, a quantidade de poluentes que o contêiner t gasta ao fazer o trajeto $i - j$ multiplicado pelo número total de contêineres que fazem a rota. Já a função objetivo (3.12) refere-se à minimização da quantidade de combustíveis fosseis

consumidos, ou seja, a quantidade de combustíveis que são gastos pelo contêiner t para fazer o trajeto $i - j$, multiplicado pelo número total de contêineres que fazem a rota.

A restrição (3.13) determina que todo material que está em um determinado ponto de coleta i (X_i) deve ser transportado para os locais de tratamento j . A restrição (3.14) trata da limitação de capacidade do modelo determinando que a quantidade de material que chega a um determinado posto de tratamento não deve exceder a capacidade de tratamento ($X_{\max j}$). A restrição (3.15) por sua vez, estabelece os limites mínimos para a quantidade de material que deve ser processado em cada posto de tratamento.

Pela restrição (3.16) a quantidade de material transportado por um tipo de contêiner deve ser menor ou igual a capacidade de cada contêiner (S^t) considerando a quantidade de contêineres daquele tipo que estão disponíveis (z_{ij}^t). A restrição (3.17) limita a área ocupada, ou seja, o espaço ocupado por um contêiner ($a'.y_i^t$) deve ser menor ou igual a área disponível para ele (A_i). Cada tipo de contêiner só pode ser utilizado se for ativado, a restrição (3.18) garante isso. Pela restrição (3.19) apenas um tipo de contêiner pode ser atribuído a cada local de coleta i . Por último a restrição (3.20) impõe o domínio das variáveis.

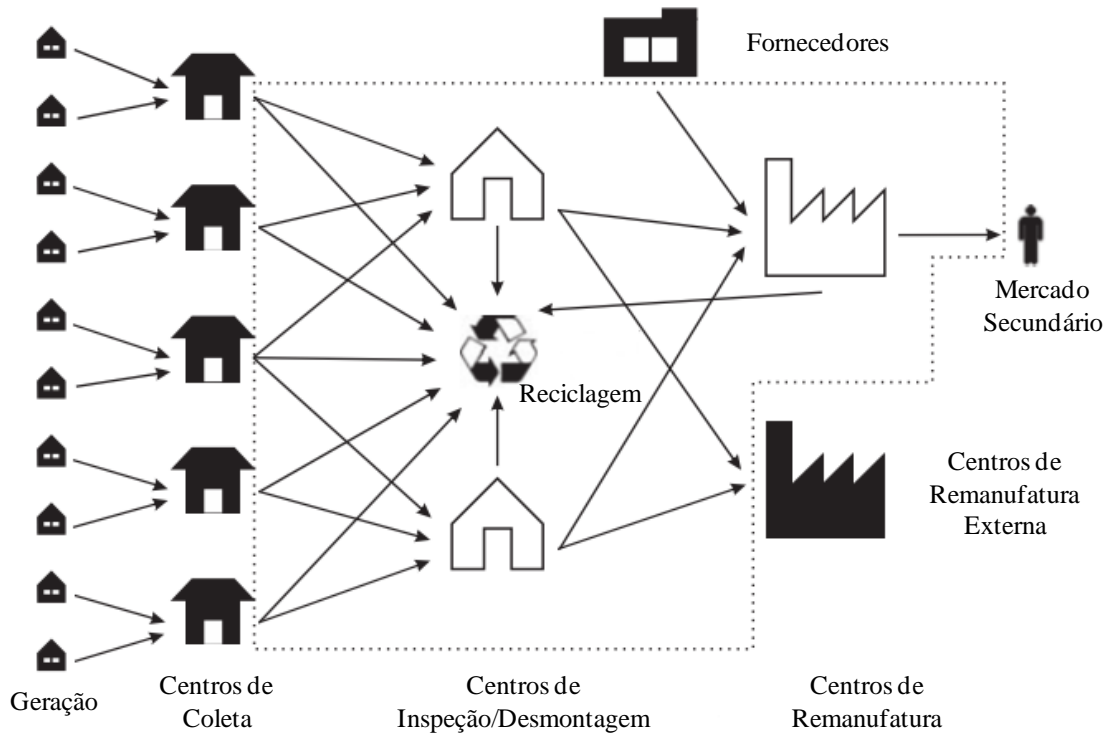
3.3.2 Modelo Alumur et al. 2012

Alumur et al. (2012) propõem um modelo matemático para maximizar o lucro de em uma rede reversa de um material eletroeletrônico específico: máquinas de lavar. A principal preocupação deste modelo é contribuir para a compreensão de como uma empresa de equipamentos eletroeletrônicos precisa reagir aos fluxos de retorno e mercados secundários. Destacando também que é possível obter uma receita desta operação se o objetivo de uma empresa não for somente o cumprimento da legislação ambiental.

A Figura 3.4 apresenta a rede reversa do produto. A rede é composta por consumidores domésticos que quando seu produto atinge determinado desgaste encaminha o material para centros de coleta. Os centros de coleta encaminham o material para os centros de inspeção/desmontagem, após esse processo o material é encaminhado ou para centros de remanufatura, que pertencem a própria empresa, ou para centros de remanufatura externos. Para o processo de remanufatura são necessários mais componentes. Após o processo de remanufatura o material é encaminhado para o mercado secundário. O modelo proposto por

Alumur et al. (2012) refere-se a somente a parte da rede que está em destaque (linha pontilhada) na figura 3.4.

Figura 3.4 Rede Modelo Alumur et al. (2012)



Fonte : Alumur et al. (2012)

Para formulação do problema é necessária a seguinte definição de conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão:

Conjuntos

- P Produtos.
- C Componentes.
- C_p Componentes dos produtos p .
- T Períodos do horizonte de planejamento do problema.
- I^G Pontos de geração ou centros de coleta.
- I^I Locais potenciais para a instalação dos centros de inspeção.
- I^R Locais potenciais para a instalação das plantas de remanufaturas.
- R^G Nós dos centros de coleta.
- R^I Nós dos centros de inspeção.
- R^R Nós dos centros de remanufatura.
- ER Plantas de remanufatura externas.

SM	Mercado secundário.
Q^I	Capacidade dos centros de inspeção.
Q^R	Capacidade dos centros de remanufatura.

Parâmetros

S'_{ip}	Disposição do produto $p \in P$ no centro de coleta $i \in I^G$ no período $t \in T$.
D'_p	Demanda do mercado secundário pelo produto $p \in P$ no período $t \in T$.
α_{pc}	A quantidade do componente $c \in C_p$ que contem o produto $p \in P$.
γI_p	Fator unitário de consumo da capacidade do produto p nos centros de inspeção.
γR_p	Fator unitário de consumo da capacidade do produto p nos centros de remanufatura.
γ_c	Fator unitário de consumo da capacidade estoque de c .
MI'_i	Rendimento mínimo exigido para um centro de inspeção $i \in I^I$ no período $t \in T$.
MR'_i	Rendimento mínimo exigido para um centro de remanufatura $i \in I^R$ no período $t \in T$.
KER'_i	Capacidade da planta de remanufatura $i \in ER$ no período $t \in T$.
KI_q	Capacidade do centro de inspeção do tipo $q \in Q^I$.
KP_q	Capacidade de produção de um modulo do tipo $q \in Q^R$.
KH_q	Capacidade de manipulação de um modulo do tipo $q \in Q^R$.
KIN_q	Capacidade de estoque de um modulo do tipo $q \in Q^R$.

Receitas

PRG'_p	Receita unitária de $p \in P$ reciclado a partir de um centro de coleta no período $t \in T$.
PRI'_c	Receita unitária de $c \in C$ reciclado a partir de um centro de inspeção no período $t \in T$.
PRR'_c	Receita unitária de $c \in C$ reciclado a partir de um centro de remanufatura no período $t \in T$.
PER'_{ip}	Receita unitária de $p \in P$ vendido para uma fábrica de remanufatura externa $i \in ER$ no período $t \in T$.

PSM_p^t Receita unitária de $p \in P$ vendido para o mercado externo no período $t \in T$.

Custos

FI_i^t Custos de *setup* para a instalação de um centro de inspeção i no início do período t .

FR_i^t Custos de *setup* para a instalação de uma fábrica de remanufatura i no início do período t .

FKI_{iq}^t Custo de *setup* de um módulo q em um centro de inspeção i período t .

FKR_{iq}^t Custo de *setup* de um módulo q em uma planta de remanufatura i período t .

OI_{ip}^t Custo de operar p em um centro de inspeção i período t .

OR_{ip}^t Custo de operar p em uma remanufatura i período t .

T_{ijp}^t Custo de transportar o produto p de um centro de inspeção i para uma remanufatura j no período t .

IC_{ic}^t Custo de estocar c em i no período t .

BC_{ic}^t Custo de aquisição de um componente c em i no período t .

Variáveis

x_{ijp}^t Quantidade do produto p transportado de i para j no período t .

I_{ic}^t Quantidade de componente c em i no período t .

b_{ic}^t Quantidade de componente c comprado pela remanufatura i no período t .

y_i^t Indica se um centro de inspeção i está funcionando no período t ($y_i^t = 1$) e ($y_i^t = 0$) caso contrário.

z_i^t Indica se um centro de remanufatura i está funcionando no período t ($z_i^t = 1$) e ($z_i^t = 0$) caso contrário.

u_{iq}^t Indica se o modulo q está instalado no centro de inspeção i no período t ($u_i^t = 1$) e ($u_i^t = 0$) caso contrário.

v_{iq}^t Indica se o modulo q está instalado no centro recondicionamento i no período t ($v_i^t = 1$) e ($v_i^t = 0$) caso contrário.

$A = \{(i, j) : (i \in I^G \wedge j \in I^I) \text{ or } (i \in I^G \wedge j \in R^G)\} \cup \{(i, j) : (i \in I^I \wedge j \in I^R) \text{ or } (i \in I^I \wedge j \in R^I) \text{ or } (i \in I^I \wedge j \in ER)\} \cup \{(i, j) : (i \in I^R \wedge j \in R^R)\} \text{ or } (i \in I^R \wedge j \in SM)$

Considerando esta notação, o modelo multi-período para configuração de rede reversa proposto por Alumur et al. (2012) pode ser formulado como se segue:

$$\begin{aligned}
\max z = & \sum_{t \in T} [\sum_{p \in P} \sum_{i \in I^G} PRG_p^t x_{iR^G p}^t + \sum_{c \in C} \sum_{i \in I^I} PRI_c^t x_{iR^I c}^t + \sum_{c \in C} \sum_{i \in I^R} PRR_c^t x_{iR^R c}^t \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I^I} \sum_{j \in ER} PER_{jp}^t x_{ijp}^t + \sum_{p \in P} \sum_{i \in I^R} PSM_p^t x_{iSMp}^t] \\
& - \sum_{t \in T} [\sum_{i \in I^I} FI_i^t (y_i^t - y_i^{t-1}) + \sum_{i \in I^R} FR_i^t (z_i^t - z_i^{t-1})] \\
& - \sum_{t \in T} [\sum_{i \in I^I} \sum_{q \in Q^I} FKI_{iq}^t u_{iq}^t + \sum_{i \in I^R} \sum_{q \in Q^R} FKR_{iq}^t v_{iq}^t] \\
& - \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} [\sum_{i \in I^G} \sum_{j \in I^I} OI_{jp}^t x_{ijp}^t + \sum_{i \in I^R} OR_{ip}^t x_{iSMp}^t] \\
& - \sum_{t \in T} [\sum_{p \in P} \sum_{i \in I^G} \sum_{j \in I^I} T_{ijp}^t x_{ijp}^t + \sum_{c \in C} \sum_{i \in I^I} \sum_{j \in I^R} T_{ijc}^t x_{ijc}^t] \\
& - \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \sum_{i \in I^R} IC_{ic}^t I_{ic}^t - \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} \sum_{i \in I^R} BC_{ic}^t b_{ic}^t
\end{aligned} \tag{3.21}$$

Sujeito a:

$$S_{ip}^t = x_{iR^G p}^t + \sum_{j \in I^I} x_{ijp}^t, \quad i \in I^G, p \in P, t \in T \tag{3.22}$$

$$\sum_{j \in I^G} x_{jip}^t = \sum_{j \in ER} x_{ijp}^t + \frac{1}{\alpha_{pc}} x_{iR^I c}^t + \sum_{j \in I^R} \frac{1}{\alpha_{pc}} x_{ijc}^t, \quad i \in I^I, p \in P, c \in C_p, t \in T \tag{3.23}$$

$$\sum_{j \in I^I} x_{jic}^t + I_{ic}^t + b_{ic}^t = x_{iR^R c}^t + \alpha_{pc} x_{iSMp}^t + I_{ic}^t, \quad i \in I^R, p \in P, c \in C_p, t \in T \tag{3.24}$$

$$\sum_{i \in I^R} x_{iSMp}^t \leq D_p^t, \quad p \in P, t \in T \tag{3.25}$$

$$\sum_{i \in I^I} \sum_{p \in P} x_{ijp}^t \leq KER_j^t, \quad j \in ER, t \in T \tag{3.26}$$

$$\sum_{j \in I^G} \sum_{p \in P} \gamma I_p x_{jip}^t \leq \sum_{\tau=1}^{\tau} \sum_{q \in Q^I} KI_q u_{iq}^{\tau}, \quad i \in I^I, t \in T \tag{3.27}$$

$$\sum_{p \in P} \gamma R_p x_{iSMp}^t \leq \sum_{\tau=1}^{\tau} \sum_{q \in Q^R} KP_q v_{iq}^{\tau}, \quad i \in I^R, t \in T \tag{3.28}$$

$$\sum_{j \in I^I} \sum_{c \in C} x_{jic}^t \leq \sum_{\tau=1}^{\tau} \sum_{q \in Q^R} KH_q v_{iq}^{\tau}, \quad i \in I^R, t \in T \tag{3.29}$$

$$\sum_{c \in C} \gamma_c I_{ic}^t \leq \sum_{\tau=1}^{\tau} \sum_{q \in Q^R} KIN_q v_{iq}^{\tau}, \quad i \in I^R, t \in T \tag{3.30}$$

$$\sum_{q \in Q} u_{iq}^t \leq y_i^t, \quad i \in I^I, t \in T \tag{3.31}$$

$$\sum_{q \in Q} v_{iq}^t \leq z_i^t, \quad i \in I^R, t \in T \tag{3.32}$$

$$\sum_{j \in I^G} \sum_{p \in P} x_{jip}^t \geq MI_i^t y_i^t, \quad i \in I^I, \quad t \in T \quad (3.33)$$

$$\sum_{p \in P} x_{iSMp}^t \geq MR_i^t z_i^t, \quad i \in I^R, \quad t \in T \quad (3.34)$$

$$y_i^t \leq y_i^{t+1}, \quad i \in I^I, \quad t \in T \setminus \{|T|\}$$

$$z_i^t \leq z_i^{t+1}, \quad i \in I^R, \quad t \in T \setminus \{|T|\}$$

$$x_{ijp}^t \geq 0, \quad (i,j) \in A, \quad p \in P, \quad C, \quad t \in T$$

$$I_{ic}^t \geq 0, \quad i \in I^R, \quad c \in C, \quad t \in T$$

$$b_{ic}^t \geq 0, \quad i \in I^R, \quad c \in C, \quad t \in T \quad (3.35)$$

$$y_i^t \in \{0,1\}, \quad i \in I^I, \quad t \in T$$

$$z_i^t \in \{0,1\}, \quad i \in I^R, \quad t \in T$$

$$u_{iq}^t \in \{0,1\}, \quad i \in I^I, \quad q \in Q^I, \quad t \in T$$

$$v_{iq}^t \in \{0,1\}, \quad i \in I^R, \quad q \in Q^R, \quad t \in T$$

A função objetivo visa maximizar o lucro do processo de logística reversa, somando a receita dos produtos nos centros de reciclagem, das plantas de remanufatura, da venda no mercado secundário, da venda de componentes dos centros de inspeção e remanufatura, e subtraindo os custos de instalação dos centros de inspeção, os custos de instalação dos centros de remanufaturas, os custos de operação, os custos de transporte, os custos de estoques e os custos de remanufatura.

As restrições (3.22) - (3.24) são restrições conservação de fluxo. Na (3.22) os produtos que são coletados a partir dos centros de coleta podem ser enviados para centros de reciclagem ou centros de inspeção. Nos centros de inspeção, os produtos inspecionados podem ser diretamente enviados para instalações de remanufatura externos ou pode ser desmontado em componentes. Esses componentes podem então ser reciclados ou encaminhados para remanufatura, isso é garantido pela restrição (3.23). A restrição (3.24) é uma restrição de balanceamento de fluxo para as instalações de remanufatura. O total do fluxo de entrada, que é composto por componentes provenientes de centros de inspeção, por componentes adquiridos de fornecedores e por componentes em estoque, deve ser igual ao fluxo de saída, que é composta por componentes enviados para reciclagem, por produtos vendidos para o mercado secundário e os componentes a serem mantidos em estoque. A restrição (3.25) garante que a quantidade de produto vendido para o mercado secundário não é maior do que a demanda de cada produto em cada período de tempo.

As restrições (3.26) a (3.30) são as restrições de capacidade. A restrição (3.26) garante que a quantidade de produtos que são enviados para as instalações de remanufatura não exceda sua capacidade. A restrição (3.27) é a restrição de capacidade de operação nos

centros de inspeção e a restrição (3.28) é a restrição de capacidade de produção nas instalações de remanufatura. A restrição (3.29), garante que a movimentação de entrada nas instalações de remanufatura não pode exceder a capacidade, e (3.30) garante que o estoque nas instalações de remanufatura não pode exceder a capacidade de armazenamento.

