



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção
Campus João Monlevade



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DISCRETAS DE
INVESTIMENTO EM UMA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE
MATERIAIS ELETRÔNICOS**

ELISA REIS DE MELLO PINTO SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

Julho, 2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção
Campus João Monlevade



ELISA REIS DE MELLO PINTO SILVA

**UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DISCRETAS DE
INVESTIMENTO EM UMA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE
MATERIAIS ELETRÔNICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Dra. Mônica do Amaral

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE

2016



Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por toda a saúde e coragem para enfrentar tantos desafios.

A minha família que, mesmo de longe, sempre se fez presente em todos os momentos vividos.

A minha professora, supervisora de projeto e querida orientadora de monografia, Mônica do Amaral, pelo suporte e incentivo, sem os quais não seria possível continuar.

Aos meus amigos e colegas que fizeram deste tempo na Universidade, um tempo mais fácil de passar.

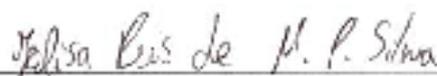
E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação, o meu muito obrigada.

TERMO DE RESPONSABILIDADE

Curso Engenharia de Produção

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Um modelo para avaliação de alternativas discretas de investimento em uma rede de logística reversa de materiais eletrônicos" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico, código fonte de programa ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem as devidas referências ou consentimento dos referidos autores.

João Montevade, 27 de Julho de 2015



Elisa Reis de Mello Pinto Silva



ATA DE DEFESA

Aos 27 dias do mês de julho de 2016, às 13 horas e trinta minutos, na sala B102 deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pela aluna **Elisa Reis de Mello Pinto Silva**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores **Alexandre Xavier Martins**, **Mônica do Amaral** e **Thiago Augusto de Oliveira Silva**. A aluna apresentou o trabalho intitulado "UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS DISCRETAS DE INVESTIMENTO EM UMA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE MATERIAIS ELETRÔNICOS". A comissão examinadora deliberou pela

Aprovação

Aprovação com Ressalva - Prazo concedido para as correções: _____

Reprovação com Ressalva - Prazo para marcação da nova banca: _____

Reprovação da aluna.

com **nota 10,0 (dez vírgula zero)**.

Na forma regulamentar e seguindo as determinações da resolução COEP12/2015 foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pela aluna.

João Monlevade, 27 de julho de 2016.

Mônica do Amaral - Professora Orientadora

Alexandre Xavier Martins - Convidado

Thiago Augusto de Oliveira Silva - Convidado

Elisa Reis de Mello Pinto Silva - Candidata



RESUMO

O programa "Computadores para Inclusão" é fruto de parcerias firmadas entre o Governo Federal, instituições públicas e privadas, tendo como objetivo atender à população com cursos de inclusão digital, oferecer formação profissional relacionada à manutenção de computadores e recolher computadores após o seu ciclo de consumo. Para disponibilizar esses serviços, o referido projeto conta com uma rede de logística reversa, que abrange todo o Brasil, sendo formada por TCs nucleadores, onde são recolhidos os computadores usados doados pela população e oferecidos cursos de inclusão digital; os Centros de Recondicionamento de Computadores, que oferecem cursos profissionalizantes, e onde os computadores usados, após seu ciclo de consumo, são desmontados, recondicionados, testados e o material restante é separado. Um conjunto de empresas recicladoras recebe o material reaproveitável e os próprios Telecentros (TCs), além de escolas e bibliotecas, dentre outras possibilidades, recebem os computadores recondicionados. Para planejar expansões nessa rede, foi criado um modelo de otimização, por meio de um projeto de extensão, voltado à localização de novos Centros de Recondicionamentos de Computadores (CRCs) com custos fixos, múltiplos níveis e múltiplos períodos de planejamento, que apresenta grande complexidade computacional. Diante desse contexto, o presente trabalho procurou, primeiramente, reformular esse modelo, considerando-se uma estrutura de fluxos em redes, com apenas um nível, para a redução de porte e complexidade computacional. Além disso, uma formulação adicional foi proposta, com maior nível de representação da realidade, considerando, por exemplo, a avaliação de alternativas discretas de investimento, a possibilidade de aproveitamento direto de computadores nos TCs e a definição de demandas por doação com possibilidade de entrega em atraso. Experimentos computacionais foram usados para demonstrar a coerência dos modelos e as diferenças estruturais, de porte e de auxílio à tomada de decisões ente eles.

Palavras-chave: Logística Reversa. Fluxos em rede. Alternativas discretas de investimento.



ABSTRACT

The program "Computers for Inclusion" is the result of a partnerships between the federal government, public and private institutions, with the purpose to offer to the people digital inclusion programs, providing courses related to maintenance of computers and collect computers after your cycle consumption. To provide these services, this project has a reverse logistics network that covers all of Brazil, formed by TCs nucleation where used computers donated by the population are collected and where digital inclusion courses are offered. The Computer Reconditioning Centers also offer professional courses, and is where computers out of use are disassembled, refurbished, tested, and the remaining material is separated. A group of recycling companies receive the reusable materials and the TCs, some schools and libraries, among other possibilities, receive the refurbished computers. To plan the expansions on this network, an optimization model was created based on an extension project, aimed at finding new Computer reconditioning centers with fixed costs, multiple levels and multiple planning periods, which presents great computational complexity. In this context, the present study focus first in reformulate this model, considering one structure network flows, with only one level for the size reduction and the computational complexity of the model Oliveira (2014). Moreover, an additional formulation was proposed with higher representation of the reality considering, for example, evaluating discrete investment alternatives, the possibility of the direct use of computers in the TCs and defining demands for donation with the possibility of overdue delivery. Computational experiments were used to demonstrate the consistency of the models and the structural differences of size and aid to decision-making between them.

Keywords: Reverse Logistics. Network flows. Discrete alternative investment.



Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Funcionamento da rede logística do projeto 'Computadores para a Inclusão' | 13 |
| Figura 2. Processo simplificado da abordagem de solução de um problema por modelagem matemática | 22 |
| Figura 3. Rede de Logística Reversa Hipotética para o programa “Computadores para Inclusão” | 51 |



Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Quantidade de computadores enviados ao CRC1 | 52 |
| Tabela 2. Quantidade de computadores que CRC1 envia para | 52 |
| Tabela 3. Quantidade de computadores no TC (v_{it}) | 53 |
| Tabela 4. Quantidade de computadores enviados ao CRC1 | 54 |
| Tabela 5. Quantidade de computadores CRC1 envia para | 54 |
| Tabela 6. Quantidade de computadores no TC (e_{jt}) | 55 |
| Tabela 7. Comparação entre o Modelo de Oliveira (2014) e o modelo de fluxo em redes | 55 |
| Tabela 8. Chegada de material no CRCs e nos TCs | 57 |
| Tabela 9. Fluxo de material processado do CRC1 | 57 |
| Tabela 10. Fluxo de material processado do CRC2 | 57 |
| Tabela 11. Total de material processado e não processado no CRC1 | 58 |
| Tabela 12. Total de material Processado e não Processado no CRC2 | 58 |
| Tabela 13. Quantidade de computadores no TC (e_{jt}) | 59 |
| Tabela 14. Quantidades de computadores que faltam ser entregues para doação (z_{jt}) .. | 59 |
| Tabela 15. Cidades que possuem TCs e CRCs na região Sudeste | 61 |
| Tabela 16. Funcionamento de um CRC na região Sudeste | 62 |
| Tabela 17. Dados dos TCs da região Sudeste | 63 |
| Tabela 18. CRCs selecionados para abertura e custo dos mesmos | 65 |
| Tabela 19. Fluxo de materiais dos TCs aos CRCs | 65 |
| Tabela 20. Fluxos de material entre os CRCs, Recicladoras e TCs | 66 |
| Tabela 19. GAPs para o modelo de Oliveira (2014) | 66 |



Lista de Quadros

| | |
|---|---|
| Quadro 1. Diferenças entre logística direta e reversa..... | 8 |
|---|---|



Sumário

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Problema de Pesquisa | 3 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 3 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 1.3 Justificativa..... | 4 |
| 1.4 Estrutura do Trabalho | 4 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 6 |
| 2.1 Logística reversa..... | 6 |
| 2.2 Trabalhos anteriores | 8 |
| 2.3 Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multiperíodo com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)..... | 11 |
| 2.4 Perspectivas de Desenvolvimento na Área..... | 18 |
| 3 METODOLOGIA DE PESQUISA | 20 |
| 4 Localização de CRCs no projeto "Computadores para a Inclusão" | 23 |
| 4.1 Modelagem baseada em fluxos em redes multiperíodo..... | 24 |
| 4.2 Análise do modelo de Oliveira (2014) | 29 |
| 4.3 Comparação da reformulação proposta com o modelo de Oliveira (2014)..... | 37 |
| 4.4 Extensões propostas para a reformulação baseada em fluxos em redes..... | 41 |
| 4.4.1 Modelo para avaliação de alternativas discretas de investimento | 44 |
| 5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS..... | 50 |
| 5.1 Experimentos com Dados Ilustrativos | 50 |
| 5.1.1 Resultados de Oliveira (2014) | 51 |
| 5.1.2 Resultado do modelo de fluxo em redes..... | 53 |
| 5.1.3 Modelo de fluxo em redes com avaliação de alternativas discretas | 56 |
| O modelo de fluxo em redes com avaliação de alternativas discretas cumpre todas as adaptações propostas e se torna um modelo bem mais próximo à realidade que o modelo de Oliveira (2014)..... | 59 |
| 5.2 Coleta e Análise de Dados para o Projeto Computadores para Inclusão | 59 |
| 5.3 Testes com Instâncias Realistas do modelo de fluxo em redes | 63 |
| 5.4 Testes com Instâncias Realistas do modelo de Oliveira..... | 64 |



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Colegiado do Curso de Engenharia de Produção
Campus João Monlevade



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

| | | |
|---|----------------------------------|----|
| 6 | CONCLUSÃO | 69 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |



1. INTRODUÇÃO

Em um mercado cada vez mais competitivo, há uma rápida evolução tecnológica, com melhorias e novas versões dos produtos eletrônicos, que faz com que a velocidade de obsolescência aumente com o passar dos anos. O ciclo de vida de computadores, celulares, *tablets* e demais equipamentos eletrônicos de uso pessoal está mais curto, pois o mercado exige que os mesmos evoluam. Mudanças nos sistemas operacionais, *softwares* e até mesmo no *design*, podem fazer com que os usuários façam a troca mais rápida de seus antigos dispositivos. Um incentivo maior é quando as empresas aceitam o aparelho usado na troca por um modelo mais novo, produzindo mais resíduos de equipamentos eletrônicos e sem lugar para descartá-los, podem se acumular nas lojas.

Um desafio para as empresas de tecnologia é o retorno apropriado para esses produtos. Essa preocupação pode estar relacionada ao cuidado com o meio ambiente ou, simplesmente, pela pressão feita pelos consumidores ou entidades governamentais, que aplicam pesadas multas no caso de danos ambientais causados pelo descarte incorreto desses equipamentos.

Em 2010, foi criada a Lei nº 12305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, esclarecendo e colocando em vigor normas para o gerenciamento desses produtos, incluindo os perigosos. Segundo Brasil (2010), o artigo 33 da referida lei determina que pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos, são responsáveis por desenvolver ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos.