As restrições (3.31) e (3.32) asseguram que, não só a expansão pode ocorrer apenas em instalações que tenham sido abertas, mas também que em cada expansão, no máximo, um módulo pode ser escolhido para cada período. As restrições (3.33) e (3.34) são restrições mínimas de transferência, garantindo que um centro de inspeção ou uma instalação de remanufatura pode ser aberta somente se a operação ou quantidade produzida ultrapassa os limites predefinidos. As restrições (3.33) e (3.34) asseguram também que, quando uma instalação se encontra aberta, ela permanece aberta até o final do horizonte de planejamento. Por último, a restrição (3.35) apresenta o domínio das variáveis.

3.4 Avaliação da literatura revisada para representação do problema estudado

Este capítulo apresenta os principais conceitos teóricos relacionados com o problema estudado neste trabalho, bem como busca apresentar o estado da arte relacionado aos modelos baseados em programação matemática para o problema de configuração da rede logística reversa. A literatura nesta área é bastante extensa.

Dos modelos estudados, o que foi proposto por Jayaraman; Patterson e Rolland (2003) é importante como primeiro ponto de partida para estudar a configuração da rede de logística reversa do projeto ‘Computadores para a Inclusão’, pois o modelo apresenta restrições relacionadas à capacidade das instalações e a utilização de uma rede de logística reversa de três níveis, ou seja, considera a existência de instalações intermediárias na rede.

O modelo proposto por Alumur et al. (2012), apesar de bastante complexo, tem características relevantes para o problema em questão: tem uma estrutura de tempo dinâmica, ou seja, é multi-período; considera a possibilidade de expansão da capacidade através de módulos; apresenta vários níveis para a localização de diferentes tipos de instalação, bem como, a definição de fluxo entre as instalações.

Dentre os modelos especificamente propostos para REEE, destaca-se o modelo proposto por Achillas et al. (2012), esse modelo apresenta uma função objetivo multi-período que minimiza diversos custos, os de transporte entre estações de coleta e tratamento, os custos de utilização dos diferentes tipos de contêineres e a ocupação dos contêineres utilizados no transporte. Particularmente para esse trabalho destacam-se as restrições que garantem que todo o material que chega a um ponto de coleta seja encaminhado para as

facilidades de tratamento, semelhante ao primeiro modelo proposto neste trabalho (MCLA-Modelo Capacitado de Locação-Alocação). Há também uma preocupação para que não sejam abertas instalações de baixa capacidade, ou seja, uma facilidade só é aberta se for processar material acima de um determinado valor.

4 ABORDAGENS PROPOSTAS PARA O PROBLEMA

Neste capítulo são propostos três modelos baseados em programação matemática para representar as principais decisões envolvidas no problema de configuração da rede de logística reversa do Programa Computadores para Inclusão. Primeiramente é proposto um modelo matemático monoperíodo de distribuição reversa para a decisão sobre a instalação de novos CRCs de modo a minimizar os custos de instalação e funcionamento da rede reversa. Em seguida um modelo multiperíodo é proposto, incorporando as taxas de retorno de material dos centros de remanufatura para os centros de coleta. Por último, é proposta uma extensão do modelo multiperíodo que considera as taxas de retorno direcionadas, onde o retorno dos computadores reconicionados é controlado pelos parâmetros de funcionamento dos Telecentros.

4.1 Considerações para a Modelagem

O projeto ‘Computadores para a Inclusão’ possui uma estrutura com 80 Telecentros Nucleadores, distribuídos em todos os estados brasileiros. Esses Telecentros têm sua localização conhecida e seu funcionamento monitorado pelo Ministério das Comunicações. Segundo estimativas do programa esses 80 Telecentros Nucleadores prestam assistência a cerca de 2000 Telecentros menores espalhados em todos os estados do Brasil, geralmente, em pequenas comunidades. Para configuração da rede, esse trabalho considera apenas os 80 Telecentros nucleadores, que enviam e recebem material dos CRCs.

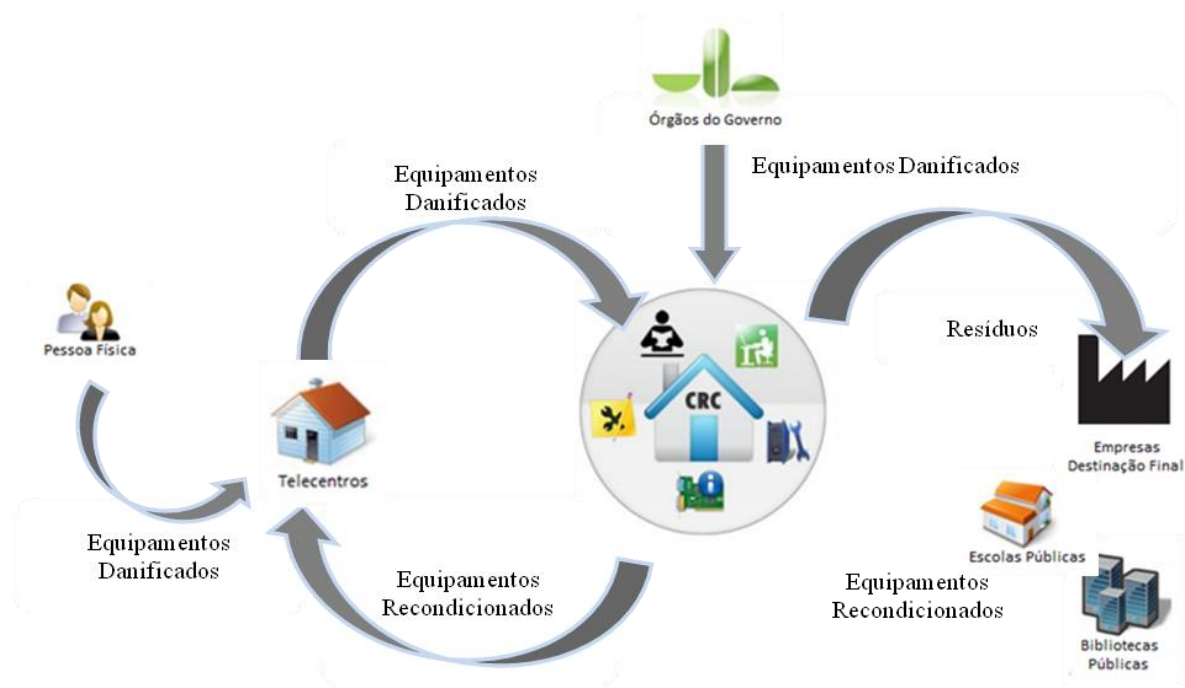
A rede do projeto funciona da seguinte forma: a comunidade entrega equipamentos de informática danificados nos Telecentros Nucleadores. Os Telecentros Nucleadores não processam esse material, o material é apenas recolhido e encaminhado para os CRCs.

Os CRCs recebem material de órgãos públicos e com a nova fase de implantação do programa passarão a receber material também das comunidades através dos Telecentros Nucleadores. O CRC recebe material de acordo com sua capacidade de recebimento, que corresponde à quantidade total de material oriundo dos Telecentros que pode ser armazenada, e sua capacidade de processamento de material, que é a quantidade de material que efetivamente passará pelo processo de triagem com possibilidade de reconicionamento.

Parte dos equipamentos de informática que chega aos CRCs é recuperado e atende a demanda dos Telecentros ou é enviado para doação. O material que não é recuperado é enviado para empresas de reciclagem, que podem recuperar as matérias primas e realizar o descarte ambientalmente correto do que não pode ser recuperado. O material que chega aos

CRCs e não é processado, também é enviado para empresas de destinação final. A Figura 4.1 ilustra o funcionamento desta rede.

Figura 4.1 Funcionamento da rede do projeto ‘Computadores para a Inclusão’



Fonte: Elaborado pela Autora

As 80 localidades em que estão instalados os Telecentros Nucleadores são candidatas a receberem um CRC. Quando uma localidade que possui um Telecentro Nucleador recebe um CRC o custo de envio, seja de equipamento danificado ou de equipamento recondicionado, é considerado nulo. O mesmo ocorre quando há um CRC em uma cidade em que há uma empresa de destinação final. Apesar da dificuldade para obtenção dos dados, para que os custos de transporte sejam o mais coerente possível com a realidade, nesse trabalho são utilizadas as distâncias rodoviárias efetivas entre as cidades e não distâncias calculadas a partir de coordenadas cartesianas.

Os Telecentros possuem uma demanda por coleta dos equipamentos, sejam aqueles que foram entregues pela comunidade ou aqueles equipamentos danificados nos próprios Telecentros. Os equipamentos utilizados nos Telecentros são provenientes de doações (reuso), portanto, existe uma taxa de deterioração alta destes produtos. Nos dois primeiros modelos que serão apresentados não há considerações acerca da quantidade de computadores nos Telecentros. No terceiro modelo foram atribuídos valores máximos e mínimos para a quantidade de máquinas em funcionamento que cada Telecentro deve

possuir. Nos dois primeiros períodos de planejamento a quantidade de computadores foi fixada no valor mínimo. A quantidade de equipamento foi considerada como peso de material, ou seja, as variações de fluxo de material são contínuas, pelo fato de que os mais diferentes tipos de TICC serão descartados, não apenas computadores, trabalhos como o de Achilles et al., (2012) também abordam o peso dos materiais. A quantidade de material é tratada em unidades, como em Alumur et al. (2012), quando o trabalho refere-se a produtos específicos e seus componentes.

Conforme apresentado na figura 4.1, parte do material que chega aos CRCs não é processado e deve ser enviado para destinação final. Existem custos associados a este não processamento do material que podem ter uma parcela baseada em questões econômicas e outra parcela que corresponde a custos intangíveis. Quando se descarta equipamentos de informática, sem um processamento, ocorre desperdício de material, pois seu acondicionamento é mais barato que o custo de produção, esses são os custos econômicos. Os custos intangíveis são os relacionados à questão socioambiental de encaminhar equipamentos ao descarte final sendo que há mercado secundário para esses equipamentos além de descartar no meio ambiente um material que ainda pode ter sua vida útil estendida.

Toda a implantação e manutenção do programa ‘Computadores para a Inclusão’ está sujeita às restrições orçamentárias do governo. A questão orçamentária nesse trabalho foi abordada da seguinte forma: existe um orçamento para a abertura de novos CRCs e um orçamento para a manutenção da rede. Os repasses de abertura e manutenção são provenientes de diferentes secretarias do governo.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram elaborados modelos multi-períodos. Nesses modelos cada período foi considerado como um mês e a máxima abordagem de tempo foi de quatro anos o que corresponde a um período governamental brasileiro.

4.2 Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA)

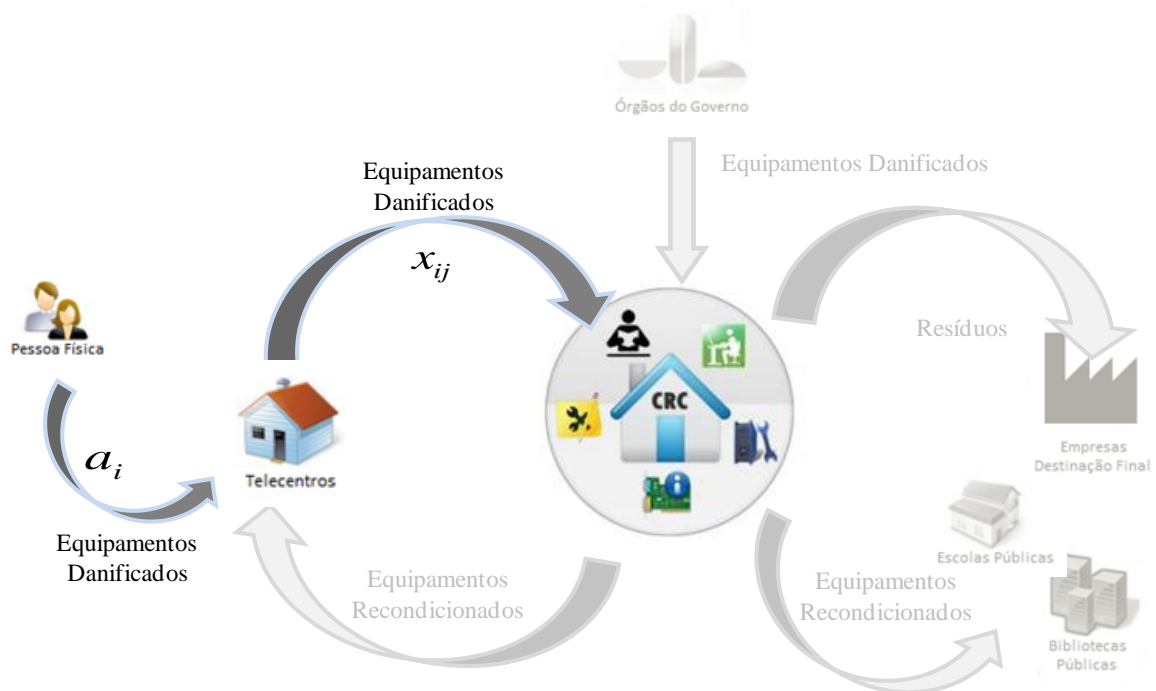
Para determinar a localização de novos CRCs e a alocação de Telecentros a CRCs, inicialmente foi proposto um Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA), baseado no modelo proposto por Jayaraman; Patterson e Rolland (2003).

O modelo proposto por Jayaraman; Patterson e Rolland (2003), apresentado neste trabalho na seção 3.2.3, trata de uma representação matemática para problemas de localização de três níveis: postos de coleta, centros intermediários e locais de acondicionamento. O primeiro modelo proposto nesse trabalho (MCLA) modela uma rede

de dois níveis, pois não há necessidade de um centro de coleta intermediário, ou seja, a rede é reduzida.

Neste primeiro estudo não foram considerados os fluxos de material a partir do CRCs, ou seja, os fluxos para descarte, doações ou retorno para os Telecentros. A Figura 4.2 representa a rede já apresentada na Figura 4.1, porém as partes contempladas nesse modelo estão em destaque.

Figura 4.2 Rede do MCLA



Fonte - Elaborado pela Autora

Sejam I o conjunto de Telecentros Nucleadores e J o conjunto de locais candidatos a CRCs, indexados por i e j respectivamente. A notação a ser usada na formulação matemática é apresentada a seguir:

Parâmetros

- a_i Quantidade de material que o Telecentro i recebe da população.
- b_j Capacidade de processamento do CRC j .
- f_j Custo de abrir um CRC.
- c_{ij} Distância do Telecentro i para o CRC j .
- γ Custo unitário de transporte de material (kg/km).
- P_{min} Número mínimo de pontos de coleta.
- P_{max} Número máximo de pontos de coleta.

Variáveis de decisão

x_{ij} Fração de material que origina do Telecentro i e é encaminhado ao CRC j .

p_j $p_j = 1$ indica que o CRC j foi aberto ou $p_j = 0$, caso contrário.

$$\min \gamma \cdot \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot a_i \cdot x_{ij} + \sum_{j \in J} f_j \cdot p_j \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \quad i \in I \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in I} a_i x_{ij} \leq b_j, \quad j \in J \quad (4.3)$$

$$x_{ij} \leq p_j, \quad i \in I, j \in J \quad (4.4)$$

$$P_{\min} \leq \sum_{j \in J} p_j \leq P_{\max} \quad (4.5)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \quad p_j \in B, \quad i \in I, j \in J \quad (4.6)$$

A função objetivo (4.1) visa minimizar os custos de transferência dos produtos entre os Telecentros e os CRCs, e os custos fixos de abertura de novos CRCs.

A restrição (4.2) garante que toda a demanda por coleta, ou seja, todos os equipamentos pós consumo que são entregues pela população nos Telecentros seja encaminhada aos CRCs para o processo de recondicionamento (100%).

A restrição (4.3), impõe que a quantidade de material enviada para cada CRC j não deve ultrapassar sua capacidade. Só é possível que um CRC receba material caso tenha sido aberto, a restrição (4.4) garante isso. A restrição (4.5) limita a quantidade mínima e máxima de CRCs que devem ser abertos.

Por fim, a restrição (4.6) refere-se ao domínio das variáveis. Note que a variável x_{ij} é uma fração, o que implica que a demanda por coleta pode ser parcialmente atendida por um determinado CRC.

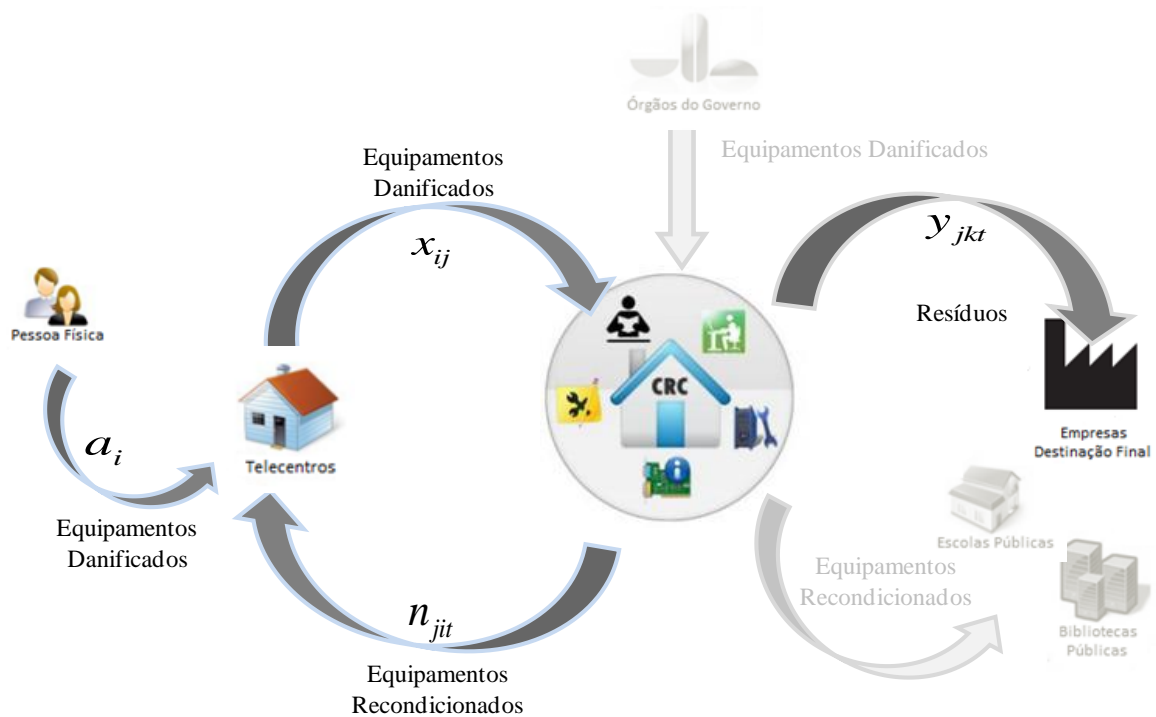
Seja N o número de Telecentros Nucleadores, e M o número de candidatos a receber um CRC. O total de variáveis do problema é $M \cdot (N + 1)$ e o número de restrições é igual a $2 \cdot N + (M \cdot N) + 1$.