Segundo a ONU, em 2014, o Brasil produziu 1,4 milhões de toneladas de lixo eletrônico, uma quantidade que deverá aumentar para 2,2 bilhões de toneladas até 2025. Mesmo com a lei em vigor, ainda há muitas empresas que não descartam seus produtos devidamente. Quando ocorre o descarte de lixo eletrônico no lixo comum podem haver muitos riscos, pois este contém metais tóxicos. Um computador comum pode



conter chumbo, cádmio, berílio e mercúrio e contaminar o solo onde foi despejado, chegando até o lençol freático, o que contamina a água e pode ser levar à contaminação das pessoas que tiverem contato com esta água. Apesar destes metais pesados, segundo o estudo “Diretrizes para Estratégias Nacionais de Gestão de Resíduos: Dos Desafios às Oportunidades” do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em conjunto com o Instituto das Nações Unidas para Formação e Pesquisa (UNITAR), também são encontrados nos equipamentos eletrônicos uma quantidade significativa de ouro. Além dos outros componentes como cobre, alumínio e metais raros que também podem ser reutilizados.

Existem muitos projetos que visam a reciclagem, reutilização e reaproveitamento dos eletrônicos. Segundo o Ministério das Comunicações (2015), em 2004 foi criado o projeto ‘Computadores para a Inclusão’, que gerencia uma rede nacional de reaproveitamento de equipamentos de informática, formação profissional e inclusão digital. Aconteceu uma parceria do Governo Federal com outras empresas para levar tecnologia à comunidade. Órgãos públicos, empresas e cidadãos podem doar seus equipamentos usados aos Centros de Recondicionamento de Computadores (CRCs). Os aprendizes do projeto vão, na prática a testar, consertar, limpar, configurar e embalar as máquinas.

Os computadores prontos são doados a Telecentros (TCs), bibliotecas e escolas públicas de todo o país. Desde o início do programa, já foram formados 3,9 mil jovens aprendizes de baixa renda e 13,8 mil computadores foram recondicionados. O programa deseja ampliar o número de CRCs no país, permitindo que sejam criados mais TCs comunitários e que mais escolas, bibliotecas e projetos sociais ligados a inclusão digital sejam contemplados com computadores. Uma das alternativas visadas pelo governo é que os próprios TCs recebam os computadores. Para que isso ocorra, deve haver uma reformulação da disposição e quantidade dos CRCs, que devem dar uma destinação adequada aos equipamentos eletrônicos pós-consumo.



1.1 Problema de Pesquisa

O presente trabalho busca modificar o modelo de locação-alocação multiperíodo com fluxo de retorno direcionado, proposto por Oliveira (2014), para permitir a avaliação de alternativas discretas de investimento. O modelo deve ser aplicado ao projeto ‘Computadores para a Inclusão’, permitindo a comparação de diferentes cenários para ampliação da rede de logística reversa para aproveitamento de computadores usados que são doados ao projeto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é propor uma formulação alternativa de menor complexidade computacional e a inclusão de novas restrições, que pudessem aumentar o grau de realismo da rede de logística reversa de computadores pós-consumo do programa “Computadores para a Inclusão”, utilizando o como base o trabalho de Oliveira (2014).

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho incluem:

- Estudar o modelo capacitado do locação-alocação multiperíodo com fluxo de retorno direcionado, proposto por Oliveira (2014);
- Propor um novo modelo para o problema, baseado em uma formulação de fluxos em redes, com o propósito de redução do seu porte, especialmente no que diz respeito ao número de variáveis binárias do problema;



- Adaptar o modelo, de modo a incluir a avaliação de alternativas discretas de novos CRCs ou a ampliação de CRCs já instalados;
- Incluir novas restrições mais realistas ao modelo para avaliação de alternativas discretas de investimento, como considerações de demanda, entrega de computadores doados, com possibilidade de entrega em atraso, e o reaproveitamento direto de computadores nos próprios TCs;
- Realizar experimentos computacionais e análises de cenários, com o propósito de verificar a coerência dos modelos e as diferenças estruturais, de porte e de auxílio à tomada de decisões ente eles.

1.3 Justificativa

O fato da Logística Reversa ser muito importante para as empresas e o crescente interesse acadêmico pelo assunto, fez com que o tema fosse escolhido. No caso, o desenvolvimento deste projeto pode ajudar a melhorar e aperfeiçoar o trabalho já mencionado, pois a problemática é dinâmica, e seus parâmetros e até mesmo suas restrições variam ao longo do tempo. Um bom resultado neste trabalho pode ajudar o governo na decisão de abertura de novos TCs, determinando onde abri-los e com que capacidade. Do ponto de vista de modelagem matemática, o problema consiste na localização e alocação das instalações para a configuração de uma rede logística. A rede é composta por pontos de coleta (TCs), pontos de armazenamento e processamento (CRCs) e por empresas responsáveis pelo descarte ambientalmente correto (OLIVEIRA, 2014).

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada, que aborda a definição de logística, tanto a direta como a



reversa, os trabalhos já existentes na área e o modelo capacitado de locação-alocação multiperíodo com fluxo de retorno direcionado (MCLAM-FRD), que é o modelo utilizado como base para este trabalho, além de algumas perspectivas de desenvolvimento para a área. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento.

O Capítulo 4 é dedicado às etapas de adaptação e extensão do modelo de Oliveira (2014). Primeiramente, o problema é reformulado com uma estrutura de fluxos em redes em um único nível e múltiplos períodos de planejamento. Em seguida, os dois modelos são comparados, com especial enfoque na caracterização do porte das formulações, uma vez que os modelos são considerados NP-difíceis. Também são feitas análises relativas à conservação de material na rede e análises ao longo dos períodos de planejamento. Em seguida, um novo modelo mais abrangente é apresentado, considerando a possibilidade de avaliação simultânea de alternativas discretas de investimento, as demandas nos TCs e entregas em atraso de computadores para doação e a possibilidade de uso direto dos computadores doados pela comunidade nos TCs.

O Capítulo 5 é constituído dos experimentos computacionais, com experimentos com dados ilustrativos e seus resultados comentados. Além desses, são apresentados alguns testes realizados com dados mais realistas, principalmente evidenciando as diferenças de porte entre a formulação de Oliveira (2014) e os modelos propostos. Por fim, o Capítulo 6 encerra o trabalho, com as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.



2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Logística reversa

O conceito de Logística reversa não está completamente definido, por ser um tema novo. Mas com a crescente procura tanto por empresas, como no meio acadêmico, já existem algumas definições. Leite (2009) tem uma das definições mais aceitas sobre a logística reversa, ele a entende como sendo uma área da logística empresarial responsável pelo fluxo e informações do retorno dos bens de pós-venda e pós-consumo ao seu destino final. Ele é feito pelos canais de distribuições reversos, onde os bens podem ter valor agregado, do ponto de vista econômico, ecológico, legal e até mesmo melhorar a imagem da empresa.

A logística reversa de pós-consumo trata dos bens que já estão no final de sua vida útil, e também dos bens que mesmo já sendo usados, existe a possibilidade de reutilização, embalagens, *palletes* e dos resíduos industriais. (PAOLESCI, 2009).

No capítulo II, Art. 3º da Lei de Política Nacional de Resíduos Sólidos a Logística reversa é definida como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A logística reversa ganha seu espaço quando as empresas percebem que ao implantá-la terão um ótimo retorno, podendo ser financeiro, de *marketing* positivo, valendo o investimento necessário. No caso de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), estes chegam a ter mais de 60 elementos químicos diferentes, que se coletados adequadamente e processados podem gerar muitos lucros as empresas. Outros benefícios, de acordo com a ONUBR (2013), são a redução da emissão de



dióxido de carbono e dióxido de enxofre, aumento na geração de emprego e redução do desperdício de alimentos e poluição do ar.

Segundo a ABINEE (2016) (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica) a Superintendência-Geral do Conselho Administrativo de Defesa Econômica (SG/CADE) aprovou a criação de gestora de logística reversa para produtos elétricos e eletrônicos. Ela tem como objetivo dar suporte no quesito atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos, como gestão e contratação de serviços de logística reversa de produtos eletroeletrônicos fabricados pelas empresas que tiverem o interesse de se associar. A ABINEE (2015) informa que os critérios de admissão na futura gestora serão objetivos e não discriminatórios. Mostrando a importância que a logística reversa vem ganhando através dos anos.

Segundo Leite (2009), há muitos ganhos de competitividade do fabricante por meio da logística reversa no retorno de produtos pós consumo, como o reaproveitamento dos componentes, de materiais constituintes, adequação fiscal e até mesmo a demonstração de responsabilidade empresarial, que melhora a imagem corporativa.

A Logística tem dois fluxos, o reverso, já mencionado, e o direto. A logística é uma das atividades mais antigas utilizadas pela humanidade, já que sua principal função é deixar disponível bens e serviços, no local, no tempo, nas quantidades e na qualidade necessários aos utilizadores. A logística se tornou uma atividade empresarial depois da Segunda Guerra Mundial, na qual ficou evidenciada a necessidade como suporte às novas tecnologias produtivas em empresas industriais (LEITE, 2009).

A definição encontrada no *Supply Chain Management Definitions and Glossary*, a logística é a parte da cadeia responsável por planejar, implementar e controlar o fluxo e a armazenagem dos bens, serviços e das informações entre o ponto inicial e onde estes itens que serão consumidos, ou seja, o consumidor final, com a intenção de satisfazer as exigências destes (CSCMP, 2016).

Segundo Ballou (1993), a meta dos serviços logísticos é entregar corretamente bens ou serviços ao cliente, de forma a estar no lugar certo, no tempo certo, com o menor custo para a empresa.



A logística empresarial, com o propósito de gerar um custo razoável e níveis de serviço adequados aos clientes, ainda engloba o estudo e a definição dos fluxos de informações que movimentam os produtos (DONATO, 2010).

As diferenças entre o fluxo direto e o fluxo reverso dos produtos é facilmente notada. Essas diferenças estão exemplificadas no Quadro 1.

Quadro 1. Diferenças entre logística direta e reversa

| LOGÍSTICA DIRETA | LOGÍSTICA REVERSA |
|---|--|
| Clareza da estrutura para elaboração de previsões de demanda | Dificuldade de utilização de técnicas para estimar a demanda |
| Geralmente o transporte vai de um ponto a muitos pontos | Transporte de muitos pontos a um ponto |
| Qualidade dos itens movimentados tende a ser uniforme | Qualidade dos itens movimentados não é uniforme |
| Preço dos itens movimentados tende a ser uniforme | Preço dos itens movimentados não é uniforme |
| Custos claros e monitoramento por sistemas de contabilidade | Custos menos visíveis e poucas vezes contabilizados |
| Métodos de <i>marketing</i> bem conhecidos | Métodos de <i>marketing</i> mais complexos |
| Tem uma origem, ou poucas, e vai para vários pontos de distribuição | Diversas origens e vai para um ponto de coleta |
| Produto uniforme | Produto não uniforme |

Fonte: Adaptado de (HERNÁNDEZ, 2011 apud TIBBEN-LEMBKE; RORGER, 2002, p. 34).

2.2 Trabalhos anteriores

Existem na literatura diversos trabalhos relacionados à logística reversa e voltados à coleta, reciclagem e reuso de resíduos sólidos. Sarkis, Zhu e Lai (2011), por exemplo, fizeram um *survey* na China, entrevistando membros de 89 empresas automobilísticas, em que foram analisadas as pressões e direcionamentos, ou



motivadores, iniciativas e desempenho da gestão da cadeia de suprimentos automobilística. Os aspectos abordados são referentes a indicadores de desempenho ambiental e operacional nessas empresas.

Os resultados mostraram que a indústria automobilística chinesa vive um alto e acelerado aumento das normas que regulam a eficiência ecológica (*GREEN CHAIN*) do setor, além das próprias pressões do mercado. Simultaneamente, ocorre também uma forte pressão interna para adoção de tais práticas. Apesar de toda essa pressão, na prática, os resultados ainda se mostram incipientes em relação à melhoria de indicadores ambientais e de desempenho operacional, não resultando, também, em melhorias econômicas significativas.