4.3 Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM)

O Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM) consiste em uma extensão do modelo anterior, que inclui os fluxos de saída dos CRCs e considera o planejamento dentro de um horizonte de tempo determinado onde cada período corresponde

a um mês. A Figura 4.3 representa a rede já apresentada na Figura 4.1, porém as partes contempladas nesse modelo estão em destaque.

Figura 4.3 Rede do MCLAM



Fonte - Elaborado pela Autora

Para formular este modelo é necessário considerar os seguintes conjuntos adicionais: o conjunto K , que corresponde ao conjunto de empresas de destinação final, indexados por k ; e o conjunto de períodos T , indexado por t e u . Além disso, é necessária a redefinição de alguns parâmetros e variáveis, bem como a definição de mais alguns, conforme notação que se segue:

Parâmetros:

- o_t Orçamento para a manutenção do programa no período t .
- w_t Orçamento para a abertura de CRCs no período t .
- b_j Capacidade de processamento do CRC j .
- a_{it} Quantidade de material que o Telecentro i recebe da comunidade no período t .
- f_j Custo de abrir um CRC.
- β Custo intangível de não processamento de material.
- s Porcentagem de material não recuperado (pós processamento) que deve ser encaminhado para as empresas recicladoras.

- e_{ji} Custo de se transportar material do CRC j para o Telecentro i .
- g_{jk} Custo de se transportar material do CRC j para a empresa recicladora k .
- r Custo do não processamento de um eletroeletrônico.
- l Percentual mínimo de material a ser processado.
- q Número de Períodos para processamento no CRC.

Variáveis

- x_{ijt} Quantidade de material do Telecentro i e é encaminhado ao CRC j no período t .
- y_{jkt} Quantidade de material do CRC j encaminhado a empresa recicladora k no período t .
- p_{jt} Indica se o CRC j foi aberto no período t ($p_{jt} = 1$) ou não ($p_{jt} = 0$).
- z_{jt} Indica se o CRC j está aberto no período t ($z_{jt} = 1$) ou não ($z_{jt} = 0$).
- n_{jit} Quantidade de material do CRC j encaminhado ao Telecentro i no período t .

$$\min z = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{jt} \cdot f_j + \gamma \cdot \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} g_{jk} \cdot y_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{t=q, t \in T} \sum_{j \in J} e_{ji} \cdot n_{jit} \right) + (r + \beta) \cdot \left(\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (a_{it} - \sum_{j \in J} x_{ijt}) \right) \quad (4.7)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \geq l \cdot a_{it}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.8)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \leq a_{it} + \sum_{j \in J} n_{jit}, \quad i \in I, t \in T \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} \leq b_j \cdot z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_{t \in T} p_{jt} \leq 1, \quad j \in J \quad (4.11)$$

$$z_{jt} = \sum_{u=1, u \in T}^t p_{ju}, \quad j \in J, t \in T \quad (4.12)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jkt} = s \cdot \sum_{i \in I} x_{ijt}, \quad j \in J, t \in T. \quad (4.13)$$

$$\sum_{i \in I} n_{jit} = (1-s) \cdot x_{ij(t-q)}, \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (4.14)$$

$$\sum_{j \in J} p_{jt} \cdot f_j \leq w_t, \quad t \in T \quad (4.15)$$

$$\gamma \cdot \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} g_{jk} \cdot y_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ji} \cdot n_{jit} \right) \leq o_t, \quad t \in T \quad (4.16)$$

$$z_{jt}, p_{jt} \in \{0, 1\}; \quad x_{ijt}, y_{jkt}, n_{jit} \geq 0. \quad (4.17)$$

A função objetivo (4.7) visa minimizar os custos de funcionamento da rede, esses custos são: de instalação dos CRCs $\left(\sum_t \sum_j p_{jt} \cdot f_j \right)$, de transportar o material dos Telecentros (i) para os CRCs (j) $\left(\sum_t \sum_j \sum_i c_{ij} \cdot x_{ijt} \right)$, de transportar o material dos CRCs (j) para as empresas recicladoras (k) $\left(\sum_j \sum_k \sum_t g_{jk} \cdot y_{jkt} \right)$, de transportar os equipamentos reconicionados dos CRCs (j) aos Telecentros (i) $\left(\sum_i \sum_{t=q}^T \sum_j e_{ji} \cdot n_{jit} \right)$ e os custos de não se processar material $\left((r + \beta) \cdot \left(\sum_i \sum_t (a_{it} - \sum_j x_{ijt}) \right) \right)$, considerando tanto o custo real quanto o custo intangível.

As restrições (4.8) e (4.9) tratam da quantidade de material processado. A primeira garante que uma quantidade mínima de material será processado, já a segunda garante que a quantidade não excederá a um valor máximo, que consiste na quantidade fornecida pela comunidade acrescida dos materiais que retornam dos CRCs.

A restrição (4.10) garante que, caso a instalação esteja aberta, a capacidade máxima de processamento de cada CRC aberto não será excedida. Para garantir que um CRC só seja aberto uma única vez, o conjunto de restrições (4.11) se faz necessário. A restrição (4.12) está relacionada com a operação de um CRC, por esta restrição se um CRC for aberto em operação em um determinado período, então estará em operação a partir deste período até o fim do horizonte de planejamento.

Para determinar a quantidade de material que é enviado para as empresas recicladoras e a quantidade que retorna para os Telecentros, depois do período de reconicionamento, temos as restrições (4.13) e (4.14), respectivamente. A quantidade de material que é encaminhada para as empresas de destinação final (4.13), é determinada pela soma da porcentagem, s , não passível de aproveitamento de todo o material processado em um CRC aberto. A quantidade de material a ser encaminhada para os Telecentros é a porcentagem aproveitada, determinada por $(1-s)$, sobre a quantidade total de material que chega aos CRCs, (4.14) garante isso.

A instalação de novos CRCs deve respeitar os limites orçamentários pré-estabelecidos. Além dos limites para abertura de CRCs existem também restrições orçamentárias para a manutenção do programa. Estes limites são impostos pelas restrições (4.15) e (4.16), respectivamente. Finalmente a restrição (4.17) impõe o domínio das variáveis.

Seja N o número de Telecentros Nucleadores, M o número de candidatos a receber um CRC, K o número de empresas recicladoras e T o número de períodos. O total de variáveis do problema é $M \cdot T \cdot (2 + 2 \cdot N + K)$ e o número de restrições é igual a $T \cdot (2 \cdot N + 4 \cdot M + 2) + M$.

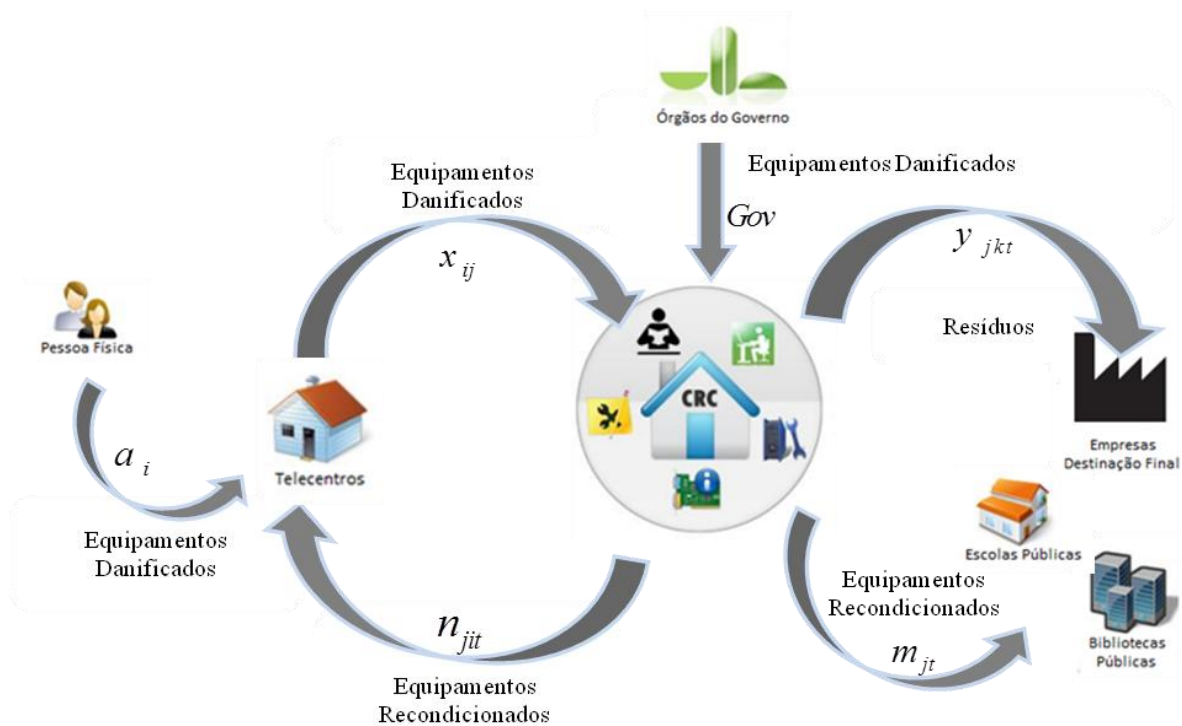
Para esse modelo inserimos o parâmetro, l , que define a quantidade mínima de material processado. Nesse modelo não foram considerados os custos de transporte dos materiais não processados, porque em diversas localidades existem empresas privadas que poderiam se interessar por esse material e realizar a coleta dele. Nesse modelo todo o material processado volta para os Telecentros, foi a partir dos resultados desse modelo que ficou perceptível que haveria a necessidade de direcionar o fluxo de retorno dos computadores recondicionados.

4.4 Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)

O Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD) considera que a quantidade de computadores nos Telecentros precisa ser monitorada a fim de que exista uma quantidade mínima e máxima de computadores. A quantidade mínima é aquela necessária para que os Telecentros mantenham seu funcionamento ao longo do horizonte de planejamento, enquanto a quantidade máxima não deve exceder a capacidade de computadores que suas instalações comportam. Ou seja, busca representar esta característica do problema real, ainda não contemplada nos modelos anteriores.

A Figura 4.4 representa a rede já apresentada na Figura 4.1, porém com as variáveis envolvidas no problema representadas.

Figura 4.4. Rede do MCLAM-FRD



Fonte - Elaborado pela Autora

Para a formulação do modelo matemático é usada a mesma notação definida anteriormente mais os seguintes parâmetros e variáveis:

Parâmetros

- α Penalidade por não retorno de material para Telecentros
- δ Custo real de não processamento de material
- l Quantidade máxima de computadores que um Telecentro comporta
- d Quantidade mínima de computadores que um Telecentro comporta
- h_{it} Taxa de deterioração no Telecentro i no tempo t
- Gov Quantidade de material enviado pelo governo para CRCs abertos
- CR Capacidade de recebimento proporcional a capacidade de processamento de um CRC

Variáveis

- yn_{jt} Quantidade de material não processado no CRC j no período t .
- yp_{jt} Quantidade de material processado no CRC j no período t .
- m_{jt} Quantidade de material processado no CRC j no período t que não será encaminhado para Telecentros
- v_{it} Quantidade de computadores em um Telecentro i no período t .

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{jt} \cdot f_j + \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} g_{jk} \cdot y_{jkt} + \right. \\ & \left. + \sum_{i \in I} \sum_{t=3, t \in T}^T \sum_{j \in J} e_{ji} \cdot n_{jit} \right) \cdot \gamma + (r + \beta) \cdot (yn_{jt}) \alpha \cdot \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} m_{jt} \right) \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_{it}, \quad \forall i \in I, t \in T \mid T \leq q \quad (4.19)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_{it} + h_{it}, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (4.20)$$

$$yp_{jt} + yn_{jt} = \left(\sum_{i \in I} x_{ijt} + Gov \right) \cdot z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (4.21)$$

$$\sum_{i \in I} n_{jit} + m_{jt} = 0, \quad \forall j \in J, (t \leq q) \in T \quad (4.22)$$

$$\sum_{i \in I} n_{jit} + m_{jt} = (1-s) \cdot (yp_{j(t-q)}), \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (4.23)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jkt} = s \cdot yp_{jt-q} + yn_{jt-q}, \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (4.24)$$

$$yp_{jt} \leq b_{jt} \cdot z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (4.25)$$

$$\sum_{t \in T} p_{jt} \leq 1, \quad j \in J \quad (4.26)$$

$$p_{jt} = z_{jt} - z_{jt-1}, \quad j \in J, t \in T \quad (4.27)$$

$$z_{jt} \geq z_{jt-1}, \quad \forall j \in J, t \in T \mid t \geq q \quad (4.28)$$

$$v_{it} = d, \quad i \in I, (t=1) \quad (4.29)$$

$$v_{it} = v_{it-1} + \sum_j n_{jit} - h_{i,t-1}, \quad i \in I, t \in T \mid t \geq q \quad (4.30)$$

$$v_{it} \leq l, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (4.31)$$

$$v_{it} \geq d, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (4.32)$$

$$\sum_{j \in J} p_{jt} f_j \leq w_t, \quad t \in T \quad (4.33)$$

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} g_{jk} y_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ji} n_{jit} \right) \cdot \gamma \leq o_t, \quad t \in T \quad (4.34)$$

$$z_{jt}, p_{jt} \in \{0,1\}; \quad x_{ijt}, y_{jkt}, yp_{jt}, yn_{jt}, m_{jt}, v_{jt}, n_{jit} \geq 0. \quad (4.35)$$

A função objetivo (4.18) pode ser dividida em três partes. A primeira, $\sum_t \sum_j p_{jt} \cdot f_j$, visa minimizar os custos de abertura dos CRCs da rede, a segunda minimiza os custos de funcionamento da rede, multiplicando as distâncias percorridas pelo material dos Telecentros para os CRCs ($\sum_t \sum_j \sum_i c_{ij} \cdot x_{ijt}$), dos CRCs para as empresas recicladoras

$(\sum_j \sum_k \sum_t g_{jk} \cdot y_{jkt})$ e dos CRCs para os Telecentros $(\sum_i \sum_{t=3}^T \sum_j e_{ji} \cdot n_{jit})$ pelo fator γ que representa o custo por quilômetro e por quilograma de material. Por último temos as penalizações do modelo através dos parâmetros r , β e α , os dois primeiros buscam evitar que a quantidade de material não processada (yn_{jt}) seja grande enquanto o último termo procura evitar que o material processado seja todo enviado para a doação ao invés de retornar a Telecentros, $\alpha \cdot (\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} m_{jt})$. Esta penalização é necessária, pois os custos referentes ao transporte de material para a doação não estão contemplados no orçamento disponível para a manutenção do programa. Em geral, quem recebe a doação responsabiliza pelo transporte para a retirada do material.

As restrições (4.19) e (4.20) garantem que todo o material que está nos Telecentros deve ser encaminhado para os CRCs, durante todo o horizonte de planejamento. Na primeira o material que há nos Telecentros é apenas o material que a comunidade encaminha isso ocorre nos períodos menores ou iguais a q . A partir do período q os equipamentos utilizados nos Telecentros, que já estão mais próximos do fim de vida útil, sofrem deterioração. Desta forma, a restrição (4.20) impõe que o material danificado recebido da comunidade mais o material que se deteriora, deve ser encaminhado aos CRCs.

Todo material que chega nos CRCs, proveniente dos Telecentros $(\sum_{i \in I} x_{ijt})$ e proveniente dos órgãos governamentais (*Gov*) esse material é dividido entre material processado (yp_{jt}) e material não processado (yn_{jt}). Note que, isso só ocorre se o CRC está em funcionamento. Observe que a restrição (4.21) implica em não linearidade no modelo matemático. Para linearizar o problema, a restrição (4.21) pode ser substituída pelas seguintes restrições:

$$yp_{jt} + yn_{jt} = \sum_i x_{ijt} + Gov \cdot z_{jt}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.36)$$

$$\sum_i x_{ijt} \leq CR \cdot z_{jt}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4.37)$$

A restrição (4.36) determina que em um período t todo o material que está no CRC (seja ele processado ou não) é o somatório do material de origem dos Telecentros acrescido do material de origem governamental (*Gov*) multiplicado pela variável binária que determina se a instalação está aberta naquele instante, z_{jt} , assim somente se a instalação estiver aberta receberá material de órgãos governamentais.

Além da restrição (4.36) é necessário também garantir que apenas um CRC aberto receba material dos Telecentros e que a capacidade do CRC não seja excedida, assim a restrição (4.37) se fez necessária, garantido que o valor da variável x_{ijt} seja menor que a capacidade do CRC multiplicado pela variável binária z_{jt} que indica se ele está aberto ou não.