Em relação à modelagem de cadeias de suprimento reversa, pode-se destacar o trabalho de Zhang, Huang e He (2011), que propuseram um modelo inexato para a logística reversa de lixo municipal (IRWM). O termo inexato no trabalho se refere ao uso de intervalos para quantificar incertezas no processo de otimização e solução do IRWM. Funções decomponíveis por partes foram utilizadas para representar os intervalos para os limites da incerteza, que foram considerados na função objetivo e nas restrições.

O modelo foi testado para um sistema com um aterro sanitário e uma usina de beneficiamento, considerando dois cenários base, em que foram variados os custos e as capacidades do sistema. Ao todo foram realizados 16 testes, divididos entre esses dois cenários. Os resultados estão focados na capacidade de aplicação do modelo e não são comentados os aspectos computacionais de tempo e complexidade envolvidos.

O trabalho de Alumur et al. (2012) propõe uma modelagem de maximização do lucro para problemas de projeto de rede de logística reversa (*multi-product reverse logistics network design, MPRLND*) para máquinas de lavar e secadoras na Alemanha. A formulação proposta é de programação linear inteira mista. Também é considerado um ambiente multiperíodo para que mudanças graduais na estrutura de rede e nas capacidades das instalações se fizesse possível. Muitas características de relevância são abordadas pelo modelo proposto, como já citado ser um ambiente multiperíodo, capacidades modulares, a expansão da capacidade das instalações, lista de materiais, o



rendimento mínimo nas instalações, os custos operacionais variáveis, demandas finitas no mercado secundário, e uma função objetivo reversa orientada ao lucro.

O trabalho é importante para a literatura de logística reversa, contribuindo para a compreensão de como uma empresa de equipamentos eletrônicos deve reagir aos fluxos de retorno e mercados secundários, destacando a possível obtenção de receita.

No Brasil, modelos desse tipo também têm sido desenvolvidos, estando voltados para diferentes tipos de cadeias de suprimento reversas. Schwartz Filho (2006) desenvolveu um modelo matemático e um procedimento de solução para um estudo de localização de indústrias de reciclagem da logística reversa do coco verde, por causa do impacto ambiental que causam quando jogados nos lixões ou espalhados pelas praias.

O objetivo do trabalho foi mostrar, com a ajuda de um modelo matemático de localização com custos fixos, a quantidade de indústrias de reciclagem da casca do coco verde, suas capacidades e as melhores localizações, com uma distribuição de resíduos, que minimize tanto os custos de instalação, quanto os de operação, estoque e transporte. Para isso, foram criados 10 cenários para o Estado do Espírito Santo, utilizando dados reais. Nos cenários elaborados para o problema, os custos variáveis de operação e estoque não interferiram nos resultados das aplicações do modelo, sendo que compõem o mesmo para tornar o valor do custo total calculado mais próximo da realidade.

A utilização do modelo permitiu uma avaliação clara das variáveis e parâmetros envolvidos na minimização do custo total das indústrias de reciclagem, e como os resultados são afetados por modificações nos dados de entrada. Os custos de instalação e transporte foram os que representaram maior peso na minimização do custo total, e conseqüentemente na escolha dos locais de instalação das indústrias de reciclagem, e os parâmetros de custo do terreno e distâncias os que mais afetaram estes custos, respectivamente. O modelo matemático mostrou ser bastante útil como instrumento auxiliar de análise de problemas de localização, tanto pela simplicidade de operação quanto pela aplicação das ferramentas que estão disponíveis no mercado. Os resultados foram coerentes com o esperado, face à realidade atual do Estado do Espírito Santo.

Outro trabalho interessante, em que foram formulados três modelos para a logística reversa de computadores doados ao programa “Computadores para Inclusão” é



o de Oliveira (2014). Os modelos representaram diferentes estágios de integração na rede de logística reversa do programa. A primeira proposta é de um modelo matemático monopérido de distribuição reversa para a decisão sobre instalação de novos CRCs para minimizar os custos de instalação e funcionamento da rede reversa. Depois, o modelo passa a ser multipérido, e incorpora as taxas de retorno de material dos centros de remanufatura para os centros de coleta. E então é adicionada ao modelo uma extensão que passa a considerar as taxas de retorno direcionadas, onde o retorno dos computadores recondicionados é controlada pelos parâmetros de funcionamento dos TCs (OLIVEIRA, 2014).

O presente trabalho julga significativas as perspectivas futuras sugeridas por Oliveira (2014) e assim o modelo escolhido para servir de base é detalhado a seguir, sendo o mais completo dentre os formulados por Oliveira (2014).

2.3 Modelo Capacitado de Locação-Alocação Multipérido com Fluxo de Retorno Direcionado (MCLAM-FRD)

O presente trabalho, como já mencionado, tem como base de pesquisa o trabalho realizado por Oliveira (2014), que por sua vez estudou a configuração da rede logística reversa pós-consumo de equipamentos de informática do projeto ‘Computadores para a Inclusão’.

O projeto foi criado pelo governo em 2004, promove a inclusão digital e a formação de jovens de baixa renda através de oficinas, cursos, treinamentos e outras atividades formativas. Para isso, ele conta com muitas parcerias, dentre elas Banco do Brasil e Fundação Banco do Brasil, Caixa Econômica Federal e Instituto Moradia e Cidadania, Correios, Cobra, Ministério do Trabalho e Emprego, Ministério da Educação e Prefeitura de São Paulo. Existe também outro projeto de apoio chamado ‘+TCs’ que é uma parceria do Ministério das Comunicações e da Universidade Federal de São Carlos, que visa promover a colaboração nos processos de constituição de rede entre atuais e potenciais parceiros dos programas de inclusão digital do Governo Federal. Nos TCs,



são oferecidos cursos e treinamentos presenciais e a distância, acesso a informações, serviços e oportunidades para pequenas e microempresas, assim como para a sociedade em geral. Os TCs recebem computadores que foram recondicionados pelos CRCs, com acesso à internet e possuem monitores para auxiliar nas atividades dos TCs.

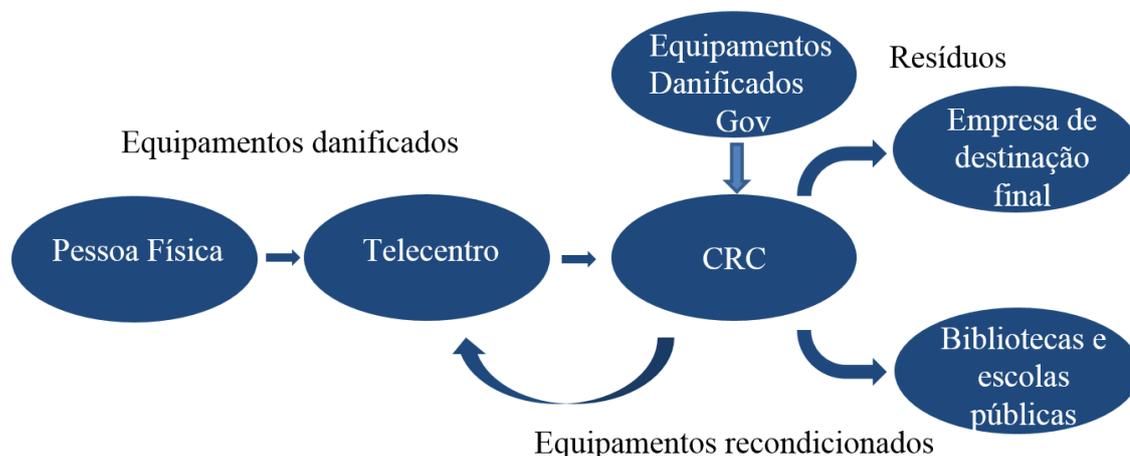
Os Centro de Recondicionamentos de Computadores (CRCs) têm como foco o recondicionamento e manutenção de equipamentos de informática, e ajuda estes jovens na conscientização ambiental, especialmente sobre os resíduos eletrônicos. Os (CRCs) promovem os cursos, e eles se encontram nas regiões metropolitanas de Porto Alegre, Brasília, São Paulo, Belo Horizonte, Salvador, Belém e Recife (MINISTERIO DAS COMUNICAÇÕES, 2012). O ministro das comunicações defende o aumento de número de CRCs pelo Brasil, que conta atualmente com 8 CRCs em funcionamento e 4 deles em implantação. São nos CRCs que os professores e alunos do projeto, selecionam os computadores que estão aptos a serem recondicionados. Depois de passar pelo processo de recondicionamento, os computadores são doados aos projetos da comunidade à qual estão inseridos, TCs, bibliotecas e escolas públicas, entre outros (+Telecentros, 2016).

Para a descrição do modelo, é necessário conhecer os componentes da rede, e são eles; os TCs, os CRCs, os Pontos de Doações e as Recicladoras. Os TCs são locais onde são ofertados cursos e treinamentos para a inclusão digital, para isso eles utilizam computadores de doações. Esses podem ser doados pela comunidade, empresas privadas ou por Órgãos Públicos, em condições de uso, ou não. Assim, os equipamentos que não estão funcionando são encaminhados aos CRCs. Os CRCs são responsáveis por recondicionar os computadores, e então enviá-los de volta aos TCs ou para Pontos de Doações. Os Pontos de Doações por sua vez, podem ser Bibliotecas e Escolas Públicas ou ONGs, que devem buscar os equipamentos recondicionados nos CRCs. Os equipamentos que não forem processados, ou que não puderam ser recuperados, são enviados para as Recicladoras.

A Figura 1 esquematiza a rede logística do projeto.



Figura 1. Funcionamento da rede logística do projeto 'Computadores para a Inclusão'



Fonte: A autora

As pessoas físicas podem deixar seus computadores como doação nos TCs, já o governo entrega seus equipamentos diretamente aos CRCs, e todos os CRCs recebem computadores de órgãos governamentais para manter seu funcionamento. Os computadores que são enviados para doação, em cada período, devem respeitar a capacidade mínima e máxima dos TCs, necessárias para que eles continuem funcionando.

Os CRCs, por sua vez, também possuem capacidade máxima de recebimento, que é proporcional a sua capacidade de processamento. Por isso, dentro dos CRCs, os computadores são testados, sofrem manutenção ou são desmontados, sendo finalmente separados entre material processado e material não processado. Os materiais que não são processados, são encaminhados diretamente as recicladoras. Os materiais que são processados são, ainda, divididos entre materiais recuperados e não recuperados.

A autora utilizou o modelo capacitado de locação-alocação multiperíodo com fluxo de retorno direcionado (MCLAM-FRD) para determinar a localização de novos CRCs e a alocação de TCs a CRCs. Este modelo leva em consideração as quantidades mínimas e máximas que os TCs podem alcançar. A quantidade mínima é a menor quantidade que um Telecentro necessita para manter seu funcionamento, e a máxima é o quanto suas instalações comportam.



A formulação do modelo matemático ficou da seguinte forma:

Conjuntos:

- I TCs
- T Períodos de planejamento
- J CRCs
- d Quantidade mínima de computadores que um Telecentro comporta
- h_i Quantidade de deterioração do Telecentro i
- Gov Quantidade de material enviado pelo governo para CRCs j abertos

Parâmetros:

- CR Capacidade de recebimento proporcional a capacidade de processamento de um CRC
- o_t Orçamento para manutenção do programa no período t
- γ Custo unitário de transporte de material
- $a_{i,t}$ Quantidade de material que o Telecentro i recebe no período t
- s Porcentagem de material não recuperado (pós processamento) que deve ser encaminhado para as empresas recicladoras
- w_t Orçamento para a abertura de CRCs j no período t
- g_{jk} Custo de transportar material do CRC j para a empresa recicladora k
- e_{ji} Custo de transportar material do CRC j para o Telecentro i
- c_{ij} Distância do Telecentro i para o CRC j
- b_j Capacidade de processamento do CRC j
- f_j Custo de abrir um CRC j
- β Custo intangível de não processamento de material
- q Período inicial de retorno dos computadores aos TCs
- K Empresas recicladoras



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 TCs
 v_{it} Quantidade de computadores em um Telecentro i no período t
 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
 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 ($p_{jt}=0$)

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{jt} \cdot f_j + \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} g_{jk} \cdot y_{jkt} \right. \\ & \left. + \sum_{i \in I} \sum_{t=3}^T \sum_{j \in J} e_{ji} \cdot n_{jit} \right) \cdot \gamma + (\delta + \beta) \cdot \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (yn_{jt}) + m_{jt} \cdot \alpha \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_i, \quad \forall i \in I, t \in T \mid t \leq q \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_i + h_{it}, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.3)$$

$$yp_{jt} + yn_{jt} = \left(\sum_{i \in I} x_{ijt} + \text{Gov} \right) \cdot z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in I} n_{jit} + m_{jt} = 0, \quad \forall j \in J, (t \leq q) \in T \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in I} n_{jit} + m_{jt} = (1 - s) \cdot (yp_{j(t-q)}), \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (2.6)$$



$$\sum_{k \in K} y_{jkt} = s \cdot yp_{jt-q} + yn_{jt-q}, \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (2.7)$$

$$yp_{jt} \leq b_j \cdot z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (2.8)$$

$$\sum_{t \in T} p_{jt} \leq 1, \quad j \in J \quad (2.9)$$

$$p_{jt} = z_{jt} - z_{jt-1}, \quad j \in J, t \in T \mid (2.10)$$

$$z_{jt} \geq z_{jt-1}, \quad \forall j \in J, t \in T \mid t \geq q \quad (2.11)$$

$$v_{it} = d, \quad i \in I, t \in T \mid (t = 1) \quad (2.12)$$

$$v_{it} = v_{it-1} + \sum_j n_{jit} - h_{i,t-1}, \quad i \in I, t \in T \mid t \geq q \quad (2.13)$$

$$v_{it} \leq l, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.14)$$

$$v_{it} \geq d, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.15)$$

$$\sum_{j \in J} p_{jt} f_j \leq w_t, \quad t \in T \quad (2.16)$$

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} g_{jk} y_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{ji} n_{jit} \right) \cdot \gamma \leq o_t, \quad t \in T \quad (2.17)$$

$$z_{jt}, p_{jt} \in \{0,1\}; x_{ijt}, y_{jkt}, yp_{jt}, yn_{jt}, m_{jt}, v_{jt}, n_{jit} \geq 0. \quad (2.18)$$

Para Oliveira (2014), a função objetivo pode ser dividida em três partes. A primeira parcela da equação tem relação direta com minimizar os custos de abertura dos CRCs. A segunda equação é responsável por multiplicar as distâncias percorridas, pelo material dos TCs para os CRCs, dos CRCs para as empresas recicladoras dos CRCs para os TCs parâmetro γ , o qual representa o custo unitário de transporte de material (kg/km). Os parâmetros δ , β são penalizações que buscam evitar uma grande quantidade de material não processada (yn_{jt}), enquanto o parâmetro α , que multiplica o último termo da terceira equação, realiza a função de não permitir que o material processado vá todo para a doação, ou seja, retorne aos TCs. Esta última penalização se faz necessária devido ao fato de que os custos referentes ao transporte de material para a doação não entram no orçamento do programa, por isto, os responsáveis por receber o material doado são também responsáveis pela sua entrega aos locais contemplados.



As primeiras restrições (2.2) e (2.3) são para garantir que o material que está nos TCs será encaminhado para os CRCs. A equação (2.2) mostra que o material que está nos TCs são os que a comunidade encaminha, e isto ocorre nos períodos menores ou iguais a q . Depois do período q , os equipamentos utilizados nos TCs sofrem deterioração, assim a equação (2.3) assegura que o material danificado recebido da comunidade somado ao material que se deteriora, sejam encaminhados aos CRCs.

Os materiais chegam ao Telecentro de 2 maneiras, vindos dos TCs ou dos órgãos governantes (Gov), e assim este material é classificado em material processado (yp_{jt}) ou material não processado (yn_{jt}). Isso só ocorrerá se o CRC estiver em funcionamento.

A restrição (2.4) foi considerada por Oliveira (2014) como não linear, então foram feitas algumas modificações, e essa restrição foi substituída por:

$$yp_{jt} + yn_{jt} = \sum_{i \in I} x_{ijt} + Gov.z_{jt}, \quad j \in J, t \in T \quad (2.19)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} \leq CR.z_{jt}.b_j, \quad j \in J, t \in T \quad (2.20)$$

A restrição (2.19) determina que o material que está no CRC, tanto os processados como os que não estão, é igual a somatória do material provido dos TCs e mais os provenientes dos órgãos governamentais (Gov) multiplicado pela variável (z_{jt}) que indica se o CRC está aberto ou não, garantindo que somente os CRCs abertos recebam o material de órgãos governamentais. A restrição (2.20) garante que os TCs só enviem material a um CRC aberto, e que esta quantidade de material (x_{ijt}) não ultrapasse a capacidade do mesmo (CR).

As restrições (2.5), (2.6) e (2.7) garantem o fluxo dos CRCs. A equação (2.5) assegura que nos períodos anteriores ou iguais a q , a quantidade de computadores que sai dos CRCs para os TCs deve ser zero, devido ao fato de que no início do planejamento assume-se que não houve tempo suficiente para processar o material. A equação (2.6) garante que a porcentagem do material que foi recuperada, $((1 - s).(yp_{j(t-q)}))$, seja enviada aos TCs ou para doações. A equação (2.7) garante que



tanto o material não processado (yn_{jt}), quanto o material processado que não foi recuperado ($s \cdot yp_{jt-q}$), seja enviado às empresas recicladoras.

A restrição (2.8) é para assegurar que quantidade de material processada de cada CRC (yp_{jt}) não ultrapasse a capacidade de processamento do CRC (b_{jt}) e que este, só receba material se estiver aberto (z_{jt}). A restrição (2.9) garante que um CRC só poderá ser aberto uma vez. A restrição (2.10) relaciona as variáveis de estado de abertura (z_{jt}) com as variáveis de mudança no estado de abertura (p_{jt}). Ou seja, para que haja mudança no estado de abertura no período ($t-1$) o CRC não estava aberto ($z_{jt-1}=0$) e então no período t ele abriu ($z_{jt-1}=1$), assim ($p_{jt}=1$). E a restrição (2.11) assegura que se um CRC for aberto, ele permanecerá aberto até o final do horizonte de planejamento.

As restrições de (2.12) a (2.15) servem para assegurar o funcionamento dos TCs. A restrição (2.12) impõe que a quantidade de computadores em um Telecentro deve ser igual à quantidade mínima de computadores que um Telecentro comporta. A restrição (2.13) é uma equação de balanceamento de estoques nos TCs a partir dos períodos em que o processo de recuperação é finalizado ($t \geq q$). Ou seja, a quantidade de equipamentos nos TCs no período t (v_{it}) é igual à quantidade disponível no período anterior (v_{it-1}) mais a quantidade de material reconicionado recebido dos CRCs menos a quantidade que deteriorou no período anterior.

A restrição (2.14) determina a quantidade mínima de computadores que podem ser alocados nos TCs, e a restrição (2.15) determina a quantidade máxima. A restrição (2.16) garante que o orçamento de abertura dos CRCs não seja ultrapassado. Assim como a restrição (2.17) garante que o orçamento para manutenção do programa não seja excedido. Para finalizar, as restrições descritas em (2.18) determinam os domínios das variáveis utilizadas no modelo.

2.4 Perspectivas de Desenvolvimento na Área



Apesar do foco deste trabalho não ser voltado a uma extensa análise da literatura relacionada ao estudo da logística reversa de resíduos sólidos, os trabalhos encontrados nos permitem fazer algumas considerações a respeito das perspectivas de trabalhos futuros. Em termos mais gerais, como evidenciado por Sarkis, Zhu e Lai (2011), existe uma demanda de mercado por alternativas mais ambientalmente engajadas. Pode-se equiparar a China ao Brasil que, apesar de ter investimento em programas de redução de impacto ambiental da indústria, ainda possui resultados singelos. Por isso, devem ser incentivados novos investimentos para o desenvolvimento e implantação de novos programas.

Em termos de modelagem, existem alguns trabalhos interessantes publicados, e que podem servir de base no desenvolvimento de modelos para novas aplicações. Zhang, Huang e He (2011) trazem um problema de recuperação e consideram para o modelo as incertezas nas variáveis que julgam fundamentais para tratar um sistema interativo de transporte e estoque de resíduos sólidos. Diferente de Oliveira (2014) que não considera tais incertezas.

Dentre os modelos internacionais estudados, Alumur et al. (2012), é o único que traz um modelo complexo, que considera um ambiente multiperíodo, sendo importante porque se assemelha nesse ponto ao de Oliveira (2014). Uma característica que os torna diferentes é que o modelo de Alumur et al. (2012) é um modelo que maximiza o lucro de uma rede reversa de materiais.

Considera-se, portanto, interessante sob o ponto de vista prático, dar continuidade ao trabalho de Oliveira (2014), implementando-se a análise de alternativas discretas de investimento. Em termos teóricos, não foram encontrados trabalhos que façam esse tipo de consideração matemática em redes de logísticas reversa. Ressalta-se, ainda, que a maior parte dos trabalhos consultados não desenvolve estudos de complexidade computacional dos modelos, o que também é relevante em termos do porte relacionado às aplicações em que todo o território nacional é considerado.



3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O modelo de pesquisa baseada abordagem quantitativa pode ser classificado como uma forma de geração de conhecimento racional. Ele se baseia no pressuposto de que é possível construir modelos objetivos que expliquem o comportamento, ou parte dele, de processos operacionais na vida real, ou que seja possível capturar uma parte dos problemas de decisão que são enfrentados pelos gestores nos processos operacionais reais. A linha de pesquisa empírica, é dirigida por descobertas e medidas empíricas. Nesta classe de pesquisa, deve-se assegurar que o modelo se ajuste entre observações e ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade. A pesquisa quantitativa empírica normativa busca principalmente o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para melhorar a situação atual (BERTRAND e FRANSOO, 2002).

Por isso, de acordo com o assunto abordado, decidiu-se utilizar neste trabalho a pesquisa empírica normativa quantitativa. Modelos quantitativos são descritos em linguagem matemática e computacional, que utilizam técnicas analíticas e experimentais para calcular valores numéricos do problema, assim estes valores podem ser analisados e testados, e a partir disso, decisões serem tomadas. Assim, modelos que prescrevem uma decisão para o problema, podendo ser baseada em modelos de otimização. Este tipo de pesquisa tem a preocupação principal de assegurar que exista adesão entre as observações e ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade (MORABITO e PUREZA, 2012).

Essa pesquisa é dividida em 5 fases, segundo Morabito e Pureza (2012), que são:

- **Definição do problema:** quando o escopo do problema, os objetivos envolvidos, assim como o modelo conceitual são determinados. Essa fase é central na pesquisa empírica. O modelo conceitual deve representar adequadamente o problema real, para que uma resposta satisfatória seja obtida;
- **Construção do modelo:** fase em que são desenvolvidos o modelo matemático do problema com as informações e estimativas coletadas na primeira fase.