As equações (4.22) a (4.24) são restrições de fluxo dos CRCs. Pela restrição (4.23), nos períodos anteriores ou iguais a q , a quantidade de computadores que sai dos CRCs para os Telecentros deve ser igual a zero, isso ocorre, pois no início do planejamento assumimos que ainda não houve tempo para completar o processamento do material. A equação (4.23) impõe que a porcentagem do material processado que foi recuperado $[(1-s) \cdot yp_{jt}]$ seja enviada para os Telecentros ou para doação. Pela restrição (4.24), o material processado e não recuperado mais o material não processado deve ser enviado para as empresas recicladoras.

A restrição (4.25) garante que a capacidade de processamento de cada CRC não seja excedida e que apenas os CRCs abertos podem receber material.

As restrições (4.26), (4.27) e (4.28) controlam a abertura dos CRCs. A inequação (4.26), determina que um CRC pode ser aberto uma única vez. A restrição (4.27) relaciona as variáveis de estado de abertura (z_{jt}) com as variáveis de mudança no estado de abertura (p_{jt}). Ou seja, se um CRC não estava aberto no período $(t-1)$ ($z_{j,t-1} = 0$) e está aberto no período t ($z_{j,t} = 1$), então houve mudança no estado de abertura ($p_{jt} = 1$). Já a restrição (4.28) garante que se um CRC que foi aberto no período $(t-1)$ permanecerá aberto até o final do horizonte de planejamento.

As restrições (4.29) a (4.32) impõem que a quantidade de computadores que deve ser mantida nos Telecentros, precisa estar dentro de uma faixa considerada ideal para garantir o funcionamento dos Telecentros. A quantidade inicial de computadores disponíveis em cada unidade no início do horizonte de planejamento é definida pela restrição (4.29). A restrição (4.30) é uma equação de balanceamento de estoques nos Telecentros a partir dos períodos em que o processo de recuperação é finalizado ($t \geq q$). Ou seja, a quantidade de equipamentos nos Telecentros no período t ($v_{i,t}$) é igual a quantidade disponível no período anterior ($v_{i,t-1}$) mais a quantidade de material recondicionado recebido dos CRCs menos a quantidade que deteriorou no período anterior. As restrições (4.31) e (4.32) determinam a

quantidade máxima e mínima de computadores que podem ser alocados aos Telecentros, respectivamente.

As restrições (4.33) e (4.34) garantem que o limite orçamentário não seja excedido, tanto para a abertura de novas instalações como para a manutenção do programa.

Finalmente as restrições (4.35) referem-se aos domínios das variáveis utilizadas no modelo.

5 ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Os modelos propostos no capítulo anterior, MCLA, MCLAM e MCLAM-FRD, foram implementados utilizando a linguagem de modelagem algébrica GAMS (*General Algebraic Modeling System*) versão 23.5.1 e resolvidos através do *solver* CPLEX 12.2, em um computador com processador *Intel Core i5 2.20 GHz*. e memória RAM instalada de 6Gb.

5.1 Dados do Problema

De acordo com as estimativas da Fundação Getúlio Vargas (2013) no Brasil existem mais de 2000 Telecentros. Para esse trabalho são considerados apenas os 80 Telecentros chamados Nucleadores. Esses Telecentros Nucleadores são considerados como pontos de descarte de material proveniente da comunidade. Os Telecentros nucleadores estão distribuídos por todo Brasil pelo menos um em cada estado, a maioria nas capitais. A Tabela 5.1 apresenta a distribuição de Telecentros por estado, bem como a estimativa da quantidade de material classificado como lixo TICC gerado em cada Telecentro mensalmente.

Tabela 5.1 Distribuição dos Telecentros

Estado	Cidade	Numeração	Quantidade de Material nos Telecentros (kg/mês)
AC	Rio Branco	1	139.9
	Rio Branco	2	139.9
AL	Maceió	3	388.6
	Maceió	4	388.6
AP	Macapá	5	165.8
	Macapá	6	165.8
AM	Manaus	7	751.1
	Manaus	8	751.1
BA	Salvador	9	2230.5
CE	Fortaleza	10	751.1
	Fortaleza	11	751.1
	Cajazeiras	12	751.1
	Fortaleza	13	751.1
DF	Brasília	14	534
	Brasília	15	534
	Brasília	16	534
	Brasília	17	534
ES	Vitória	18	135.6
	Vila Velha	19	345.4
	Vitória	20	135.6
GO	Goiânia	21	542.5
	Goiânia	22	542.5
MA	São Luís	23	421.6
	São Luís	24	421.6
MT	Cuiabá	25	229.7
	Cuiabá	26	229.7
MS	Campo Grande	27	328
	Campo Grande	28	328
MG	Belo Horizonte	29	659.8
	Belo Horizonte	30	659.8
	Belo Horizonte	31	659.8
	Uberaba	32	246.7
PA	Belém	33	580
	Belém	34	580
PB	João Pessoa	35	30.2
	João Pessoa	36	30.2

Estado	Cidade	Numeração	Quantidade de Material nos Telecentros (kg/mês)
PR	Curitiba	37	727.9
	Curitiba	38	727.9
	Foz do Iguaçu	39	213.4
PE	Recife	40	426.9
	Recife	41	426.9
	Recife	42	426.9
PI	Teresina	43	339.4
	Teresina	44	339.4
RJ	Rio de Janeiro	45	1756.4
	Rio de Janeiro	46	1756.4
	Niterói	47	406.1
	Nova Iguaçu	48	662.7
	Rio de Janeiro	49	1756.4
	Teresópolis	50	136.5
RN	Natal	51	334.9
	Natal	52	334.9
RS	Porto Alegre	53	587.5
	Porto Alegre	54	587.5
	Caxias do Sul	55	362.9
	Santa Maria	56	217.5
	São Leopoldo	57	178.5
RO	Porto Velho	58	177.7
	Porto Velho	59	177.7
RR	Boa Vista	60	118.4
	Boa Vista	61	118.4
SC	Florianópolis	62	1170
	Florianópolis	63	1170
	Florianópolis	64	1170
SP	São Paulo	65	4685.2
	São Paulo	66	4685.2
	Amparo	67	54.9
	Bragança Paulista	68	122.2
	Campinas	69	900.8
	Diadema	70	321.7
	Guarulhos	71	1018.6
	Indaiatuba	72	168.2
	Osasco	73	555.3
	Piracicaba	74	304.1
	Santos	75	349.8
Santo André	76	561.6	

Estado	Cidade	Numeração	Quantidade de Material no Telecentro (kg/mês)
SE	Aracaju	77	237.9
	Aracaju	78	237.9
TO	Palmas	79	95.1
	Palmas	80	95.1

Fonte - Elaborado pela Autora

A geração de resíduos eletroeletrônicos de cada Telecentro foi estimada pela quantidade de habitantes em cada cidade, a quantidade de lixo tipo TICC gerada por habitante no Brasil, pelo índice de recuperação desse material e pelo número de Telecentros existentes em cada cidade. Por Exemplo: a cidade de São Paulo possui, segundo o CENSO IBGE 2010, 11.244.369 habitantes, com o rendimento estimado de 1 Kg de lixo TICC por habitante por ano temos 11.244.369 Kg de resíduos TICC por ano. Deste total penas 1% chega a reciclagem, assim estima-se que 112.444 podem chegar aos Telecentros e entrar na rede proposta pelo Programa Computadores para a Inclusão. Como a cidade de São Paulo possui dois Telecentros esse valor em Kg foi dividido por dois, ou seja, a expectativa é que cada Telecentro localizado na cidade de São Paulo receba 56.222 Kg de material TICC por ano, aproximadamente. A quarta coluna da Tabela 5.1 apresenta a quantidade de material que cada Telecentro recolhe da comunidade por mês. Note que esta estimativa não considera, a priori, a possibilidade de que o material proveniente de outras cidades chegue até os Telecentros. No entanto, para efeito de modelagem essa pressuposição parece ser razoável, pois a ideia inicial do projeto é que os Telecentros sejam uma opção para descarte de material nas comunidades nas quais estão inseridas.

Os computadores utilizados nos Telecentros são de uso público e já são usados, assim possuem uma taxa de deterioração maior que computadores novos de uso privado. Para esse trabalho consideramos que, de um total entre 25 e 30 disponíveis em cada Telecentros (de 75Kg a 90Kg de material), mensalmente três máquinas se deterioram. Porém, no horizonte de planejamento essa deterioração só começa a ocorrer a partir do momento que os Telecentros começam a receber computadores do fluxo reverso dos CRCs, ou seja, a partir do terceiro período. Essa medida foi necessária, pois se houvesse deterioração nos dois primeiros períodos o número de máquinas nos Telecentros seria inferior à capacidade mínima necessária para a operacionalização dos mesmos. Esses dados sobre a operacionalização dos Telecentros foram fornecidos por meio dos relatórios do projeto 'Computadores para a Inclusão'. Quanto à taxa de retorno que ocorre entre os CRCs e os Telecentros, a análise dos dados reais mostra que de cada 10 computadores que chegam

aos CRCs, três são recuperados e retornam aos Telecentros ou são enviados para as empresas recicladoras. O tempo gasto para um material entregue pela comunidade chegar a um CRC e ser recondicionado ou encaminhado ao descarte final é de dois meses.

Neste trabalho, considera-se que cada local onde existe um Telecentro Nucleador também pode receber um CRC. Para avaliar a necessidade de novos CRCs é necessário considerar a capacidade de processamento dos CRCs existentes e a capacidade para os novos candidatos. Para esta estimativa foram consideradas a capacidade real média dos CRCs já existentes no país: CESMAR (em Porto Alegre), GAMA (em Brasília), Belo Horizonte Digital (em Belo Horizonte), Lauro de Freitas (na Bahia), Recife e Belém, que é de aproximadamente, de 1800 Kg mensais. A capacidade de recebimento de material dos CRCs foi fixada em 5400 Kg de materiais mensais, ou seja, cada CRC que pode ser aberto pode receber 5400 Kg de material e processar até 1800Kg.

Para estimar os custos de abertura de um CRC foram consideradas as licitações públicas realizadas através do Ministério das Comunicações, os editais presumem um custo de R\$250 mil ou R\$500 mil, para a instalação de um novo CRC. Para os CRCs que já se encontravam instalados foi feita a inicialização da variável de abertura ($p_{jt}=1$) e os custos de abertura dos foram considerados iguais a zero. Os custos de manutenção da rede correspondem a: custos de transportar o material dos Telecentros para os CRCs; custos de transportar os computadores recondicionados dos CRCs para os Telecentros e, custos de transportar dos CRCs para as empresas de destinação final os resíduos que não foram passíveis de aproveitamento ou o material que não pode ser processado por falta de capacidade. Esses custos de transporte foram calculados a partir da distância entre as cidades em que estão Telecentros e CRCs, multiplicada pelo custo do Km rodado em um caminhão de carga padrão (R\$1.28/Km).

Existe ainda outro custo no modelo, o custo de não processamento de material. Esse custo é composto por dois parâmetros: o custo real, por Kg de material eletroeletrônico não processado, já que pela rentabilidade deste material, o não processamento implica em prejuízos; e, o custo intangível, mais difícil de mensurar e que está associado ao custo ambiental e social de não processamento.

As empresas de reciclagem que foram consideradas para os MCLAM e MCLAM-FRD são cadastradas no CEMPRE (2013), uma lista completa com estas empresas encontra-se no Apêndice 8.1 Nessas abordagens foi considerado que todas as empresas de reciclagem estão aptas a receberem os materiais e que as mesmas não possuem limite de capacidade.

O valor dos parâmetros de orçamento foram obtidos no documento Catálogo de Dados do Governo elaborado pelo Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão que retrata os gastos da administração 2003-2010 do país. Para a instalação de unidades de acesso digital foram disponibilizados R\$29.077.441, anualmente. O orçamento que o governo brasileiro destina para a manutenção desse programa foi de R\$108.531.470 anuais. Esse valor se mostrou insuficiente, assim que fosse passível a implementação dos modelos, e considerando que para a ampliação do projeto o governo irá ampliar também os recursos o valor de orçamento considerado foi de duas vezes maior que o orçamento atualmente disponível.

O parâmetro α , que penaliza o não envio de computadores para os Telecentros teve seu valor fixado utilizando como base o custo intangível de não se processar um material eletroeletrônico.

5.1.1 Os dados dos exemplos ilustrativos

Como exemplo ilustrativo foi utilizada a rede logística do programa ‘Computadores para a Inclusão’ do estado do Rio Grande do Sul, que possui cinco Telecentros em funcionamento: dois em Porto Alegre, um em Santa Maria, um em Caxias do Sul e um em São Leopoldo. No estado há apenas um CRC instalado, na capital Porto Alegre.

Para visualizar a dimensão desse exemplo ilustrativo, a Figura 5.1, apresenta o mapa do estado do Rio Grande do Sul, com destaque para as quatro cidades que possuem Telecentros (a cidade de Porto Alegre possui duas unidades).

Figura 5.1. Mapa estado do Rio Grande do Sul com destaque para cidades com Telecentros



Fonte - Elaborado pela Autora - *Software Mapsengine*

A capacidade do CRC que está em funcionamento, assim como a capacidade dos CRCs que podem ser abertos, são as mesmas apresentadas na seção 5.1. A demanda dos Telecentros Nucleadores nas cinco cidades está representada na Tabela 5.1.

As colunas de dois a seis da Tabela 5.2 apresentam as distâncias entre as cidades onde estão instalados os Telecentros e as cidades onde é possível a abertura de CRCs. Já as colunas sete e oito apresentam as distâncias entre os possíveis locais de instalação dos CRCs e as empresas de destinação final. Das dezenove empresas que preenchem os pré-requisitos para receber material eletroeletrônico do governo, para o exemplo ilustrativo foram consideradas duas empresas que estão localizadas em Campinas (SP) e São Paulo (SP).

Tabela 5.2. Distâncias (Km) entre cidades com Telecentros no Rio Grande do Sul.

	Possíveis locais de abertura CRCs					Empresas Recicladoras	
	1-Porto Alegre	2-Porto Alegre	3-Caxias do Sul	4-Santa Maria	5-São Leopoldo	Campinas - SP	São Paulo -SP
1-Porto Alegre	0.0	0.0	103.1	213.1	46.3	649.2	669.5
2-Porto Alegre	0.0	0.0	103.1	213.1	46.3	649.2	669.5
3-Caxias do Sul	103.1	103.1	0.0	193.6	56.8	570.3	589.8
4-Santa Maria	213.1	213.1	193.6	0.0	172.4	732.8	726.6
5-São Leopoldo	46.3	46.3	56.8	172.4	0.0	612.5	632.0

Fonte- Organizado pela Autora

5.2 Modelo Capacitado de Locação-Alocação (MCLA)

5.2.1 Exemplo Ilustrativo para o MCLA

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da aplicação do MCLA para o exemplo ilustrativo. Note que, além do CRC1 (Porto Alegre), que já estava em funcionamento, o CRC 4 (Santa Maria) foi selecionado para a abertura. A primeira coluna apresenta a porcentagem de utilização da capacidade total de processamento do CRC aberto e a segunda coluna de qual Telecentro cada CRC recebe material para processamento.

Tabela 5.3. Resultados do MCLA para Exemplo Ilustrativo

CRC	Porcentagem de Utilização	Telecentro do qual recebe Material
1-Porto Alegre	95.4%	1-2-Porto Alegre; 3-Caxias do Sul; 5-São Leopoldo
4-Santa Maria	12.1%	4-Santa Maria

Fonte-Organizado pela Autora

Nesse modelo todo o material que está nos Telecentros deve ser encaminhado para os CRCs e processado, por isso a abertura de um novo CRC seria obrigatória para respeitar essa restrição, ou seja, apenas um CRC não seria capaz de processar todo o material desse estado. A cidade de Santa Maria é a mais distante da capital Porto Alegre logo, tendo em vista que a abertura de um novo CRC seria inevitável, a opção pela cidade mais distante do CRC já instalado é a mais plausível.

Se aumentarmos a capacidade de processamento do CRC 1-Porto Alegre, nenhum outro CRC será aberto, exatamente o que era esperado para o comportamento do modelo. Pois os custos de abertura de uma instalação são muito superiores aos custos de transporte entre as cidades, nesse exemplo ilustrativo.

5.2.2 Experimentos com dados reais

O MCLA considera apenas a rede reversa com 2 níveis, onde o material pode se deslocar dos diversos Telecentros para os CRCs. Todos os dados considerados nesta modelagem correspondem a um ano de funcionamento da rede. A aplicação do MCLA ao problema da rede do programa ‘Computadores para a Inclusão’ resulta em um problema com 6561 restrições e 6480 variáveis, das quais 80 são binárias. O modelo foi executado permitindo o máximo de abertura de CRCs, ou seja, um CRC para cada Telecentro ($P_{\max} = 80$).

O modelo encontrou uma solução ótima depois de 8 segundos de processamento computacional. Os resultados obtidos indicam a abertura de 40 CRCs, implicando em um custo total de R\$22.756.654,40, dos quais 14 milhões correspondem aos custos de abertura e o restante corresponde aos custos de transporte dos equipamentos entre os Telecentros e os CRCs durante o período de um ano.

O mapa apresentado na Figura 5.2 mostra o resultado do modelo MCLA para a distribuição dos CRCs no Brasil. Podemos notar que há apenas 35 pontos no mapa, sendo que são 40 CRCs instalados, isso ocorre porque as cidades de Fortaleza (CE), Florianópolis (SC) e São Paulo (SP) possuem dois CRCs abertos, e o Rio de Janeiro (RJ) teve três CRCs instalados.