Também ocorrem as coletas de dados para a determinação de parâmetros do modelo e começam as análises e experimentos com o modelo;

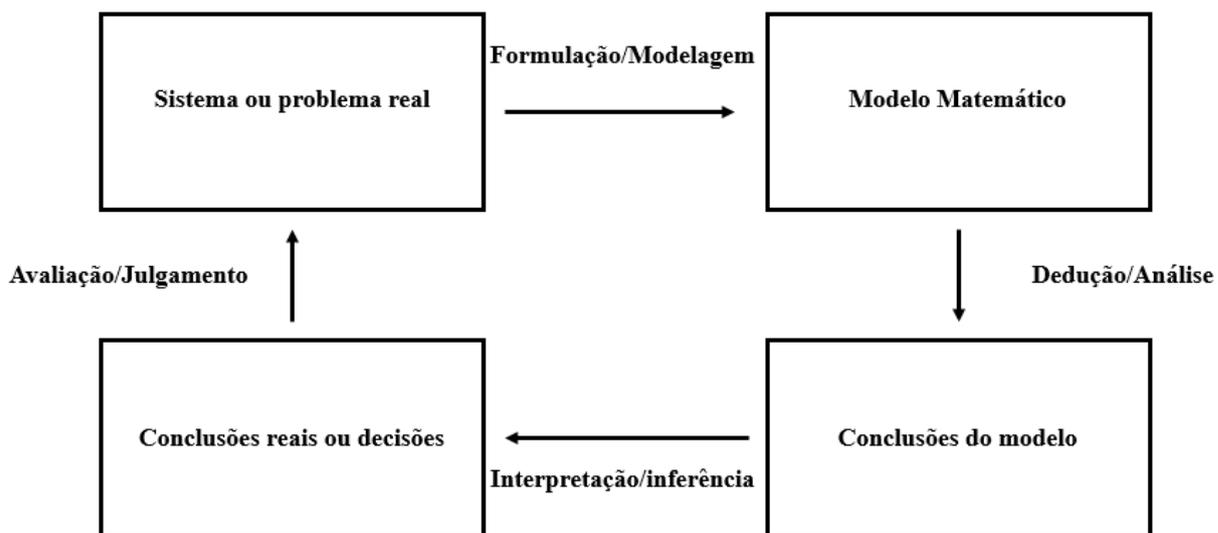
- **Solução do modelo:** são utilizados métodos de solução e algoritmos para a resolução do modelo. Algoritmos estes que podem já ser conhecidos da literatura, ou desenvolvidos especificamente para tratar o problema. Acontece também a análises de sensibilidade e de diferentes cenários para verificar a consistência das soluções encontradas;
- **Validação do problema:** se dá por verificar se o modelo proposto se adequa ao sistema real. Para que um obter uma boa solução de um modelo, é necessário que o modelo retrate com precisão o problema apresentado, ou seja, quanto mais preciso, melhor a qualidade da solução;
- **Implementação da solução:** esta é uma fase importante na pesquisa empírica. Ela traz a tradução do modelo para a organização ou empresa em questão, fazendo com que, por meio dos resultados, possam ser tiradas conclusões e tomadas decisões mais corretamente.

As etapas descritas e as interações entre elas estão representadas na Figura 2.

Como já citado anteriormente, a pesquisa empírica baseada na abordagem quantitativa, se preocupa em testar a validade e usabilidade dos modelos científicos utilizados na pesquisa teórica quantitativa, nos processos reais. Segundo Bertrand e Fransoo (2002), este tipo de pesquisa, é justificada exatamente por isto: se referir a situações da vida real, que os modelos possam ser aplicados.



Figura 2. Processo simplificado da abordagem de solução de um problema por modelagem matemática



Fonte: Morabito e Pureza (2012)



4 LOCALIZAÇÃO DE CRCS NO PROJETO “COMPUTADORES PARA A INCLUSÃO”

A modelagem proposta para a rede logística reversa, desenvolvida por Oliveira (2014), considera três níveis. No primeiro nível os computadores doados pelas pessoas físicas são entregues aos TCs, no segundo os TCs que enviam computadores aos CRCS e o terceiro nível é estratificado. Ele compreende o envio de computadores dos CRCS às Recicladoras, para doações e também de volta aos TCs para uso interno. Para esse tipo de modelagem, foi necessário o uso de vários tipos de variáveis, cada uma representando uma das etapas de transporte, ou fluxo nas redes, utilizando também parâmetros de custos separados para cada nível considerado.

No presente trabalho, optou-se por uma representação do problema baseada na teoria de fluxos em redes, e dessa forma, foi utilizado somente um tipo de variável para representar todas as etapas de transporte. Assim, os parâmetros de custos passam a ter vários significados. Enquanto que no modelo de Oliveira (2014) o parâmetro c_{ij} é a distância dos TCs aos CRCS, o parâmetro γ , o custo unitário de transporte de material, o parâmetro g_{ij} , o custo de transportar material do CRC às Recicladoras e o parâmetro e_{ji} , o custo de transporte do material do CRC para os TCs, no novo modelo o parâmetro c_{ji} engloba todos os custos de transportes; dos TCs para os CRCS, dos CRCS de volta para os TCs, dos CRCS para as Recicladoras e dos CRCS para a doação.

Tanto nesta formulação de fluxos em redes, como na do trabalho de Oliveira (2014), existe um balanço interno de massa nos vértices, que representa o trabalho de processamento do material que é recebido pelos CRCS. O parâmetro s representa a porcentagem de material que, mesmo após o processamento, não pode ser recuperado, e então esse material também é enviado às recicladoras. Então, segue aos TCs somente a porcentagem de material processado que está apta ao uso.

Existe o parâmetro q no modelo de Oliveira (2014) que é uma condição imposta para respeitar o tempo necessário de processamento do material recebido, de dois períodos. Somente após esse período é permitido o envio de material aos TCs, Pontos de Doações e às Recicladoras. No modelo reescrito, optou-se por uma estrutura



temporal em que o primeiro período não seja coincidente com a abertura dos CRCs. Então, foram utilizados parâmetros de estoques iniciais de equipamentos nos TCs, e estoques iniciais de materiais processados e não processados nos CRCs.

A etapa de transporte dos materiais entre os CRCs, TCs, Pontos de Doações e Recicladoras é muito mais rápida que o tempo necessário para o processamento dos materiais. Assim, considera-se que o material processado no período anterior só será transportado no período seguinte.

4.1 Modelagem baseada em fluxos em redes multiperíodo

O propósito inicial de se fazer uma nova formulação para o problema de Oliveira (2014), utilizando-se uma estrutura de localização com custos fixos em uma rede multiperíodo com apenas um nível estava relacionado à redução do porte do problema. Essa redução se torna mais interessante à medida que possibilite a redução do número de variáveis do problema, em especial, o número de variáveis binárias. Mas também puderam ser reduzidos o número de restrições, quando se compara esse modelo com o proposto por Oliveira (2014).

Como em geral os problemas de localização utilizam um índice i para a representação dos candidatos à abertura de uma instalação e um índice j para representar os clientes que devem ser atendidos pelas instalações abertas, como mostrado em Arenales et al. (2007), esses índices estão invertidos em relação ao modelo de Oliveira (2014), para ficar mais padronizados em relação à literatura consultada. Assim, a formulação que se segue, apesar das mudanças no uso de alguns símbolos, foi proposta com o intuito de resolver o mesmo problema de localização de CRCs no projeto "Computadores para Inclusão", já explicado e exibido anteriormente, na seção 2.3.

Conjuntos:

J TCs

I Locais candidatos à abertura de um CRC



- D Pontos que recebem doações de computadores recuperados
- K Empresas recicladoras
- V Conjunto união dos TCs j , com CRCs i , pontos que recebem doações e as empresas recicladoras, isto é representa os vértices da rede.
- A Arcos de ligação na rede
- T Períodos de planejamento

Parâmetros

Capacidade:

- u_j Quantidade máxima de computadores que um Telecentro j comporta (Kg)
- l_j Quantidade mínima de computadores que um Telecentro j comporta (Kg)
- CR Capacidade de recebimento, que é proporcional a capacidade de processamento de um CRC i
- b_i Capacidade de processamento do CRC i (Kg/ período)

Custos:

- f_i Custo de abrir um CRC i (R\$)
- c_{ji} Custo de transporte dos TCs j para os CRCs i , dos CRCs i de volta para os TCs j , dos CRCs j para as Recicladoras e dos CRCs i para a doação, $(j, i) \in A$ (R\$)
- δ Custo do não processamento de um eletroeletrônico (R\$)
- β Custo intangível de não processamento de material (R\$)

Dados de oferta:

- h_j Taxa de deterioração do Telecentro j (%)
- Gov Quantidade de material enviado pelo governo para CRCs i abertos (Kg)
- $a_{j,t}$ Quantidade de material que o Telecentro j recebe da comunidade no período t (Kg)

Dados de orçamento:



w_t Orçamento para manutenção do programa no período t (R\$)

W_t Orçamento para a abertura de CRCs no período t (R\$)

Dados do processo de recuperação dos computadores nos CRCs:

s Porcentagem de material não recuperado (pós processamento) que deve ser encaminhado para as empresas recicladoras

Dados de estoque inicial:

e_{0j} Estoque inicial de equipamentos no Telecentro j (Kg)

p_{0i} Quantidade de material processado no CRC i no período $t=0$ (Kg)

n_{0i} Quantidade de material não processado no CRC i no período $t=0$ (Kg)

Variáveis:

x_{jit} Quantidades transportadas nos arcos da rede, $(j, i) \in A$ no período t

y_{it} Indica se o CRC i é aberto em t ($y_{it}=1$) ou não ($y_{it}=0$)

p_{it} Quantidade de material processado no CRC i no período t

n_{it} Quantidade de material não processado no CRC i no período t

e_{jt} Estoque de material no Telecentro j no período t

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} f_i \cdot (y_{it} - y_{it-1}) + \sum_{(j,i) \in A} \sum_{t \in T} c_{ji} \cdot x_{jit} \\ & + (\delta + \beta) \cdot \left(\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} n_{it} \right) \quad (4.1) \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in I} x_{jit} = (1 - h_j) \cdot e_{jt-1} - e_{jt} + a_{jt} + \sum_{(j,i) \in A} x_{ijt}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.2)$$

$$e_{jt} \geq l_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.3)$$

$$e_{jt} \leq u_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.4)$$



$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} \leq CR \cdot b_i \cdot y_{it}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.5)$$

$$p_{it} + n_{it} = \sum_{(j,i) \in A} x_{jit} + Gov \cdot y_{it}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.6)$$

$$p_{it} \leq b_i \cdot y_{it}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.7)$$

$$(1 - s) \cdot p_{it-1} = \sum_{J \cup DI(i,j) \in A} x_{ijt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.8)$$

$$s \cdot p_{it-1} + n_{it-1} = \sum_{(i,k) \in A} x_{ikt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in I} f_i \cdot (y_{it} - y_{it-1}) \leq W_t, \quad \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} + \sum_{(i,j) \in A} x_{ijt} + \sum_{(i,k) \in A} x_{ikt} \leq w_t, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.11)$$

$$y_{it} \geq y_{it-1}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.12)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.13)$$

$$x_{ijt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (4.14)$$

$$p_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.15)$$

$$n_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.16)$$

$$e_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.17)$$

A função objetivo (4.1) pode ser dividida em três parcelas. A primeira visa minimizar os custos de instalação; a segunda, os custos de transporte em toda a rede de logística reversa do programa, e a terceira os custos de não processamento do material no CRC.