Figura 5.2. Distribuição CRCs do MCLA



- | | | |
|------------------|------------------|---------------------|
| ● Rio Branco | ● Belém | ● Diadema |
| ● Maceió | ● Curitiba | ● Guarulhos |
| ● Macapá | ● Foz do Iguaçu | ● Osasco |
| ● Salvador | ● Recife | ● Aracaju |
| ● Fortaleza | ● Teresina | ● Palmas |
| ● Brasília | ● Rio de Janeiro | ● Manaus |
| ● Vila Velha | ● Nova Iguaçu | ● Natal |
| ● Goiânia | ● Porto Alegre | ● Amparo |
| ● São Luís | ● Porto Velho | ● Bragança Paulista |
| ● Cuiabá | ● Boa Vista | |
| ● Campo Grande | ● Florianópolis | |
| ● Belo Horizonte | ● São Paulo | |
| ● Uberaba | ● Campinas | |

Fonte - Elaborado pela Autora - *Software Mapsengine*

Dos quarenta CRCs escolhidos para serem abertos, apenas dezessete estão com a capacidade máxima (100%): CRC9(Salvador, BA); CRC11(Fortaleza, CE); CRC17 (Brasília, DF); CRC29 (Belo Horizonte, MG); CRC45, CRC46 e CRC49 (Rio de Janeiro, RJ); CRC53 (Porto Alegre, RS); CRC63 e CRC64 (Florianópolis, SC), CRC65 e CRC66 (São Paulo, SP); CRC67 (Amparo, SP); CRC68 (Bragança Paulista, SP); CRC69 (Campinas, SP); CRC70 (Diadema, SP); e, CRC71 (Guarulhos, SP).

A Tabela 5.4 a seguir sintetiza os resultados obtidos pelo modelo. As três primeiras colunas identificam os locais selecionados para a abertura dos CRCs, indicando o estado, a cidade e a numeração correspondente ao candidato (indicada na Tabela 5.1). A quarta coluna apresenta a quantidade de material enviada a cada CRC, a quinta coluna mostra a utilização de sua capacidade, e a sexta coluna, por sua vez, mostra os resultados de alocação, ou seja, quais Telecentros enviam material para qual CRC instalado.

Tabela 5.4. Resultados Obtidos pelo MCLA

Estado	Cidade	Numeração	Quantidade de Material Processado (kg)	Porcentagem média de utilização	Telecentros Atendidos
Acre	Rio Branco	1	3357.96	15.55%	1-2-Rio Branco
Alagoas	Maceió	3	9326.08	43.18%	3-4-Maceió
Amapá	Macapá	5	3979.14	18.42%	5-6-Macapá
Amazonas	Manaus	7	18025.25	83.45%	7-8-Manaus
Bahia	Salvador	9	21600.21	100%	9-Salvador
Ceará	Fortaleza	11	21603.26	100%	10-11-13-Fortaleza
	Cajazeiras	12	14447.24	66.89%	10-12-Fortaleza
Distrito Federal	Brasília	17	21599.37	100%	14-15-16-17-Brasília
Espírito Santo	Vila Velha	19	7398.72	34.25%	18-20-Vitória; 19-Vila Velha
Goiás	Goiânia	21	17049.18	78.93%	17-Brasília; 21-22-Goiânia
Maranhão	São Luís	23	10119.43	46.85%	23-24-São Luis
Mato Grosso	Cuiabá	25	5513.5	25.53%	25-26-Cuiabá
Mato Grosso do Sul	Campo Grande	27	7872.04	36.44%	27-28-Campo Grande
Minas Gerais	Belo Horizonte	29	21600.7	100%	29-30-31-Belo Horizonte
	Uberaba	32	2960	13.70%	32-Uberaba
Pará	Belém	33	13920.31	64.45%	33-34-Belém
Paraná	Curitiba	37	17468.96	80.87%	37-38-Curitiba
	Foz do Iguaçu	39	3088.085	14.30%	39-Foz do Iguaçu; 56-Santa Maria
Pernambuco	Recife	40	16094.48	74.51%	35-36-João Pessoa; 40-41-42-Recife
Piauí	Teresina	43	8144.39	37.71%	43-44-Teresina
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	45	21592.14	100%	45-46-Rio de Janeiro
	Rio de Janeiro	46	21603.71	100%	45-46-Rio de Janeiro
	Nova Iguaçu	48	15047.98	69.67%	31-Belo Horizonte; 47-Niteroi; 48-Nova Iguaçu; 50-Teresópolis
	Rio de Janeiro	49	21603.71	100%	45-49-Rio de Janeiro
Rio Grande do Norte	Natal	51	8038.11	37.21%	51-52-Natal
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	53	21599.31	100%	53-54-Porto Alegre; 55-Caxias do Sul; 56-Santa Maria; 57-São Leopoldo
Rondônia	Porto Velho	58	4265.58	19.75%	58-59-Porto Velho
Roraima	Boa Vista	60	2842.58	13.16%	60-61-Boa Vista
Santa Catarina	Florianópolis	63	21606.49	100%	55-Caxias do Sul; 62-63-Florianópolis
	Florianópolis	64	21593.54	100%	62-64-Florianópolis

Estado	Cidade	Número	Quantidade de Material Processado (kg)	Porcentagem média de utilização	Telecentros Atendidos
São Paulo	São Paulo	65	21589.19	100%	65-São Paulo
	São Paulo	66	21589.19	100%	66--São Paulo
	Amparo	67	21589.19	100%	66--São Paulo
	Bragança Paulista	68	21594.05	100%	65-66-São Paulo; 68-Bragança Paulista
	Campinas	69	21577.08	100%	65-São Paulo; 67-Amparo; 69-Campinas; 72-Indaiatuba; 74-Piracicaba
	Diadema	70	21682.71	100%	65-São Paulo; 70-Diadema
	Guarulhos	71	21578.86	100%	65-São Paulo; 71-Guarulhos
	Osasco	73	13529.96	62.64%	73-Osasco; 75-Santos; 76-Santo André
Sergipe	Aracaju	77	10875.22	50.35%	9-Salvador; 77-78-Aracaju
Tocantins	Palmas	79	2282.97	10.57%	79-80-Palmas

Fonte - Elaborado pela Autora

Os CRCs com a capacidade máxima de aproveitamento estão localizados em capitais ou regiões mais populosas. Em algumas cidades como Belo Horizonte, Fortaleza e Brasília onde um CRC é aberto para processar a demanda dos Telecentros da cidade, não recebendo material das demais cidades. Isso demonstra que algumas cidades brasileiras necessitam de instalações de CRCs apenas para cumprirem sua própria demanda de reciclagem de computadores. Estes resultados de alocação também podem ser explicados pela consideração de que os custos de atendimento de um CRC para um Telecentro na mesma cidade foram considerados nulos, isso parece ser razoável, pois de qualquer forma, estes custos seriam menores.

Em algumas regiões o aproveitamento máximo de um CRC ocorre pela proximidade com Telecentros de cidades vizinhas. Por exemplo, no Rio Grande do Sul, um CRC aberto em Porto Alegre, trabalhando com sua capacidade máxima é capaz de processar o material de todos os Telecentros Nucleadores do estado, ou seja, todo material oriundo das cidades de Caxias do Sul, Santa Maria e São Leopoldo, além dos Telecentros Nucleadores de Porto Alegre.

No estado mais populoso do país, São Paulo, temos a combinação de um grande número de Telecentros com uma concentração populacional muito grande nas cidades em que estão localizados. Os resultados do modelo indicam a abertura de 8 CRCs no estado de São Paulo, para atender os 12 Telecentros Nucleadores que existem nesse estado. Note na

Tabela 5.4 que a demanda por coleta de equipamentos nos dois Telecentros de São Paulo (65 e 66) são atendidas parcialmente pelos CRCs instalados na cidade, ocupando toda a sua capacidade, e parcialmente por outros CRCs. No caso do Telecentro 65, além do CRC da própria cidade, também deve enviar material para os CRCs: 68- Bragança Paulista, 69- Campinas, 70-Diadema e 71-Guarulhos, todos no mesmo estado. Um facilitador para esse processo é que as cidades destacadas possuem uma proximidade geográfica, o que reduz os custos logísticos. Assim, esses oito CRCs devem trabalhar com a capacidade máxima, 100%, para atender a demanda.

A baixa capacidade de utilização atribuída a alguns CRCs pode ser explicada por dois contextos, ou estes CRCs estão abertos em centros urbanos isolados ou estão alocados próximos a outros CRCs abertos que não foram suficientes para atender a demanda da região. Como o Brasil é um país de grande extensão territorial e apresenta bastante heterogeneidade na distribuição populacional, algumas cidades receberam CRCs com baixa capacidade, como é o caso do CRC1 (Rio Branco) com 15.55%, do CRC60 (Boa Vista) com 13.16% e do CRC70 (Palmas) com 10.57%, onde os CRCs abertos tratam apenas o material das próprias comunidades. Isso demonstra que os custos de transporte são altos o suficiente para que seja mais viável a abertura de mais CRCs ao invés de transportar o material a um CRC mais próximo.

O CRC39 de Foz do Iguaçu, é um exemplo de baixa utilização de capacidade explicada pela proximidade com outros CRCs. Este CRC apresenta apenas 14.3% de utilização de sua capacidade de processamento, sendo que ele trata do material da própria cidade e o restante, apenas 30% da demanda, de (56) Santa Maria, cujo CRC mais próximo, CRC53 (Porto Alegre), não possui capacidade para processar.

Em resumo, o resultado deste primeiro modelo prevê a instalação de 40 CRCs de um total de 80 candidatos. Destes 40 CRCs, 6 já estavam instalados. A maior parte dos CRCs abertos pelos resultados do modelo MCLA não utiliza a capacidade máxima de utilização, isso ocorre, pois os custos de transporte são altos em comparação com os custos para a abertura de novas instalações.

5.3 Análise do Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo (MCLAM)

5.3.1 Exemplo Ilustrativo

O modelo foi executado, para o exemplo ilustrativo, considerando um período de 1 ano e uma quantidade mínima de material processado de 50%, ou seja, metade de todo material que chega aos Telecentros deve ser processada.

Além do CRC1 (Porto Alegre) que já estava em funcionamento, o CRC3 (Caxias do Sul) foi selecionado para entrar em operação. Na Tabela 5.5 temos na segunda coluna a porcentagem de utilização dos CRCs, que é a mesma durante os 12 períodos que o modelo foi rodado, e na terceira coluna temos de qual Telecentro cada CRC recebe material.

Tabela 5.5. Resultados do MCLAM para Exemplo Ilustrativo

CRC	Porcentagem de Utilização	Telecentro do qual recebe Material
1-Porto Alegre	33%	1-2-Porto Alegre;
3-Caxias do Sul	21%	3-Caxias do Sul; 4-Santa Maria; 5-São Leopoldo

Fonte - Elaborado pela Autora

Ambos os CRCs instalados, enviam o material não passível de aproveitamento para a empresa recicladora localizada a menor distância, empresa 1- Campinas (SP). O material que retorna aos Telecentros, foram encaminhados apenas para os Telecentros localizados nas mesmas cidade que os CRC instalados, isso mostrou a necessidade de direcionar o fluxo de retorno.

A quantidade de material gerada no estado é de 1939.9 Kg mês, ou seja, se a com a taxa de processamento obrigatória for menos que 92.8% apenas um CRC poderia processar o material. Porém percebeu-se que quando a taxa de processamento obrigatória for superior a 45% um novo CRC é aberto. Esse comportamento ocorre pelos custos de transporte, a partir dessa quantidade de material processado passa a ser mais vantajoso, economicamente, a abertura de um novo CRC do que arcar com os custos de transporte.

5.3.2 Dados Reais

O MCLAM considera uma rede reversa de 3 níveis, onde o material se desloca entre os Telecentros Nucleadores, os CRCs e as empresas de destinação final. O modelo foi executado considerando um período de 4 anos, durante esse tempo foi utilizada uma taxa de crescimento de demanda de 10% ao ano, que é a estimativa de crescimento do descarte do material eletroeletrônico no Brasil. A aplicação do MCLAM ao problema da rede do

programa ‘Computadores para a Inclusão’ resulta em um problema com 23.216 restrições e 695.040 variáveis, das quais 7.680 são binárias.

A solução ótima para o modelo foi encontrada depois de 1 hora, 22 minutos e 34 segundos de execução. O custo total foi de R\$726.962.403,13, dos quais R\$11.750.000 correspondem aos custos de abertura dos 27 CRCs, pois 6 CRCs já estavam abertos, e o restante corresponde aos custos de transporte dos equipamentos eletroeletrônicos entre os Telecentros, os CRCs e as empresas de destinação final durante o período de quatro anos. O orçamento gasto com abertura de instalações (R\$11.750.000) corresponde a apenas 41% do orçamento anual para a instalação de centros de apoio ao programa ‘Computadores para a Inclusão’. O mapa apresentado na Figura 5.3 mostra a distribuição dos CRCs abertos pelo MCLAM no Brasil. Note que há 30 pontos no mapa, sendo que são 32 os CRCs instalados, isso ocorre porque as cidades de São Luiz (MA) e São Paulo (SP) possuem dois CRCs abertos. Podemos perceber também que há uma concentração de CRCs na região sudeste do país, são 13 CRCs instalados na região sendo que nas regiões Norte, Nordeste e Sul são apenas 5, em cada, e somente 4 no centro-oeste brasileiro.

Figura 5.3 Distribuição dos CRCs para o MCLAM



- | | | |
|----------------|----------------|---------------|
| Rio Branco | Curitiba | Aracaju |
| Salvador | Foz do Iguaçu | Amparo |
| Fortaleza | Recife | Caxias do Sul |
| Brasília | Rio de Janeiro | São Leopoldo |
| Vila Velha | Nova Iguaçu | Indaiatuba |
| Goiânia | Porto Alegre | Santo André |
| São Luís | Porto Velho | |
| Cuiabá | Boa Vista | |
| Campo Grande | São Paulo | |
| Belo Horizonte | Diadema | |
| Uberaba | Guarulhos | |
| Belém | Osasco | |

Fonte - Elaborado pela Autora - *Software Mapsengine*

O resultado do MCLAM prevê a abertura de trinta e dois CRCs. A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos, as primeiras três colunas identificam os CRCs abertos, pelos estados, cidades e respectiva numeração. A coluna quatro indica o período em que o CRC foi aberto. As colunas cinco e seis apresentam a porcentagem da capacidade de utilização de cada CRC no período em que foi aberto e no último período do horizonte de planejamento, respectivamente. A sétima coluna, apresenta quais Telecentros enviam material para o CRC aberto. A oitava coluna indica para quais empresas os CRCs encaminham o material a ser reciclado.

Tabela 5.6 Resultados Obtidos pelo MCLAM

CRCs selecionados para Abertura		Período de Abertura		% de capacidade utilizada		Telecentros	Empresas
				Início	Final		
AC	Rio Branco	2	1	4%	5%	1-Rio Branco	3-Campinas
AM	Macapá	6	13	7%	12%	6-Macapá	3-Campinas
BA	Salvador	9	1	62%	78%	9-Salvador	4-10-12-13-14-19-São Paulo; 6-São Bernardo; 9-Jacareí; 18-Mauá
CE	Fortaleza	11	1	21%	26%	13-Fortaleza	4-10-12-13-14-19-São Paulo; 6-São Bernardo; 9-Jacareí, 18-Mauá
DF	Brasília	17	1	59%	75%	14-15-16-17-Brasília	6-São Bernardo; 9-Jacareí, 12-13-14-19-São Paulo, 18- Mauá
ES	Vila Velha	19	1	17%	22%	18-20-Vitória; 19-Vila Velha	2-Guarulhos; 16- Americana
GO	Goiânia	22	1	35%	45%	21-22-Goiânia; 79-80-Palmas	3-Campinas
MA	São Luís	23	1	100%	100%	3-4-Maceió; 6-Macapá; 10-11-12-Fortaleza; 23-24-São Luis; 35-36-João Pessoa; 41-Recife; 43-44-Teresina; 51-52-Natal; 77-78-Aracaju	7- São Paulo
	São Luís	24	1	100%	100%	3-4-Maceió; 5-6-Macapá; 10-11-12-Fortaleza; 23-24-São Luis; 35-36-João Pessoa; 41-Recife; 43-44-Teresina; 52-Natal; 77-78-Aracaju	7- São Paulo
MT	Cuiabá	26	1	13%	16%	25-26-Cuiabá	3-Campinas
MS	Campo Grande	27	1	18%	23%	27-28-Campo Grande	3-Campinas
MG	Belo Horizonte	31	1	55%	69%	29-30-31-Belo Horizonte	4-10-12-13-14-19-São Paulo; 6-São Bernardo; 9-Jacareí
	Uberaba	32	1	7%	9%	32-Uberaba	4-10-12-13-14-19-São Paulo; 6-São Bernardo; 9-Jacareí; 18-Mauá
PA	Belém	34	1	32%	64%	33-34-Belém; 43-44-Teresina	15-São Paulo
PR	Curitiba	38	1	40%	51%	37-38-Curitiba	3-Campinas
	Foz do Iguaçu	39	1	6%	7%	39-Foz do Iguaçu	8- Paulínia
RJ	Rio de Janeiro	46	1	100%	100%	45-46-49-Rio de Janeiro	2-Guarulhos; 16- Americana
	Iguaçu	48	1	80%	100%	45-46-Rio de Janeiro; 47-Niterói; 48-Nova Iguaçu; 50-Teresópolis	2-Guarulhos; 16- Americana

CRCs selecionados para Abertura		Período de Abertura	% de capacidade utilizada		elecentros	Empresas	
			Início	Final			
RS	Porto Alegre	53	1	41%	78%	53-54-Porto Alegre; 62-63-64-Florianópolis	11-São Paulo
	Caxias do Sul	55	1	10%	13%	55-Caxias do Sul	11-São Paulo
	São Leopoldo	57	1	100%	100%	56-Santa Maria; 57-São Leopoldo; 62-63-64-Florianópolis	11-São Paulo
RO	Porto Velho	58	1	59%	74%	2-Rio Branco; 7-8-Manaus; 58-59-Porto Velho; 60-Boa Vista	17-Guarulhos
RR	Boa Vista	61	1	3%	4%	61-Boa Vista	3-Campinas
SP	São Paulo	65	1	100%	100%	65-66-São Paulo	4-São Paulo
	São Paulo	66	1	100%	100%	65-66-São Paulo	4-São Paulo
	Amparo	67	1	100%	100%	65-66-São Paulo; 67-Amparo; 68-Bragança Paulista	4-10-12-13-14-19-São Paulo; 6-São Bernardo; 9-Jacareí; 18-Mauá
	Diadema	70	1	100%	100%	65-São Paulo; 70-Diadema	5-Bauru
	Guarulhos	71	1	100%	100%	47-Niterói; 48-Iguaçu; 50-Teresópolis; 68-Bragança Paulista; 71-Guarulhos	2-Guarulhos
	Indaiatuba	72	1	100%	84%	69-Campinas; 72-Indaiatuba; 74-Piracicaba	3-Campinas
	Osasco	73	1	15%	19%	73-Osasco	2-Guarulhos; 16-Americana
	Santo André	76	1	100%	74%	45-46-Rio de Janeiro; 50-Teresópolis; 75-Santos; 76-Santo André	5-Bauru
SSE	Aracaju	78	1	5%	23%	3-4-Maceió; 77-78-Aracaju	4-13-14-São Paulo; 6-São Bernardo; 18-Mauá

Fonte - Elaborado pela Autora

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.6 podemos observar que alguns CRCs foram abertos para atender apenas a demanda dos Telecentros da própria cidade. Por outro lado, onze dos CRCs abertos tem a alocação de capacidade máxima (100%). Dos CRCs que atendem a demanda da própria cidade temos, como exemplo, o caso do CRC61 (Boa Vista) e do CRC2 (Rio Branco). Esses CRCs utilizam, no início do horizonte de planejamento, apenas 3% e 4%, respectivamente, da sua capacidade. Ao longo dos períodos considerados no modelo ocorre um aumento de 1% na utilização de cada um deles, pois a quantidade de material proveniente dos Telecentros aumenta ao longo dos períodos. Os CRCs com capacidade máxima alocada são: CRC23 (São Luis), CRC24 (São Luís), CRC46

(Rio de Janeiro), CRC57 (São Leopoldo), CRC 66 (São Paulo), CRC67 (Amparo), CRC70 (Diadema), CRC71 (Guarulhos), CRC72 (Indaiatuba) e CRC76 (Santo André).

Os CRCs 23 e 24, ambos localizados em São Luís, devem trabalhar em capacidade máxima para processar o material de diversos Telecentros. Durante o primeiro ano do horizonte de planejamento (12 primeiros períodos) os CRCs de São Luís recebiam material de dezessete Telecentros, das regiões norte e nordeste. Com o aumento anual da demanda, que ocorre no período 13, houve a necessidade de instalar um novo CRC na região Norte, Macapá (6). O CRC de Macapá (6) trabalha com uma baixa capacidade, na sua abertura 7% e fim do horizonte de planejamento 12%, pois apenas processa o material da própria cidade.

Outro CRC com baixa capacidade alocada é o CRC78 (Aracaju), no início do planejamento apenas 5% da sua capacidade é utilizada. Durante o primeiro ano, ou seja, nos primeiros 12 períodos este CRC processa apenas o material oriundo dos Telecentros da própria cidade. Porém, a partir do segundo ano (no período 13) a demanda do Telecentro Maceió (3), que antes enviava material apenas para os CRCs 23 e 24 (São Luís), aumenta. Além disso, existe a necessidade de que outro CRC receba o que São Luís (23) não consegue processar, assim o CRC78 (Aracaju) passa a receber esse material, e a utilização da sua capacidade de alocação sobe para 23%.

A última coluna da Tabela 5.6 aponta para quais empresas cada CRC envia os materiais não passíveis de recuperação. Apesar de alguns CRCs enviarem para mais de uma localidade a decisão do modelo é baseada simplesmente na minimização dos custos de transporte.

Além do fluxo de material dos Telecentros para os CRCs e do fluxo de material dos CRCs para as empresas de descarte, ocorre também o fluxo de equipamentos recuperados nos CRCs que devem retornar para os Telecentros. A Tabela 5.7 apresenta os resultados do fluxo de retorno.

Tabela 5.7- Telecentros que recebem material de Retorno

CRCs		Telecentros que recebem material retornado	
Acre	Rio Branco	2	1-2-Rio Branco (AC)
Amapá	Macapá	6	5-6-Macapá
Bahia	Salvador	9	9-Salvador
Ceará	Fortaleza	11	10-11-13-Fortaleza
Distrito Federal	Brasília	17	14-15-16-17-Brasília
	Vila Velha	19	18-20-Vitória; 19-Vila Velha
Goiás	Goiânia	22	21-22-Goiânia
Maranhão	São Luís	23	23-24-São Luis
	São Luís	24	23-24-São Luis
Mato Grosso	Cuiabá	26	25-26-Cuiabá
Mato Grosso do Sul	Campo Grande	27	27-28-Campo Grande
Minas Gerais	Belo Horizonte	31	29-30-31-Belo Horizonte
	Uberaba	32	32-Uberaba
Pará	Belém	34	33-34-Belém; 37-Curitiba
Paraná	Curitiba	38	38-Curitiba; 39-Foz do Iguaçu
	Foz do Iguaçu	39	39-Foz do Iguaçu
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	46	45-46-49-Rio de Janeiro
	Iguaçu	48	48-Nova Iguaçu
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	53	54-Porto Alegre; 55-Caxias do Sul
	Caxias do Sul	55	55-Caxias do Sul
	São Leopoldo	57	57-São Leopoldo
Rondônia	Porto Velho	58	58-59-Porto Velho
Roraima	Boa Vista	61	60-61-Boa Vista
São Paulo	São Paulo	65	65-66-São Paulo
	São Paulo	66	65-66-São Paulo
	Amparo	67	67-Amparo
	Diadema	70	70-Diadema
	Guarulhos	71	71-Guarulhos
	Indaiatuba	72	72-Indaiatuba
	Osasco	73	73-Osasco
	Santo André	76	76-Santo André
Sergipe	Aracaju	78	78-Aracaju

Fonte - Elaborado pela Autora

Pela análise da Tabela 5.7, os CRCs retornam os equipamentos recuperados apenas para os Telecentros que estão na mesma cidade. Este comportamento já era esperado, devido a não ser estabelecido por esse modelo uma quantidade mínima de computadores a ser alocada em cada Telecentro para que o funcionamento seja mantido, ou seja, o único critério para que haja retorno de computadores é o menor custo de transporte.

Comparando os resultados referentes a abertura de instalações dos modelos MCLA e MCLAM há uma diferença considerável, percentualmente, entre a quantidade de CRCs abertos por região do país no Nordeste e no Centro Oeste. No Nordeste no primeiro modelo 22,5% das instalações abertas estão na região, já no segundo modelo apenas 15,6%. O Centro-oeste recebe mais unidades de CRCs no segundo modelo, subindo seu percentual de instalações de 7,5% para 12,5%. Nas demais regiões as alterações percentuais foram em torno de 2,5%.

Cabe resaltar que, como o modelo assume que todos os computadores reconicionados devem retornar aos Telecentros, o resultado do fluxo de computadores reconicionados nos Telecentros em cidades que possuem CRCs varia de 20 a 300 computadores, Telecentros localizados em cidades cujos CRCs recebem mais material para o reconicionamento recebem mais computadores reconicionados. A quantidade necessária de computadores para o funcionamento dos Telecentros é de 25 a 30 máquinas, ou seja, a quantidade retornada é muito superior as necessidades, o que é um problema visto que não há espaço para armazenamento desses computadores nos Telecentros. Ao mesmo tempo os demais Telecentros (localizados em cidades que não possuem CRCs) não recebem computadores reconicionados, conforme os resultados gerados por esse modelo. Este resultado mostra a necessidade de incluir considerações acerca da demanda por computadores reconicionados, bem como direcionar o fluxo de equipamentos de forma que essa demanda seja atendida e a capacidade de cada Telecentro seja respeitada.

5.4 Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)

O MCLAM-FR é mais complexo que os modelos apresentados anteriormente, pois procura incorporar mais aspectos envolvidos no problema de planejamento da rede logística do programa ‘Computadores para a Inclusão’. Desta forma, antes de aplicar o modelo cenário brasileiro do ‘Projeto Computadores para a Inclusão’, foi realizado um estudo com um exemplo ilustrativo baseado nos dados reais, ou seja, um recorte do problema com menor dimensão. O objetivo do exemplo ilustrativo é a validação do modelo matemático.

5.4.1 Exemplo Ilustrativo

Além do CRC1 (Porto Alegre), que já estava em funcionamento, o CRC3 (Caxias do Sul) foi selecionado para a abertura, sendo que, durante todo o horizonte de planejamento esses CRCs não utilizam toda a sua capacidade, a porcentagem de ocupação de cada um deles durante os períodos está representado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Porcentagem de Utilização

CRC	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-Porto Alegre	65%	65%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	77%	77%
3-Caxias do Sul	42%	42%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	44%	33%	33%

Fonte-Elaborada pela Autora

Analisando a Tabela 5.8 percebemos que apesar do CRC1 (Porto Alegre), que já estava em funcionamento, não trabalha com a sua plena capacidade, mesmo assim é aberta uma nova instalação, o CRC3 (Caxias do Sul). Isso ocorre porque o *trade-off* entre os custos de transporte e de abertura de uma nova instalação apontam a abertura como menor custo. Ao testar o modelo com um aumento da capacidade dos CRCs, sem alterar os custos de abertura, ainda temos como resultado a abertura da instalação de Caxias do Sul (3). Demais alterações no modelo, quanto a custos de não processamento, capacidade mínima de computadores nos Telecentros (que fazem com que a necessidade de computadores reconicionados diminua), penalidade por não retorno de material para os Telecentros, etc. não alteram a abertura da segunda instalação. O único cenário em que apenas o CRC1 (Porto Alegre) está em funcionamento é se reduzirmos os custos de transporte (custo de se transportar um quilograma de material eletroeletrônico por quilômetro).

A Tabela 5.9 apresenta, para cada um dos CRCs abertos por esse exemplo ilustrativo, de quais Telecentros eles recebem materiais e para quais Telecentros enviam computadores reconicionados.

Tabela 5.9 Fluxo de Material e Computadores reconicionados

CRCs	Telecentros que enviam material	Telecentros que recebem computadores reconicionados
1-Porto Alegre	1-2-Porto Alegre; 5-São Leopoldo	1-2-Porto Alegre; 5-São Leopoldo
3-Caxias do Sul	3- Caxias do Sul; 4-Santa Maria	3- Caxias do Sul; 4-Santa Maria; 5-São Leopoldo

Fonte- Elaborado pela Autora

O material enviado para os CRCs deve ser processado, respeitando as restrições de capacidade de processamento, e os equipamentos recuperados são encaminhados para Telecentros ou para instituições públicas. Nos primeiros dois períodos do horizonte de planejamento os Telecentros estão com a capacidade mínima (conforme definido nas variáveis de inicialização do problema), a partir do período três é que passam a receber o material retornável e que são consideradas as taxas de deterioração. A Tabela 5.10 mostra a porcentagem de ocupação de computadores em cada Telecentro ao longo dos períodos.

Tabela 5.10. Porcentagem de Ocupação de Computadores nos Telecentros

Telecentros	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-Porto Alegre	83%	83%	83%	100%	90%	100%	90%	83%	100%	90%	83%	100%
2-Porto Alegre	83%	83%	83%	100%	90%	100%	90%	83%	100%	90%	83%	100%
3-Caxias do Sul	83%	83%	83%	93%	83%	100%	90%	100%	93%	83%	100%	100%
4-Santa Maria	83%	83%	83%	93%	83%	100%	90%	100%	90%	83%	83%	83%
5-São Leopoldo	83%	83%	83%	100%	90%	100%	90%	83%	100%	90%	93%	83%

Fonte-Elaborada pela Autora

A variável m_{jt} representa a quantidade de computadores recuperados (em quilogramas) que não foram encaminhados para Telecentros. A Tabela 5.11 apresenta uma conversão aproximada para o número de máquinas que são encaminhados para a doação em instituições públicas de acesso digital gratuito.

Tabela 5.11. Número de Máquinas a serem encaminhadas a instituições públicas

CRC	Períodos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-Porto Alegre	0	0	99	123	106	124	121	100	124	118	108	0
3-Caxias do Sul	0	0	69	81	68	84	72	83	83	73	78	0

Fonte-Elaborada pela Autora

A Tabela 5.12 mostra qual CRC fornece computadores (em máquinas) para cada Telecentro no horizonte de planejamento.

Tabela 5.12. Fluxo de Computadores Reformulados CRC Telecentros

		Períodos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-Porto Alegre	1-Porto Alegre	0	0	8	0	6	0	1	8	0	1	8	0
	2-Porto Alegre	0	0	8	0	6	0	1	8	0	1	8	0
	5-São Leopoldo	0	0	8	0	6	0	1	8	0	4	0	0
3-Caxias do Sul	3-Caxias do Sul	0	0	6	0	8	0	6	1	0	8	3	0
	4-Santa Maria	0	0	6	0	8	0	6	0	1	3	3	0

Fonte-Elaborada pela Autora

Analisando as Tabela 5.11 e a Tabela 5.12 podemos perceber que no terceiro período o CRC 1 Porto alegre recebe material que gera 123 computadores recondicionados. São retornados oito computadores para os Telecentros 1-2-Porto Alegre e 5-São Leopoldo nesse período, o que significa máquinas suficientes para que no período subsequente a capacidade máxima de computadores seja atingida nesses Telecentros, dado que pode ser notado na coluna referente ao período quatro na Tabela 5.10.

Note que, conforme o esperado, só ocorre fluxo de retorno a partir do período 3. Isso respeita a condição imposta pelo modelo de que são necessários 2 períodos para o processamento do material recebido. Ao relacionar a Tabela 5.12 com a Tabela 5.10 perceber-se que o não envio de equipamentos recondicionados para os Telecentros em alguns períodos, como por exemplo, no período 6, acarreta em uma queda da porcentagem de ocupação. Esse fato ocorre devido aos custos de transporte dos equipamentos impactar mais sobre o modelo do que os custos de não retorno de computadores recondicionados aos Telecentros, ou seja, se diminuirmos os custos de transporte os Telecentros manterão a capacidade de 100% em suas instalações.

A Tabela 5.13 mostra para qual empresa de reciclagem o material de cada CRC será enviado. Comparando as distâncias entre as empresas e as cidades onde estão instalados os CRCs (Tabela 5.2), é possível perceber que essa decisão é baseada na menor distância.

Tabela 5.13 Fluxo de Material para a Destinação Final (em KG)

		Períodos										
Empresa		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1-Porto Alegre	1	857.5	857.5	870.1	870.1	870.1	870.1	870.1	870.1	870.1	870.1	
3-Caxias do Sul	1	566.2	566.2	585.1	585.1	585.1	585.1	585.1	585.1	585.1	585.1	

Fonte-Elaborada pela Autora

5.4.2 Experimentos com Dados Reais

A aplicação do MCLAM-FR ao problema da rede do programa ‘Computadores para a Inclusão’ no cenário nacional brasileiro resulta em um problema com 42.017 restrições e 710.359 variáveis, das quais 7.674 são binárias.

A solução ótima para o modelo foi encontrada depois 40 minutos e 44 segundos. O custo total foi de R\$1.308.594.255,96, dos quais R\$14.750.000 correspondem aos custos de abertura de 36 CRCs, pois 6 CRCs já estavam abertos, o restante corresponde aos custos de transporte dos equipamentos eletroeletrônicos entre os Telecentros, os CRCs e as empresas de destinação final durante o período de quatro anos. O orçamento gasto com abertura de instalações (R\$14.750.000) corresponde a apenas 14% do orçamento anual para a instalação de centros de apoio ao projeto ‘Computadores para a Inclusão’.

No total o modelo abriu trinta e seis CRCs, que somando aos seis já em operação, totalizam quarenta e dois CRCs. O mapa, apresentado na Figura 5.4, mostra a distribuição dos CRCs abertos pelo MCLAM-FR no Brasil. Note que há 33 pontos no mapa, sendo que são 42 os CRCs instalados, isso ocorre porque as cidades de Brasília (DF), São Luiz (MA), Belo Horizonte (MG), Porto Velho (RO), Florianópolis (SC) e São Paulo (SP) possuem dois CRCs abertos. A ainda a cidade do Rio de Janeiro (RJ) que teve a abertura de três CRCs determinada pelo modelo.

Note na figura 5.4 que há uma concentração de CRCs na região sudeste do país, nessa região o modelo prevê a instalação de dezesseis CRCs ao fim do horizonte de planejamento. A segunda região com mais CRCs instalados é a região Nordeste com a metade de unidades, ou seja, oito CRCs. A região Norte conta com sete CRCs, a Centro Oeste com cinco e outros seis restantes estão na região Sul. A distribuição dos CRCs pelo Brasil corresponde o que já era esperado, as regiões com maior número de CRCs são as com cidades de maior população no país, pois neste trabalho foi considerado que os Telecentros recebem material apenas da cidade no qual estão instalados. Das seis maiores cidades brasileiras quatro estão na região sudeste e houve instalação de CRCs em todas elas (São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília e Belo Horizonte), as outras duas cidades estão na região nordeste e também possuem CRCs (Salvador e Fortaleza).