A restrição (4.2) faz o balanço de massa nos TCs. O estoque final de computadores em um TC é determinado pelo envio de material para os CRCs, assim como pelo recebimento de computadores doados pela comunidade e que retornam dos CRCs já reconicionados. Há ainda a deterioração dos computadores no próprio TC,



que gera uma demanda por recondicionamento nos CRCs. As restrições (4.3) e (4.4) são, respectivamente, as quantidades mínimas e máximas que um Telecentro comporta. Elas garantem que um Telecentro sempre tenha o mínimo de computadores para funcionar, e não ultrapasse a capacidade máxima. A restrição (4.5) garante que sejam respeitadas as capacidades de recebimento dos CRCs, caso estejam abertos, que é proporcional a sua capacidade de processamento dos materiais. Já a restrição (4.6) divide dentro dos CRCs os materiais recebidos em processados e não processados, para mais tarde terem a destinação correta. A restrição (4.7) garante que seja respeitada a capacidade de processamento de um CRC, caso ele esteja aberto.

A restrição (4.8) faz com que a quantidade de material processado pelos CRCs seja enviada aos TCs, ou então doada. Enquanto que a restrição (4.9) destina a quantidade de material processado e não recuperado, junto do material não processado às recicladoras.

As restrições (4.10) e (4.11) são relacionadas ao orçamento. A primeira faz com que seja respeitado o orçamento para a abertura dos CRCs e a segunda é para a manutenção do programa, com custos como transporte. E, por último, a restrição (4.12) garante que um CRC aberto deve permanecer funcionando até o fim do horizonte de planejamento. As equações (4.13) a (4.17) descrevem as restrições de domínio das variáveis do problema.

O modelo resultante apresenta $|T|(|A|+3|I|+|J|)$ variáveis, sendo $|I||T|$ binárias, e $|I|+|T|(3|J|+6|I|)$ restrições. Comparando o novo modelo reformulado com o utilizado por Oliveira (2014), notou-se uma diferença considerável em relação ao porte. O novo modelo possui 5 tipos de variáveis e apenas um deles constituído de variáveis binárias, enquanto que o modelo de Oliveira (2014) possui 9 tipos de variáveis, com dois conjuntos de 2 variáveis binárias. O número de variáveis binárias é reduzido pela metade, o que ocasiona a diminuição do tempo gasto para que o modelo encontre a solução ótima. O conjunto de restrições também foi reduzido de 18 conjuntos de restrições para 10, no novo modelo, em termos teóricos.



4.2 Análise do modelo de Oliveira (2014)

Ao se analisar o modelo de Oliveira (2014), observa-se que a rede voltada para a logística reversa de computadores considerada é dividida em múltiplos níveis, como já comentado, mas não possui uma estrutura compatível com uma modelagem de fluxos em redes. Problemas de fluxos em redes possuem vértices que são geradores de fluxo e vértices absorvedores de fluxo, além da grande maioria apresentar também vértices de passagem, como o problema de fluxo de custo mínimo (AHUJA et al. 1993).

Os fluxos na rede são, dessa forma, orientados a partir dos vértices geradores de fluxos, que possuem ofertas definidas, fluindo pelos vértices de passagem e chegam aos vértices absorvedores de fluxo que, por sua vez, apresentam demandas. Dessa forma, as quantidades de material, ou fluxo na rede, podem ser conservadas, sofrer alterações no seu balanço de massa, como no problema de fluxo generalizado (AHUJA et al., 1993), ou ainda, utilizar estoques para caracterizar o acúmulo de material em algum ponto específico da rede modelada.

O modelo proposto por Oliveira (2014) não possui qualquer dado associado às demandas na rede do projeto “Computadores para Inclusão”, possuindo apenas um balanço de estoques nos TCs, com limites mínimos e máximos definidos. Assim, o modelo, de certa forma imita a existência de uma demanda de retorno de computadores para os TCs. Por outro lado, por essas restrições não representarem demandas, de fato, essa consideração traz algumas implicações para a solução ótima do modelo.

A primeira propriedade a ser observada diz respeito à restrição (2.6):

$$\sum_{i \in I} n_{jit} + m_{jt} = (1 - s) \cdot (yp_{j(t-q)}), \quad j \in J, t \in T \mid t > q \quad (2.6)$$

Em que:

n_{jit} Variável que representa a quantidade de material do CRC j encaminhado ao Telecentro i no período t



- m_{jt} Variável que representa a quantidade de material processado no CRC j no período t que não será encaminhado para Telecentros
- yp_{jt} Variável que representa a quantidade de material processado no CRC j no período t
- s Parâmetro que representa a porcentagem de material não recuperado (pós processamento) que deve ser encaminhado para as empresas recicladoras

Essa restrição deveria garantir que todo o material processado e recuperado em cada período fosse dividido entre os TCs e as doações. Como não há demanda nos TCs e as doações nem são consideradas como vértices na rede, o que determina essa divisão são os custos desses dois fluxos na função objetivo. Existe uma penalização para o não retorno de material aos TCs, $\alpha(\delta + \beta)$, e um custo de transporte entre os CRCs e os TCs, e_{ji} . Matematicamente, se $\alpha(\delta + \beta) > e_{ji}$, não haverá envio de computadores recuperados para doação em nenhum período ao longo do horizonte de planejamento, o que torna todas as variáveis $m_{jt} = 0, \forall j \in J, \forall t \in T$.

Em geral, penalizações como $\alpha(\delta + \beta)$ são consideradas custos de oportunidade e, nesse, caso relacionadas ao não atendimento de alunos nos TCs, provalmente sempre considerados mais altos que custos de transporte entre os CRCs e os TCs. Economicamente, custos de oportunidade são geralmente elevados, o que força, nesse caso, o retorno dos computadores aos TCs, e proíbe, quando se usa um critério de minimização na função objetivo, que os computadores reconicionados sejam doados.

No entanto, ao se analisar essa restrição e a função objetivo, podem ainda ser encontrados casos em que ocorrem doações a partir dos CRCs, o que ocorre quando a quantidade de computadores nos TCs atinge a sua capacidade máxima. No modelo de Oliveira (2014), isso pode ocorrer apenas a partir do 3º período de planejamento, como mostra a restrição (2.4), uma vez que o parâmetro q , por definição, vale 2:

$$v_{it} \leq l, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.14)$$

Em que:



- v_{it} Variável que representa a quantidade de computadores em um Telecentro i no período t
- l Parâmetro que representa a quantidade máxima de computadores que um Telecentro comporta

Já em relação à escolha de qual, ou quais, TCs devem receber os computadores processados e recuperados em um CRC em um determinado período, novamente, como não se tem dados de demanda nos TCs, a função objetivo deveria guiar a escolha do TC que deve receber os computadores recuperados, desde que respeitados os limites inferior e superior de computadores em todos os TCs. Dessa forma, matematicamente, para minimizar os custos de transporte, somente o TC mais próximo a cada um dos CRCs abertos deveria receber todos os computadores processados e recuperados de volta, mantendo sempre a quantidade máxima permitida de computadores no local.

Porém, ao se analisar as restrições referentes ao balanço de massa nos TCs, observam-se incompatibilidades em relação ao balanço de massa nesses vértices. As restrições (2.2) e (2.3) que controlam as quantidades de computadores usados que chegam a um TC e que devem ser enviadas aos CRCs, mais a deterioração dos computadores dos próprios TCs não apresentam um balanço de massa coerente com as restrições (2.12), (2.13) e (2.15), que computam as quantidades de computadores nos TCs, estabelecendo também o seu nível mínimo:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_i, \quad \forall i \in I, t \in T \mid t \leq q \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = a_{it} + h_i, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.3)$$

$$v_{it} = d, \quad i \in I, t \in T \mid (t = 1) \quad (2.12)$$

$$v_{it} = v_{it-1} + \sum_j n_{jit} - h_i, \quad i \in I, t \in T \mid t \geq q \quad (2.13)$$

$$v_{it} \geq d, \quad i \in I, t \in T \mid t > q \quad (2.15)$$



Em que:

- x_{ijt} Variável que representa a quantidade de material do Telecentro i e é encaminhado ao CRC j no período t
- v_{it} Variável que representa a quantidade de computadores em um Telecentro i no período t
- n_{jit} Variável que representa a quantidade de material do CRC j encaminhado ao Telecentro i no período t
- a_i Parâmetro que representa a quantidade de material que o Telecentro i recebe
- h_i Parâmetro que representa a taxa de deterioração do Telecentro i
- d Parâmetro que representa a quantidade mínima de computadores que um Telecentro comporta

A restrição (2.12) estabelece que no 1º período de planejamento, $t = 1$, a quantidade de computadores em cada TC é igual a d , que é o número mínimo de computadores que cada TC precisa para manter o seu funcionamento. Essa restrição funciona como um estoque inicial de computadores, garantindo que os TCs tenham condições de atender ao público em todo o horizonte de planejamento. A restrição (2.2) garante que, nos dois primeiros períodos de planejamento, cada TC envia aos CRCs somente os computadores usados que recebe da comunidade, descritos pelo parâmetro a_i . A partir do 3º período, os TCs enviam aos CRCs, além do material recebido a partir de doações da comunidade, seus próprios computadores deteriorados, isto é, os computadores que estragaram com o uso nos próprios TCs.

A restrição (2.13), que faz o balanço de massa, representando o estoque de cada TC, e estabelecendo que a quantidade de computadores em um dado TC em dado período é dada pelo que havia em estoque no período anterior menos as baixas ocorridas por deterioração, também no período anterior, acrescida das quantidades de computadores recebidas a partir dos CRCs no período corrente. Note que, na restrição (2.13), os TCs estão aptos a receber os computadores reconicionados nos CRCs a partir do 2º período ($t \geq q$), mas isso nunca vai ocorrer, pois a restrição (2.6), já comentada, só permite o



retorno dos computadores para os TCs, a partir dos CRCs, a partir do 3º período ($t > q$). Isso implica que, $n_{jit} = 0, \forall j \in J, i \in I, t \leq 2$.

Como a restrição (2.6) garante que as quantidades mínimas de computadores em cada TC sejam mantidas no 1º período e a restrição (2.15) assegura a mesma condição somente a partir do 3º período ($t > q$), o 2º período fica, a princípio, sem garantias de funcionamento, pois pode haver no TC uma quantidade de computadores inferior à quantidade mínima requerida. E, de fato, isso ocorre? Para entender essa possibilidade, é necessário analisar, novamente algumas combinações entre restrições.

Quando analisamos as restrições (2.2) e (2.3), o balanço de massa parece matematicamente correto, pois a deterioração só ocorre a partir do 3º período. Na prática, apesar de não introduzir erros no modelo, essas considerações não são muito realistas, pois os TCs trabalham com computadores já usados e reconicionados. Os TCs também ministram cursos, o que garante um grande tempo de uso e o manuseio dos computadores por muitas pessoas diferentes, também aumenta a probabilidade de ocorrência de falhas nos computadores.

Porém, ao se analisar os efeitos conjuntos das restrições (2.2) e (2.13), é possível verificar que, no 2º período, mesmo não havendo envio de material deteriorado dos TCs para os CRCs na restrição (2.2), essa quantidade é descontada do estoque de computadores dos TCs na restrição (2.13). Na restrição (2.13), definida quando $t \geq q$, isto é, a partir do 2º período, o termo $-h_i$, quando se considera $t = 2$, que é igual a q , fica $-h_i$. Então, para um dado TC, com $t = 2$, a restrição (2.13) fica: $v_{i2} = v_{i1} - h_i$, pois, como já comentado, nesse caso, $n_{jit} = 0, \forall j \in J$. Como o parâmetro h_i foi definido para todos os TCs em todos os períodos, essa restrição só funciona adequadamente se h_i for declarado como zero. Caso contrário, quando $t = 2$, a restrição (2.13) resulta em $v_{i2} = d - h_i$, que é inferior à quantidade mínima necessária ao funcionamento do CRC, pois a restrição (2.12) garante que $v_{i1} = d, \forall i \in I$.