Figura 5.4 Distribuição dos CRCs pelo MCLAM-FR



Fonte - Elaborado pela Autora - *Software Mapsengine*

A Tabela 5.14 apresenta parte dos resultados obtidos pelo modelo MCLAM-FR. As primeiras três colunas identificam os CRCs abertos. As colunas quatro e cinco referem-se à porcentagem de utilização da capacidade de cada instalação aberta, no período em que foi aberta e no final do horizonte de planejamento, respectivamente. A sexta coluna representa os Telecentros Nucleadores que enviam material para os CRCs. Na última coluna temos os Telecentros que recebem computadores recondicionados dos CRCs. Vale ressaltar que esses fluxos de material entre CRCs e Telecentros representadas na Tabela 5.14 ocorrem ao longo de todo o horizonte de planejamento, ou seja, não significa que existem fluxos para todas os Telecentros atendidos em todos os períodos.

Dos CRCs abertos, 6 já estavam em funcionamento, 35 foram abertos no período um, apenas o CRC43 (Teresina) foi aberto no período 37, que equivale ao primeiro mês do terceiro ano do horizonte de planejamento.

Tabela 5.14 Resultados Obtidos pelo MCLAM-FR

CRCs Selecionados para a abertura		Porcentagem de Utilização			Telecentros que enviam material	Telecentros que recebem material retornado
		Abertura	Fim			
AC	Rio Branco	2	11%	19%	1-2-Rio Branco	1-2-Rio Branco
AL	Maceió	4	46%	47%	3-4-Maceió	3-4-Maceió
AM	Macapá	6	21%	22%	5-6-Macapá	5-6-Macapá
BA	Salvador	9	100%	100%	9-Salvador	9-Salvador
CE	Fortaleza	11	45%	100%	10-11-12-13-Fortaleza	10-11-12-1-Fortaleza
DF	Brasília	16	100%	63%	14-15-16-17-Brasília; 18-Vitória	14-15-16-17-Brasília
	Brasília	17	24%	63%	14-15-16-17-Brasília; 18-Vitória	14-15-16-17-Brasília
ES	Vila Velha	19	37%	39%	18-20-Vitória; 19-Vila Velha	18-20-Vitória; 19-Vila Velha
GO	Goiânia	22	63%	64%	21-22-Goiânia	21-22-Goiânia
MA	São Luís	23	100%	51%	10-11-12-Fortaleza; 23-24-São Luís; 35-36-João Pessoa; 43-44-Teresina; 51-52-Natal	23-24-São Luís
	São Luís	24	100%	3%	10-11-12-Fortaleza; 23-24-São Luís; 35-36-João Pessoa; 43-44-Teresina; 51-52-Natal	23-24-São Luís
MT	Cuiabá	25	28%	29%	25-26-Cuiabá	25-26-Cuiabá
MS	Campo Grande	28	39%	40%	27-28-Campo Grande	27-28-Campo Grande
MG	Belo Horizonte	30	100%	100%	29-30-31-Belo Horizonte	29-30-31-Belo Horizonte
	Belo Horizonte	31	16%	17%	29-30-31-Belo Horizonte	29-30-31-Belo Horizonte
	Uberaba	32	16%	17%	32-Uberaba	32-Uberaba
PA	Belém	33	100%	68%	33-34-Belém; 43-44-Teresina	33-34-Belém
PR	Curitiba	38	84%	85%	37-38-Curitiba	37-38-Curitiba
	Foz do Iguaçu	39	15%	15%	39-Foz do Iguaçu	39-Foz do Iguaçu
PE	Recife	40	74%	100%	40-41-42-Recife; 51-52-Natal	35-36-João Pessoa; 40-41-42-Recife; 51-52-Natal
PI	Teresina	43	3%	41%	43-44-Teresina	43-44-Teresina
RJ	Rio de Janeiro	45	100%	100%	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói
	Rio de Janeiro	46	100%	100%	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói
	Iguaçu	48	71%	48%	45-46-Rio de Janeiro; 47-Niterói; 48-Nova Iguaçu; 50-Teresópolis	48-Nova Iguaçu; 50-Teresópolis
	Rio de Janeiro	49	100%	100%	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói	45-46-49-Rio de Janeiro, 47-Niterói
RS	Porto Alegre	53	68%	69%	53-54-Porto Alegre	53-54-Porto Alegre
	São Leopoldo	57	45%	46%	55-Caxias do Sul; 56-Santa Maria; 57-São Leopoldo; 62-63-64-Florianópolis	55-Caxias do Sul; 56-Santa Maria; 57-São Leopoldo

CRCs Selecionados para a abertura	Porcentagem de Utilização		Telecentros que enviam material	Telecentros que recebem material retornado		
	Abertura	Fim				
RO	Porto Velho	58	100%	24%	2-Rio Branco; 7-8-Manaus; 58-59-Porto Velho; 60-Boa Vista	58-59-Porto Velho
	Porto Velho	59	23%	3%	2-Rio Branco; 7-8-Manaus; 58-59-Porto Velho; 60-Boa Vista	58-59-Porto Velho
RR	Boa Vista	60	9%	100%	7-8-Manaus; 60-Boa Vista	7-8-Manaus; 60-61-Boa Vista
SC	Florianópolis	62	100%	100%	62-63-64-Florianópolis	62-Florianópolis
	Florianópolis	63	100%	100%	62-63-64-Florianópolis	62-63-64-Florianópolis
SP	São Paulo	65	100%	100%	65-66-São Paulo	65-66-São Paulo
	São Paulo	66	100%	100%	65-66-São Paulo	65-66-São Paulo
	Campinas	69	62%	63%	69-Campinas; 72-Indaiatuba	69-Campinas; 72-Indaiatuba
	Diadema	70	30%	32%	67-Amparo; 68-Bragança Paulista; 70-Diadema	67-Amparo; 68-Bragança Paulista; 70-Diadema
	Guarulhos	71	59%	60%	71-Guarulhos	71-Guarulhos
	Osasco	73	34%	34%	73-Osasco	73-Osasco
	Piracicaba	74	20%	20%	74-Piracicaba	74-Piracicaba
	Santo André	76	53%	54%	75-Santos; 76-Santo André	75-Santos; 76-Santo André
SE	Aracaju	78	56%	30%	9-Salvador; 77-78-Aracaju	77-78-Aracaju
TO	Palmas	79	13%	14%	79-80-Palmas	43-44-Teresina; 79-80-Palmas

Fonte - Elaborado pela Autora

Note na Tabela 5.14 que algumas cidades, como Brasília, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, etc. receberam mais de um CRC.

Dos CRCs abertos onze devem trabalhar com sua capacidade máxima de processamento, CRC9 (Salvador); CRC23 e CRC24 (São Luiz); CRC33 (Belém); CRC45, CRC46 e CRC49 (Rio de Janeiro); CRC62 e CRC63 (Florianópolis); CRC65 e CRC66 (São Paulo). Ou seja, nestes CRCs ocorre processamento de 1800 Kg de material mensalmente durante todo o horizonte de planejamento.

Em outros seis CRCs a capacidade de processamento utilizada ao longo do horizonte de planejamento deve ser máxima, porém em apenas alguns períodos. Isso ocorre em casos como em Brasília (DF) que foram abertos dois CRCs, que somados processam 2268 kg de material mensal, assim a porcentagem de material processado em cada um deles varia entre 26% e 100%, mas mantendo a taxa constante na soma. Esse comportamento se

repete nas duas unidades de Belo Horizonte (MG) e nas duas unidades de Florianópolis (SC).

Alguns CRCs como por exemplo, o CRC60 (Boa Vista) e o CRC2 (Rio Branco), foram abertos apesar de terem baixa capacidade de operação (inferior a 50%). Isto pode ser explicado pelo fato de estarem, localizados a grandes distâncias rodoviárias dos demais Telecentros. Assim, caso esses CRCs recebessem material de Telecentros distantes, ou os Telecentros dessas localidades enviassem material para outro CRC, acarretaria em um alto custo logístico ao longo do horizonte de planejamento considerado.

Os CRCs selecionados para abertura possuem comportamentos distintos em relação ao recebimento de material dos Telecentros. Por exemplo, o CRC 9 (Salvador) recebe material somente do Telecentro instalado na mesma cidade, isso ocorre pelo fato da quantidade de lixo eletrônico estimado para descarte populacional ser maior que a capacidade de processamento do CRC.

Note na Tabela 5.14 que em algumas cidades existem mais de um CRC. Quando há dois CRCs em uma mesma cidade o comportamento do modelo é como se houvesse apenas um CRC com o dobro da capacidade, ou seja, eles recebem material dos mesmos Telecentros Nucleadores e enviam equipamentos reconicionados aos mesmos Telecentros. Ilustrando essa situação temos o exemplo dos CRC23 e CRC24 em São Luis (MA) que ao longo do horizonte de planejamento recebem material de diversos Telecentros espalhados pela região nordeste do país: 10-11-12-Fortaleza (CE), 23-24-São Luís (MA), 35-36-João Pessoa (PB), 43-44-Teresina (PI) e 51-52-Natal (RN).

Os CRCs 45,46 e 49 (Rio de Janeiro) recebem material dos Telecentros do próprio estado que são: 45, 46 e 49 no Rio de Janeiro; 48 em Nova Iguaçu; 50 em Teresópolis; e, 47 em Niterói. As três unidades instaladas na capital trabalham com toda a sua capacidade, porém isso não é suficiente, assim o CRC48 (Nova Iguaçu) recebe o restante do material oriundo do estado.

A Tabela 5.15 apresenta a porcentagem de ocupação de computadores em cada Telecentro ao longo dos períodos, ou seja, quando a ocupação é de 100% significa que os Telecentros estão trabalhando com sua capacidade máxima de computadores. Nos dois primeiros períodos a taxa de ocupação é mínima (83%, que corresponde a 25 computadores), essa consideração está imposta no MCLAM-FR pela restrição 4.32, assim somente depois desse tempo se inicia o retorno de computadores dos CRCs para os Telecentros (ou seja, tempo de processamento nos CRCs).

Apenas seis Telecentros: 1 e 2 em Rio Branco (AC), 6 em Macapá (AP), 10 em Fortaleza (CE), 74 em Piracicaba (SP) e 77 em Aracaju (SE), mantêm sua capacidade máxima de máquinas durante todo o horizonte de planejamento, todos estão localizados em cidades que possuem CRCs.

Alguns Telecentros como 3 e 4 em Maceió (AL) e 25 em Cuiabá (MT) possuem uma estimativa de geração de lixo eletroeletrônico baixa, assim todo o material reformulado é suficiente apenas para manter uma taxa de ocupação média muito próxima a capacidade mínima estabelecida para o funcionamento dos Telecentros.

Tabela 5.15. Ocupação Média dos Telecentros

Estado	Cidade	Numeração	Ocupação Média do Telecentro			
			Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4
Acre	Rio Branco	1	100%	100%	100%	100%
	Rio Branco	2	83%	100%	100%	100%
Alagoas	Maceió	3	83%	83%	83%	100%
	Maceió	4	83%	83%	83%	100%
Amapá	Macapá	5	83%	83%	83%	100%
	Macapá	6	100%	100%	100%	100%
Amazonas	Manaus	7	83%	100%	93%	83%
	Manaus	8	100%	90%	92%	83%
Bahia	Salvador	9	100%	100%	100%	100%
Ceará	Fortaleza	10	100%	100%	100%	100%
	Fortaleza	11	100%	83%	100%	100%
	Cajazeiras	12	83%	100%	100%	83%
	Fortaleza	13	90%	100%	83%	100%
Distrito Federal	Brasília	14	100%	83%	93%	100%
	Brasília	15	90%	100%	83%	100%
	Brasília	16	100%	100%	100%	100%
	Brasília	17	100%	83%	93%	100%
Espírito Santo	Vitória	18	83%	100%	83%	100%
	Vila Velha	19	100%	93%	100%	100%
	Vitória	20	100%	100%	100%	100%
Goiás	Goiânia	21	100%	90%	100%	100%
	Goiânia	22	83%	83%	83%	100%
Maranhão	São Luís	23	83%	100%	90%	100%
	São Luís	24	83%	100%	100%	100%
Mato Grosso	Cuiabá	25	83%	83%	83%	100%
	Cuiabá	26	83%	83%	83%	100%
Mato Grosso do Sul	Campo Grande	27	100%	83%	83%	100%
	Campo Grande	28	100%	100%	100%	100%
Minas Gerais	Belo Horizonte	29	83%	100%	100%	100%
	Belo Horizonte	30	83%	83%	100%	100%
	Belo Horizonte	31	83%	100%	100%	100%
	Uberaba	32	90%	100%	100%	100%
Pará	Belém	33	100%	100%	100%	100%
	Belém	34	100%	83%	100%	100%
Paraíba	João Pessoa	35	90%	100%	83%	83%
	João Pessoa	36	90%	90%	90%	83%
Paraná	Curitiba	37	83%	83%	83%	100%
	Curitiba	38	100%	100%	100%	100%
	Foz do Iguaçu	39	90%	83%	83%	100%

Estado	Cidade	Numeração	Ocupação Média do Telecentro			
			Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4
Pernambuco	Recife	40	100%	100%	100%	100%
	Recife	41	93%	100%	100%	100%
	Recife	42	83%	83%	100%	100%
Piauí	Teresina	43	100%	100%	100%	83%
	Teresina	44	90%	83%	93%	83%
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	45	100%	100%	100%	100%
	Rio de Janeiro	46	83%	100%	100%	100%
	Niterói	47	100%	100%	83%	83%
	Iguaçu	48	83%	100%	83%	100%
	Rio de Janeiro	49	93%	83%	100%	100%
	Teresópolis	50	90%	100%	100%	83%
Rio Grande do Norte	Natal	51	83%	83%	83%	83%
	Natal	52	83%	100%	90%	83%
Rio Grande do Sul	Porto Alegre	53	83%	83%	83%	100%
	Porto Alegre	54	83%	83%	83%	100%
	Caxias do Sul	55	83%	93%	83%	83%
	Santa Maria	56	83%	93%	83%	83%
	São Leopoldo	57	100%	83%	83%	100%
Rondônia	Porto Velho	58	100%	100%	83%	100%
	Porto Velho	59	83%	83%	90%	100%
Roraima	Boa Vista	60	99%	90%	83%	100%
	Boa Vista	61	83%	83%	83%	100%
Santa Catarina	Florianópolis	62	100%	100%	100%	100%
	Florianópolis	63	100%	100%	100%	100%
	Florianópolis	64	100%	90%	100%	100%
São Paulo	São Paulo	65	93%	83%	93%	100%
	São Paulo	66	83%	83%	83%	100%
	Amparo	67	93%	93%	93%	83%
	Bragança Paulista	68	93%	83%	83%	83%
	Campinas	69	100%	100%	100%	100%
	Diadema	70	83%	83%	90%	100%
	Guarulhos	71	100%	100%	100%	100%
	Indaiatuba	72	83%	93%	93%	83%
	Osasco	73	83%	83%	83%	100%
	Piracicaba	74	100%	100%	100%	100%
	Santos	75	100%	83%	100%	83%
Sergipe	Santo André	76	100%	100%	100%	100%
	Aracaju	77	100%	100%	100%	100%
Tocantins	Aracaju	78	83%	83%	83%	100%
	Palmas	79	100%	83%	93%	100%
	Palmas	80	100%	100%	83%	100%

Fonte-Elaborada pela Autora

Considerando todos os CRCs instalados pelo modelo, 67.6% dos computadores que são recondicionados nos CRCs permanecem nos mesmos para serem encaminhados para doação a outras instituições públicas. Esse comportamento é o correspondente a custos rodoviários para os computadores recondicionados serem encaminhados aos Telecentros superior à penalização do modelo para o material se permanecer no CRC para doação.

Por fim, a Tabela 5.16 apresenta o resultado do modelo MCLAM-FR para a quantidade de material recebido pelas empresas de destinação final. Conforme esperado, como não foram inseridas restrições de capacidade de recebimento de material, a decisão sobre para qual empresa cada CRC envia seus resíduos ficou, simplesmente, em função do menor custo de transporte.

Tabela 5.16. Quantidade (em Kg) de material para a destinação

Empresa		Quantidade média de Material Descartado (KG)
ATIVA Reciclagens de Materias Ltda	2	4843.4
Belmont Trading Comercial Exportadora Ltda	3	4094.7
COOPERMITI - Cooperativa de Produção, Recuperação, Reutilização, Reciclagem e Comercialização de Resíduos Sólidos Eletro-Eletrônicos	4	8468.0
Eletrolixo Logística Reversa Ltda	5	1042.0
Interamerican Ltda	6	339.8
Lorene Importação e Exportação Ltda	7	2920.4
Oxil – Manufatura Reversa / Gerenciamento de Resíduos	8	182.5
Reclicadora Urbana	9	420.5
Reciclo Ambiental Consultoria e Serviços Ltda/Reciclo Metais Com. de Resíduos Sólidos Ltda	10	850.0
Descarte Certo - Gestão de Resíduos Pós Consumo	11	1417.3
Sanlien Exportação Ltda	12	1032.0
SIR Company Comércio e Reciclagem LTDA.	13	1595.8
Sucata Eletrônica	14	434.0
Target Trading S.A	15	1450.8
TCG Brasil Reciclagem Ltda	16	3682.7
UMICORE	17	1521.1
Vertas	18	1483.7
Xerox Comércio e Indústria Ltda	19	493.1

Fonte-Elaborada pela Autora

O total de material processado pela rede é de 2.364.186 Kg, ao longo dos quatro anos de planejamento. Desse material um total de 2.151.410 Kg é processado, ou seja, 91% do material entregue pela comunidade nos Telecentros passa por um processo de

recondicionamento nos CRCs, o restante é encaminhado diretamente as empresas de destinação final. Isso significa que, com o orçamento disponível, é possível abrir um bom número de CRCs, que consegue processar grande parte dos equipamentos descartados. A quantidade de material processado gera 645.423Kg de computadores recondicionados, desse total 47% retornam para os Telecentros.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho aborda a configuração da rede de logística reversa pós-consumo de equipamentos de informática que é necessária para viabilizar o programa ‘Computadores para a Inclusão’. A representação da rede foi elaborada a partir das informações obtidas nos sites do Ministério das Comunicações, Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão, e informações nos relatórios do Governo Federal para a inclusão digital e no projeto intitulado ‘+ Telecentros’, desenvolvido pelo Ministério do Desenvolvimento Social e Combate a Fome e Ministério das Comunicações em parceria com a Universidade Federal de São Carlos.