Ao se separar a rede do projeto “Computadores para Inclusão” em vários níveis, foi necessário criar restrições de acoplamento entre os diferentes níveis da rede. O conjunto de restrições (2.2), (2.3), (2.12) e (2.13), por exemplo, fazem o balanço de massa nos vértices que representam os TCs. As duas primeiras restrições controlam as



quantidades de computadores que saem dos TCs, as duas últimas últimas controlam as quantidades de computadores que permanecem nos TCs, enquanto somente (2.13) controla as quantidades de computadores que os TCs recebem dos CRCs. Ao se modelar o problema dessa forma, as etapas de transporte, representadas pelas variáveis x_{ijt} e n_{jit} se tornam totalmente independentes. Isso impede que um computador doado pela comunidade a um TC em bom estado seja imediatamente aproveitado nesse TC, mesmo que haja capacidade disponível para isso.

Em relação à construção da função objetivo, dada por (2.1), também podem ser feitas algumas considerações importantes. Em um primeiro momento, a função objetivo proposta parece compatível com a teoria, se constituindo em uma função típica de problemas de localização com custos fixos (*fixed-charge location problem*), pois minimiza simultaneamente os custos de investimento em estrutura física e de transporte para uso da rede. Os custos fixos de investimento são representados pela abertura dos CRCs, na primeira parcela da função objetivo.

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{jt} \cdot f_j + \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} \cdot x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} g_{jk} \cdot y_{jkt} \right. \\ & \left. + \sum_{i \in I} \sum_{t=3}^T \sum_{j \in J} e_{ji} \cdot n_{jit} \right) \cdot \gamma + (\delta + \beta) \cdot \left(\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (y_{n_{jt}}) + m_{jt} \cdot \alpha \right) \quad (2.1) \end{aligned}$$

Em que:

p_{jt} Variável que indica se o CRC j foi aberto no período t ($p_{jt}=1$) ou não ($p_{jt}=0$)

x_{ijt} Variável que representa a quantidade de material do Telecentro i e é encaminhado ao CRC j no período t

y_{jkt} Variável que representa a quantidade de material do CRC j, encaminhado a empresa recicladora k no período t

n_{jit} Variável que representa a quantidade de material do CRC j encaminhado ao Telecentro i no período t



- yn_{jt} Variável que representa a quantidade de material não processado no CRC j no período t
- m_{jt} Variável que representa a quantidade de material processado no CRC j no período t que não será encaminhado para Telecentros
- f_j Parâmetro que representa o custo de abrir um CRC j
- c_{ij} Parâmetro que representa a distância do Telecentro i para o CRC j
- g_{jk} Parâmetro que representa o custo de transportar material do CRC j para a empresa recicladora k
- e_{ji} Parâmetro que representa o custo de transportar material do CRC j para o Telecentro i
- γ Parâmetro que representa o custo unitário de transporte de material
- δ Parâmetro que representa o custo real de não processamento de material
- β Parâmetro que representa o custo intangível de não processamento de material
- α Parâmetro que representa a penalidade por não retorno de material para os Telecentros

Os custos variáveis estão divididos entre as demais parcelas da função objetivo. Na segunda parcela, são computados os custos relativos ao transporte de computadores entre os TCs e os CRCs, a segunda parcela calcula os custos de transporte entre os CRCs e as empresas recicladoras e a terceira parcela se refere aos custos do transporte de computadores reconicionados dos CRCs de volta para os TCs. Essas parcelas são inteiramente compatíveis com os modelos teóricos e com a prática do projeto “Computadores para Inclusão”. Sabe-se que o Governo Federal arca com os custos de instalação de novos CRCs e que diversos convênios e parcerias garantem o orçamento necessário às atividades transportar os computadores ao longo da rede. Essa premissa é evidenciada no modelo pelo fato das restrições orçamentárias serem separadas, nas restrições (2.16) e (2.17), para instalação e uso da rede, respectivamente.

No entanto, a quarta parcela da função objetivo apresenta alguns problemas consideráveis. O primeiro deles é o fato de que não é usual considerar custos de



processamento de material, ou não processamento nesse caso específico, para se equilibrar com custos de instalação e transporte. Como esse custo é considerado como um custo de oportunidade, em geral, ele é bem mais alto que os custos de transporte, mas não tão altos quanto os custos de instalação. Isso faz com que o modelo evite, sempre que houver capacidade, não processar material.

Porém, esse mesmo custo é multiplicado por α para representar a penalização por não retorno dos computadores recondicionados aos TCs. Matematicamente, isso implica no fato de que, para valores de $\alpha > 1$, se g_{jk} não representar custos de transporte extremamente altos para os custos de transporte entre os CRCs e as recicladoras, o modelo priorizará o não processamento de computadores à doação, uma vez que $g_{jk} + (\delta + \beta)$ será menor que $\alpha(\delta + \beta)$. Na prática, isso implica no descarte de computadores que possuem potencial de recondicionamento, para evitar pagar uma parcela mais alta de custos, recondicionando e doando esses computadores.

Uma última crítica à função objetivo proposta está no fato de que β é um custo intangível, tido como o custo intangível de não processamento de material nos CRCs. Economicamente, custos intangíveis não representam desembolso e, por isso, não são pagos, de fato pela empresa ou projeto em questão. Sendo assim, um custo intangível não deveria ser somado a um custo tangível, que é, de fato, desembolsado. Além disso, ao se considerar esses custos, tangíveis e intangíveis, de não processamento para penalizar o não retorno dos computadores recondicionados aos TCs e enviados para a doação, aloca-se um custo de não processamento a um material que foi processado e recuperado. Esses custos foram considerados corretamente na restrição (2.17) e os custos intangíveis não consomem orçamento do projeto, mas o valor da função objetivo não representa os valores efetivamente gastos com o projeto no horizonte considerado.

Uma vez que o modelo proposto por Oliveira (2014) esteja definido, este pode ser classificado como um modelo de localização com custos fixos, com múltiplos níveis ao longo da rede logística e com múltiplos períodos de planejamento. Como o problema de localização com custos fixos é NP-difícil (DASKIN, 1995), e sendo o modelo de Oliveira (2014) uma generalização desta classe de problemas, é de se esperar que o



mesmo apresente grande porte, em virtude da consideração de múltiplos níveis e períodos de planejamento, além de grande complexidade computacional.

Por fim, há mais um ponto que contribui para o aumento da complexidade computacional do modelo de Oliveira (2014), que é a consideração de dois conjuntos de variáveis binárias para controlar a abertura e a manutenção dos CRCs abertos ao longo do horizonte de planejamento. Um primeiro conjunto de variáveis, $p_{jt} \in \{0,1\}, \forall j \in J, t \in T$, que indica em que período de planejamento um CRC j foi aberto, para que o seu custo de instalação seja computado na função objetivo e um segundo conjunto de variáveis, também binárias, $z_{jt} \in \{0,1\}, \forall j \in J, t \in T$, que é usado para indicar que um CRC aberto não deve ser fechado durante o horizonte de planejamento e que um CRC aberto deve ter respeitadas as suas capacidades de recebimento e processamento. Esse tipo de prática não é usual na modelagem de problemas de logística ou logística reversa, para representar decisões de projeto e uso da rede e pode ser facilmente evitado.

4.3 Comparação da reformulação proposta com o modelo de Oliveira (2014)

No primeiro momento, a maior motivação para a proposição de uma nova formulação para o problema proposto por Oliveira (2014) estava relacionada à redução do número de variáveis binárias, de forma a tentar reduzir a sua complexidade computacional. O uso de uma formulação baseada em fluxos em redes também poderia tornar o modelo mais simples e incentivar o seu uso na prática, inclusive em outras redes de logística reversa para recolhimento e processamento de material pós-consumo.

Assim, havia a intenção de representar exatamente o mesmo problema. No entanto, com a identificação de algumas incoerências no modelo de Oliveira (2014), não foi possível fazer uma formulação totalmente equivalente. Mesmo assim, nesse primeiro momento, foi descartada a possibilidade de inserção de dados de demanda, tanto para retorno dos computadores recondicionados aos TCs, quanto para a doação. Mas os pontos de doação foram inseridos na rede, para que pudesse haver um cadastro desses pontos, para posterior consideração das suas demandas. Essa extensão se torna equivalente à de Oliveira (2014), ao se considerar apenas um vértice de doação.



Em relação à função objetivo (4.1), como já foi explicado, a estrutura de fluxos em redes proposta muda a consideração dos custos de transporte, antes dispostas em três parcelas, para apenas uma, que é a segunda parcela. Nesta parcela, quando os custos são computados para um par $(j, i), \forall (j, i) \in A, i \in D$, ou seja, i é um vértice de doação, c_{ji} ainda representa um custo intangível de não retorno dos computadores reconicionados aos TCs, mas sem multiplicar pelos custos tangíveis e intangíveis de não processamento, que só são aplicados agora ao material não processado, na terceira parcela da função objetivo.

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} f_i \cdot (y_{it} - y_{it-1}) + \sum_{(j,i) \in A} \sum_{t \in T} c_{ji} \cdot x_{jit} \\ & + (\delta + \beta) \cdot \left(\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} n_{it} \right) \quad (4.1) \end{aligned}$$

Em que:

- y_{it} Variável que indica se o CRC i é aberto em t ($y_{it}=1$) ou não ($y_{it}=0$)
- x_{jit} Variável que representa as quantidades transportadas nos arcos da rede, $(j, i) \in A$
- n_{it} Variável que representa a quantidade de material não processado no CRC i no período t
- f_i Parâmetro que representa o custo de abrir um CRC i
- c_{ji} Parâmetro que representa o custo de transporte dos TCs j para os CRCs i , dos CRCs i de volta para os TCs j , dos CRCs j para as Recicladoras e dos CRCs i para a doação, $(j, i) \in A$
- δ Parâmetro que representa o custo do não processamento de um eletroeletrônico
- β Parâmetro que representa o custo intangível de não processamento de material



Ao se considerar apenas um conjunto de variáveis binárias para representar a abertura de um CRC e que ele não pode ser fechado ao longo do horizonte de planejamento, a primeira parcela da função objetivo garante que esse custo só será cobrado uma única vez, pois somente no período em que um CRC i for aberto, a diferença $(y_{it} - y_{it-1}) = 1$. Para os demais períodos, essa diferença é zero. A restrição (4.12) garante que, uma vez aberto, um determinado CRC permanecerá aberto.