Primeiramente foi proposto um modelo matemático monopérido (MCLA) para avaliar a localização de novos CRCs e alocação de Telecentros as estes CRCs, considerando apenas o fluxo do material descartado que os Telecentros recebem da comunidade. Este modelo mostrou-se uma ferramenta simples e interessante para avaliar a rede logística do programa, pois avalia o *tradeoff* entre custos de transporte e custos de instalação e mostra que os custos de transporte são significativamente maiores que os custos de instalação, por isso o resultado do modelo propõe uma rede mais descentralizada. Particularmente no caso do programa ‘Computadores para Inclusão’, a descentralização é interessante uma vez que implica na instalação de mais CRCs e isto tem um impacto social relevante.

Um próximo passo no sentido de ampliar o escopo de avaliação do problema foi propor um modelo multipérido (MCLAM). Este modelo aborda as mesmas questões que o modelo MCLA, porém passa a considerar a destinação dos computadores reformulados nos CRCs, que pode retornar para os Telecentros ou ser enviado para as empresas de destinação final. A configuração da rede proposta pelo modelo, mesmo com a consideração de vários períodos e a destinação após o processamento, não teve alterações significativas. No entanto, os resultados demonstraram a necessidade de direcionar o fluxo de retorno e considerar que a demanda nos Telecentros precisa ser atendida. Neste sentido, esse modelo foi importante para o desenvolvimento do trabalho.

Finalmente, foi proposto o modelo MCLAM-FRD que contempla as principais questões envolvidas na configuração da rede logística do programa ‘Computadores para Inclusão’. O modelo trata a natureza dinâmica do problema e, ao mesmo tempo em que propõe um planejamento estratégico para abertura de CRCs nos próximos 4 anos, estabelece os fluxos mensais de equipamentos danificados e reconicionados, considerando a capacidade de processamento e de armazenamento dos CRCs, a demanda mínima e a

quantidade máxima de computadores que pode ter nos Telecentros, bem como a deterioração de materiais. Da mesma forma que nos resultados dos modelos anteriores, a rede proposta por este modelo é bastante descentralizada, pois os custos de transporte são muito maiores que os custos de instalação. Um resultado bastante interessante é que quantidade de computadores que pode ser recondicionada nos CRCs é muito superior à necessidade de equipamento nos Telecentros, sendo que esta quantidade sobressalente pode ser doada para diversas instituições. Isto implica que o papel dos CRCs na rede pode ir além do programa 'Computadores para Inclusão' no sentido de ampliar a inclusão digital, de contribuir para recuperação de valor dos equipamentos e reduzir a quantidade de material descartado.

De forma geral, os modelos propostos mostraram-se ferramentas apropriadas para auxiliar nas decisões de configuração da rede logística pós-consumo de equipamentos de informática do programa 'Computadores para Inclusão'.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

Os desafios e particularidades do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos e os resultados encontrados nesta pesquisa, estimulam a continuidade do desenvolvimento de pesquisas no sentido de melhorar a adequação dos modelos e conseqüentemente a configuração da rede logística.

Uma proposta natural de pesquisa futura consiste na reformulação de algumas considerações acerca da rede do programa ‘Computadores para a Inclusão’. O número de Telecentros considerados neste trabalho (80 nucleadores) quando comparado ao total de Telecentros existente no país (cerca de 2000) é muito pequeno. Isto significa que a rede considerada foi subestimada em relação ao potencial para reaproveitamento dos computadores reconicionados nos CRCs. A maior dificuldade para incorporação de todos os Telecentros está na ausência de fontes de informação oficiais sobre a localização dos mesmos.

Na revisão bibliográfica do Capítulo 3 apresentamos o modelo matemático proposto por Alumur et al. (2012) que consideram a divisão de eletroeletrônicos em componentes e tratam da logística reversa em função destes componentes. A aplicação desta ideia na rede estudada nesse trabalho e o potencial de comercialização dos componentes poderia reduzir os custos de transporte, além de criar receitas importantes para a sustentabilidade econômica do programa.

Considerando a dispersão dos equipamentos de informática pelo país, é necessário um estudo detalhado sobre as formas de coleta de eletroeletrônicos, de forma que possam ser consideradas no modelo questões como o tipo de veículo, a composição de carga, a taxa de ocupação dos veículos, a frequência e rotas de coleta.

Diferentes modos de abertura de CRCs podem ser inseridos no modelo. Nos resultados dos modelos propostos, observamos que em algumas cidades houve a instalação de mais de um CRC. Desta forma, uma proposta de pesquisa futura consiste na incorporação nos modelos da decisão sobre a capacidade dos CRCs a serem abertos, assim como a ampliação da capacidade dos CRCs já instalados.

Observa-se nos resultados dos modelos propostos que em alguns estados brasileiros não é prevista a instalação de nenhum CRC. Como o programa ‘Computadores para a Inclusão’ tem grande relevância social, seria interessante a realização de experimentos impondo a abertura de pelo menos um CRC por estado.

Nos resultados do modelo MCLAM-FRD nota-se que a maior parte dos computadores recondicionados não é destinada a Telecentros, mas deve ser doada para escolas, bibliotecas e outras instituições públicas. Uma perspectiva futura é incluir a localização destas instalações para avaliar o impacto na configuração da rede.

Referências Bibliográficas

ACHILLAS, C. et al. A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 76–84, set. 2012.

ALUMUR, S. A. et al. Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n. 1, p. 67–78, jul. 2012.

BAGGIO, R. A sociedade da informação ea infoexclusão. **Ciência da Informação**, v. 29, n. 2, p. 16–21, 2000.

BARROS, A. I.; DEKKER, R.; SCHOLTEN, V. A two-level network for recycling sand: A case study. **European Journal of Operational Research**, v. 110, n. 2, p. 199–214, out. 1998.

BARTHOLOMEU, D. B.; CAIXETA-FILHO, J. V. **Logística Ambiental de Resíduos Sólidos**. 1^o. ed. São Paulo: Atlas, 2011. p. 264

BEAMON, B. M. Measuring supply chain performance. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 3, p. 275–292, 1999.

BRASIL. Casa Civil. **Lei 12305 de 2 de Agosto de 2010**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 de Nov 2012.

CEMPRE. **Cempre- Compromisso Empresarial para a Reciclagem**. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br/>>. Acesso em: 10 de Nov 2012

CONCEIÇÃO, R. D. P. DA;; PACHECO, E. B. A. V. A IMPLEMENTAÇÃO DA LOGÍSTICA REVERSA NAS ORGANIZAÇÕES MEDIANTE A APLICAÇÃO DO CONCEITO DE REDES INTERORGANIZACIONAIS. **Gestão & Sociedade**, p. 1–13, 2012.

CRUZ-RIVERA, R.; ERTEL, J. Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 3, p. 930–939, 2009.

DASKIN, M. S. **Network and Discret Location: Models, Algorithms and Applications**. [s.l.] A Wiley-Interscience Publication, 1995. p. 498

DEKKER, R.; BLOEMHOF, J.; MALLIDIS, I. Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 3, p. 671–679, jun. 2012.

DEMIREL, N. Ö.; GÖKÇEN, H. A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 11-12, p. 1197–1206, 29 jan. 2008.

DEMO, P. Inclusão digital – cada vez mais no centro da inclusão social. **Inclusão Social**, v. 1, n. 1, p. 36–38, 2005.

DU, F.; EVANS, G. W. A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 8, p. 2617–2634, 2008.

EASP. **Escola de Administração de Empresas de São Paulo/ Fundação Getúlio Vargas**. Disponível em: <http://easp.fgvsp.br/>. Acesso em: 10 de Jul 2013.

ELTAYEB, T. K.; ZAILANI, S.; RAMAYAH, T. Resources , Conservation and Recycling Green supply chain initiatives among certified companies in Malaysia and environmental sustainability : Investigating the outcomes. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 55, n. 5, p. 495–506, 2011.

E-Waste. Disponível em: <<http://svtc.org/our-work/e-waste/>>.

FLEISCHMANN, M. et al. Quantitative models for reverse logistics: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 103, n. 1, p. 1–17, nov. 1997.

FLEISCHMANN, M. et al. A characterisation of logistics networks for product recovery. **Omega**, v. 28, n. 6, p. 653–666, dez. 2000.

FLEISCHMANN, M. et al. THE IMPACT OF PRODUCT RECOVERY ON LOGISTICS NETWORK DESIGN. **PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT**, v. 10, n. 2, p. 156–173, 2001.

GOOSEY, M. End-of-life electronics legislation – an industry perspective. **CIRCUIT WORLD**, v. 30, n. 2, p. 41–45, 2004.

GUARNIERI, P.; OLIVEIRA, I.L.; STADLER, C.C.; KOVALESKI, J. . **A logística reversa de pós-venda e pós-consumo agregando valor econômico, legal e ecológico às empresas** Congresso de Administração e 4º Congresso Sul Brasileiro de Comércio Exterior. **Anais...**2005 Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/31989173/A-caracterizacao-da-logistica-reversa-de-posvenda-e-posconsumo-agregando-valor-economico-legal-e-ecologico>>. Acesso em: 10 de Fev 2013.

HOSHINO, T., YURA, K. AND HITOMI, K. No TOptimization analysis for recycle-oriented manufacturing systems. **INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH** *title*, v. 33, n. 9, p. 2069–2078, 2005.

HUA-DONG, G. A. N. Location Selection of Recycle Center by Combining AHP and DEA Methodologies. **International Conference on IEEE.**, v. 2, n. 2008, p. 884–888, 2010.

JAYARAMAN, V.; PATTERSON, R. A; ROLLAND, E. The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. **European Journal of Operational Research**, v. 150, n. 1, p. 128–149, out. 2003.

JAYARAMAN, V.; ROSS, A. A simulated annealing methodology to distribution network design and management. **European Journal of Operational Research**, v. 144, n. 3, p. 629–645, 2003.

JINGBO, Y. The Coordinate Study of Reverse Logistics and Green Supply Chain, **School of Economics and management Wuhan University**, n. 430072, p. 763-767, 2006.

KO, H. J.; EVANS, G. W. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward / reverse logistics network for 3PLs. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 346–366, 2007.

KUEHR, R., WILLIAMS, E. **Computers and the environment – understanding and managing their impacts**. 1º. ed. [s.l.] KLUWER ACADEMIC, 2003. p. 300

LACERDA, L. **Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Disponível em:

<<http://www.ecodesenvolvimento.org/biblioteca/artigos/logistica-reversa-uma-visao-sobre-os-conceitos>>. Acesso em: 26 ago. 2013.

LAMBERT, S.; RIOPEL, D.; ABDUL-KADER, W. A reverse logistics decisions conceptual framework. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 3, p. 561–581, out. 2011.

LEE, D.-H.; DONG, M. A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 3, p. 455–474, maio 2008.

LEITE, P. R. LOGÍSTICA REVERSA: NOVA ÁREA DA LOGÍSTICA EMPRESARIAL. **REVISTA TECNOLÓGICA**, p. 1–6, maio 2002.

LIECKENS, K.; VANDAELE, N. Reverse logistics network design with stochastic lead times. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 395–416, 2007.

LISTES, O. A generic stochastic model for supply-and-return network design. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 417–442, 2007.

LISTEŞ, O.; DEKKER, R. A stochastic approach to a case study for product recovery network design. **European Journal of Operational Research**, v. 160, n. 1, p. 268–287, jan. 2005.

LORENA, G. DE; CHAVES, D. OS CONSUMIDORES VALORIZAM A COLETA DE EMBALAGENS RECICLÁVEIS ? UM ESTUDO DE CASO DA LOGÍSTICA REVERSA EM UMA REDE DE HIPERMERCADOS. **GESTÃO & PRODUÇÃO**, v. 13, n. 3, p. 423–434, 2006.

LORENA, L. A. N. et al. Integração de modelos de localização a sistemas de informações geográficas. **GESTÃO & PRODUÇÃO**, v. 8, n. 2, p. 180–195, 2001.

LU, Z.; BOSTEL, N. A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 299–323, fev. 2007.

- MALLIDIS, I.; DEKKER, R.; VLACHOS, D. Greening Supply Chains: Impact On Cost And Design. **Report Econometric Institute**, v39, p. 1–20, 2010.
- MELKOTE, S.; DASKIN, M. S. Capacitated facility location / network design problems. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 3, p. 481–495, 2001.
- MIGUEZ, E. **Logística Reversa de Produtos Eletrônicos: Benefícios Ambientais e Financeiros**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- MIN, H.; JEUNG, H.; SEONG, C. The spatial and temporal consolidation of returned products in a closed-loop supply chain network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 51, n. 2, p. 309–320, 2006a.
- MIN, H.; JEUNG, H.; SEONG, C. A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. **Omega**, v. 34, n. 1, p. 56–69, 2006b.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**, 2º edição, Campus, Capítulo 8, pg 169-186, 2012.
- OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 111, n. 3, p. 423–447, dez. 1998.
- POKHAREL, S.; MUTHA, A. Perspectives in reverse logistics: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 4, p. 175–182, fev. 2009.
- RAVI, V.; SHANKAR, R.; TIWARI, M. K. Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n. 2, p. 327–356, mar. 2005.
- SALEMA, M. I. G.; BARBOSA-POVOA, A. P.; NOVAIS, A. Q. An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 3, p. 1063–1077, jun. 2007.
- SARKIS, J. A strategic decision framework for green supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 11, n. 4, p. 397–409, jun. 2003.

- SARKIS, J.; ZHU, Q.; LAI, K. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. **International Journal of Production Economics**, v. 130, n. 1, p. 1–15, mar. 2011.
- SAVASKAN, R. C.; BHATTACHARYA, S.; VAN WASSENHOVE, L. N. Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing. **Management Science**, v. 50, n. 2, p. 239–252, fev. 2004.
- SBIHI, A.; EGGLESE, R. W. Combinatorial optimization and Green Logistics. **Annals of Operations Research**, v. 175, n. 1, p. 159–175, 31 out. 2009.
- SCHULTMANN, F.; ENGELS, B.; RENTZ, O. Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries. **Interfaces INFORMS**, v. 33, n. 6, p. 57–71, 2003.
- SCHWARZELMÜLLER, A. F. **INCLUSÃO DIGITAL: UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA** CINFOM: Encontro Nacional de Ciência da Informação, 2000
- SEITZ, M. A. A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 11-12, p. 1147–1157, 2007.
- SILVEIRA, S. A. **Inclusão digital, software livre e globalização contra-hegemônica** Seminários temáticos para a 3ª Conferência Nacional de C,T&I. **Anais...**2005
- SRIVASTAVA, S. K. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 9, n. 1, p. 53–80, mar. 2007.
- TIAN, Z. Strategy of Recycling Waste Resource with Governmental Incentives and Funds. **2011 International Conference of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences**, p. 113–116, set. 2011.
- VITASEK, K. (2013). **Glossary Supply Chain Management** council Of Logistics Management. Disponível em: <http://cscmp.org/resources-research/glossary-terms>, Acesso em: 10 de Nov 2012.
- ZHANG, Y. M.; HUANG, G. H.; HE, L. An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 3, p. 522–30, mar. 2011.

ZHU, Q.; COTE, R. P. Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group. **Journal of Cleaner Production**, v. 12, n. 8-10, p. 1025–1035, 2004.

Apêndice

1. Empresas Recicladoras

Tabela 0.1- Localização da Empresas recicladoras

Empresa Recicladora	Numeração	Cidade
Indústria e Comércio Fox de Reciclagem e Proteção ao Clima	1	Cabreúva/SP
ATIVA Reciclagens de Materias Ltda	2	Guarulhos/SP
Belmont Trading Comercial Exportadora Ltda	3	Campinas - SP
COOPERMITI - Cooperativa de Produção, Recuperação, Reutilização, Reciclagem e Comercialização de Resíduos Sólidos Eletro-Eletrônicos	4	São Paulo / SP
Eletrolixo Logística Reversa Ltda	5	Bauru/SP
Interamerican Ltda	6	São Bernardo do Campo / SP
Lorene Importação e Exportação Ltda	7	São Paulo / SP
Oxil – Manufatura Reversa / Gerenciamento de Resíduos	8	Paulínia / SP
Recicadora Urbana	9	Jacareí/ SP.
Reciclo Ambiental Consultoria e Serviços Ltda	10	São Paulo, SP.
Reciclo Metais Com. de Resíduos Sólidos Ltda		
Descarte Certo - Gestão de Resíduos Pós Consumo	11	São Paulo, SP.
Sanlien Exportação Ltda	12	São Paulo, SP.
SIR Company Comércio e Reciclagem LTDA.	13	São Paulo, SP.
Sucata Eletrônica	14	São Paulo, SP.
Target Trading S.A	15	São Paulo, SP.
TCG Brasil Reciclagem Ltda	16	Americana/SP
UMICORE	17	Guarulhos / SP
Vertas	18	Mauá SP
Xerox Comércio e Indústria Ltda	19	São Paulo, SP.

Fonte - Elaborado pela Autora