O uso de uma única restrição para fazer o balanço de massa nos TCs, expressa em (4.2), garante que ocorra a deterioração dos computadores dos TCs em qualquer período. Caso um computador seja doado pela comunidade em perfeitas condições de uso, o que segundo Oliveira (2014), pode ocorrer em cerca de 30% dos casos, o TC pode fazer uso imediato desse computador, sem a necessidade de enviá-lo a um CRC.

$$\sum_{i \in I} x_{jit} = (1 - h_j) \cdot e_{jt-1} - e_{jt} + a_{jt} + \sum_{i \in I} x_{ijt}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.2)$$

Em que:

x_{jit} Variável que representa as quantidades transportadas nos arcos da rede,
 $(j, i) \in A$

e_{jt} Variável que representa o estoque de material no Telecentro j no período
 t

h_j Parâmetro que representa a taxa de deterioração do Telecentro j

$a_{j,t}$ Parâmetro que representa a quantidade de material que o Telecentro j
recebe da comunidade no período t

As restrições (4.3) e (4.4), que garantem as quantidades mínima e máxima de computadores em um TC agora funcionam para todos os períodos, não permitindo que no 2º período os TCs possam operar com uma quantidade de computadores inferior à mínima permitida.

$$e_{jt} \geq l_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.3)$$

$$e_{jt} \leq u_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.4)$$



Em que:

- e_{jt} Variável que representa o estoque de material no Telecentro j no período t
- u_j Parâmetro que representa a quantidade máxima de computadores que um Telecentro j comporta
- l_j Parâmetro que representa a quantidade mínima de computadores que um Telecentro j comporta

Além disso, essas mesmas restrições consideram que os TCs são heterogêneos, possuindo capacidades diferentes de atendimento ao público, e, portanto, apresentando quantidades mínimas e máximas de computadores descritas em função do índice j . Essa é outra generalização do modelo de Oliveira (2014), que pode ser facilmente compatibilizada com a formulação original pela declaração de parâmetros $l_j = l, \forall j \in J$ e $u_j = u, \forall j \in J$. As demais restrições foram apenas reescritas para uma única variável binária e para se adequar a uma estrutura de fluxos em redes.

A reformulação proposta também pode ser classificada como um modelo de localização com custos fixos e multiperíodos, porém com apenas um nível para representar a rede logística. Apesar de três tipos de produtos fluírem na rede, sendo computadores pós-consumo, material reciclável e computadores reconicionados, nenhuma das duas formulações usou, estritamente, uma estrutura multiproduto.

Em relação ao porte do problema, no que diz respeito à sua estrutura matemática e computacional, houve uma significativa redução no número de restrições descritas, passando de 18 conjuntos de restrições, na formulação de Oliveira (2014), para apenas 10 conjuntos de restrições na formulação proposta. O número de variáveis binárias do problema, outra característica importante para a análise de complexidade computacional, foi reduzido à metade. Para um problema considerado NP-difícil, esta característica está relacionada a um grande potencial de aplicação prática a redes com maior número de vértices, em especial, para um maior número de candidatos à localização de novos CRCs.



Por exemplo, supondo que a rede "Computadores para Inclusão", tenha 25 TCs, com 10 candidatos à abertura de CRCs, em um horizonte de planejamento de 48 períodos, observa-se que, enquanto o modelo de Oliveira (2014) conta com 38.880 variáveis, sendo 960 binárias, e 11.744 restrições, o modelo reduziu estes números para 13.920 variáveis, sendo apenas 480 binárias, e 7.007 restrições.

4.4. Extensões propostas para a reformulação baseada em fluxos em redes

Conforme comentado no início da seção 4.2, o modelo de Oliveira (2014) não apresenta dados de demanda. Seria interessante considerar que os TCs e os pontos de doação apresentam dados de demanda, para que, assim, o modelo respeite a construção de um modelo de fluxos em redes. Isso é interessante para que haja um equilíbrio entre os pontos geradores e os pontos absorvedores de fluxo, fechando o balanço de massa que circula na rede logística reversa.

Partindo desse pressuposto, de que o modelo de Oliveira (2014) poderia ter os fluxos na rede considerados de forma mais realista, e também de forma mais coerente com os modelos de localização de instalações com custos fixos encontrados na literatura, foram realizadas as seguintes mudanças nos fluxos do sistema:

Em primeiro lugar, a possibilidade de aproveitamento direto de computadores pelos CRCs foi considerada. Para permitir que um computador que seja doado pela comunidade em perfeito estado não precise ir até um CRC para ser reconicionado, podendo entrar em uso imediato no TC em que foi doado, a restrição (4.19) foi adicionada. Ela especifica que cada TC em cada período, deve enviar a um ou mais CRCs abertos, uma quantidade de material maior ou igual à quantidade de computadores sem condições de uso doados pela comunidade. O parâmetro α_{jt} representa a porcentagem de computadores doados ao TC que não está em perfeito estado de funcionamento.



$$\sum_{i \in I} x_{jit} \geq \alpha_{jt} a_{jt}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.19)$$

Em que:

- x_{jit} Variável que representa as quantidades transportadas nos arcos da rede,
 $(j, i) \in A$
- $a_{j,t}$ Quantidade de material que o Telecentro j recebe da comunidade no período t

Uma segunda adaptação foi a consideração de que, da quantidade de material enviada por um TC a um CRC em um determinado período, uma porcentagem deve retornar ao TC, depois de processada pelo CRC, na forma de computadores reconicionados. Essa restrição, descrita pela equação (4.20), simula uma demanda no TC, que deve ser atendida em um período subsequente, de forma a respeitar o tempo de processamento no CRC, que é de um período de planejamento. A quantidade de material que retorna ao TC é proporcional à quantidade enviada para o CRC e descrita por d_{jt} . Deve-se notar que a porcentagem de aproveitamento de material no CRC, quando se trata do reconicionamento de computadores é baixa, sendo necessário que $d_{jt} \leq (1 - s)$ para que o problema se torne viável. Quando $d_{jt} = (1 - s)$, o TC não é capaz de permitir a doação de computadores a partir do material que ele próprio enviou para um CRC no período anterior.

$$x_{ijt} \geq d_{jt} \cdot x_{jit-1}, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (4.20)$$

Em seguida, as demandas por doação de computadores reconicionados foram modeladas. Como os TCs possuem uma faixa de operação descrita pela quantidade de material alocada ao TC em um dado período e, além disso, os TCs passaram a poder exigir uma porcentagem mínima de retorno do material enviado para processamento em um CRC, as demandas por doação perdem certa prioridade de atendimento.



Para que, mesmo com uma prioridade de atendimento relativamente reduzida, haja a entrega de computadores solicitados pelos postos de doação, optou-se por considerar a possibilidade de atraso nas entregas de computadores reconicionados aos pontos de doação, conforme mostra a restrição (4.24). A demanda por computadores reconicionados em um ponto que necessita da doação de computadores a partir de um CRC é dada por g_{jt} , enquanto a quantidade faltante, caso haja, é armazenada em z_{jt} . Como essa restrição representa um balanço de estoque, caso haja uma entrega parcial, menor que a demandada do período, as quantidades requeridas remanescentes podem ser entregues em períodos futuros, até o saldo da variável z_{jt} se torne nulo. Essa variável deve ser penalizada na função objetivo, de forma que um custo de falta γ seja computado sempre que houver entrega em atraso.

$$z_{jt} = g_{jt} + z_{jt-1} - \sum_{i \in I} x_{ijt}, \quad \forall j \in D, t \in T, z_{jt} = 0, \forall j \in D, t = |T| \quad (4.24)$$

Em relação ao fluxo interno em um CRC, a estrutura de capacidade de processamento também foi alterada. No modelo de Oliveira (2014), o Governo Federal pode enviar equipamento aos CRCs todos os períodos, não necessariamente respeitando a capacidade de recebimento dos CRCs. Pela restrição (4.21), definiu-se que seria necessário que o material enviado pelos órgãos públicos também respeitasse a capacidade de recebimento do CRC, que é proporcional à capacidade de processamento.

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} \leq \sum_{m \in M} (CR \cdot b_{im} - Gov) \cdot y_{imt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.21)$$

A última extensão proposta para o modelo é a avaliação simultânea de alternativas discretas de investimento em capacidade. Esse tipo de consideração permite avaliar, por exemplo, se é melhor investir em um único CRC com capacidade elevada ou se é preferível dividir essa capacidade entre dois CRCs menores, localizados em



locais diferentes da rede de logística reversa. Como esse tipo de adaptação é bastante conhecida na literatura, optou-se por explicá-la juntamente com o restante do modelo, que é apresentado na seção que se segue.

4.4.1 Modelo para avaliação de alternativas discretas de investimento

Para que o modelo para avaliação de alternativas discretas de investimento ficasse autocontido, todos os conjuntos, parâmetros, variáveis e restrições utilizados no modelo, mesmo aqueles que não sofreram nenhuma alteração são novamente apresentados. As restrições que não sofreram modificações, para facilitar a leitura e comparação deste modelo com a formulação alternativa de fluxos em redes, mostrada na seção 4.2, permanecem com a mesma numeração. Ao passo que as restrições modificadas e acrescentadas ao modelo tiveram a sua numeração atualizada.

Conjuntos:

- J TCs
- I Locais candidatos à abertura de um CRC
- D Pontos que recebem doações de computadores recuperados
- K Empresas recicladoras
- V Conjunto união dos TCs j , com CRCs i , pontos que recebem doações e as empresas recicladoras.
- A Arcos de ligação na rede
- T Períodos de planejamento
- M Conjunto de alternativas discretas

Parâmetros

Capacidade:

- u_j Quantidade máxima de computadores que um Telecentro j comporta



- l_j Quantidade mínima de computadores que um Telecentro j comporta
- CR Capacidade de recebimento, que é proporcional a capacidade de processamento de um CRC i
- b_{im} Capacidade de processamento do CRC i para a alternativa m

Custos:

- f_{im} Custo de abrir um CRC i considerando a alternativa de capacidade m
- c_{ji} Custo de transporte dos TCs j para os CRCs i , dos CRCs i de volta para os TCs j , dos CRCs j para as Recicladoras e dos CRCs i para a doação, $(j, i) \in A$
- r Custo do não processamento de um eletroeletrônico
- β Custo intangível de não processamento de material
- γ Penalização por atraso na entrega de computadores para doação

Dados de oferta:

- h_j Taxa de deterioração do Telecentro j
- Gov Quantidade de material enviado pelo governo para CRCs i abertos
- a_{jt} Quantidade de material que o Telecentro j recebe da comunidade no período t
- α_{jt} Porcentagem de computadores recebidos da comunidade em um Telecentro j que não tem condições de uso.

Dados de orçamento:

- w_t Orçamento para manutenção do programa no período t
- W_t Orçamento para a abertura de CRCs no período t

Dados do processo de recuperação dos computadores nos CRCs:

- s Porcentagem de material não recuperado (pós processamento) que deve ser encaminhado para as empresas recicladoras

Dados de estoque inicial:

- $e0_j$ Estoque inicial de equipamentos no Telecentro j



$p0_i$ Quantidade de material processado no CRC i no período $t=0$

$n0_i$ Quantidade de material processado no CRC i no período $t=0$

Dados de demanda:

d_{jt} Demanda do TC j no período t (porcentagem de material enviado ao CRC que deve voltar depois de reconicionado)

$d0_j$ Entrega agendada para TC j o primeiro período

g_{it} Demanda por doação no ponto de doação $i \in D$ no período t

$g0_j$ Entrega agendada para o ponto de doação $i \in D$, remanescente de um planejamento anterior

Variáveis:

x_{jit} Quantidades transportadas nos arcos da rede, $(j, i) \in A$

y_{imt} Indica se o CRC i é aberto com a alternativa de capacidade m em t ($y_{it}=1$) ou não ($y_{it}=0$)

p_{it} Material processado no CRC i no período t

n_{it} Material não processado no CRC i no período t

e_{jt} Estoque de material no Telecentro j no período t

z_{it} Demanda não atendida no prazo no ponto de doação $i \in D$ no período t

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} f_{im} \cdot (y_{imt} - y_{imt-1}) + \sum_{(j,i) \in A} \sum_{t \in T} c_{ji} \cdot x_{jit} \\ & + (\delta + \beta) \cdot \left(\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} n_{it} \right) + \gamma \cdot \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} z_{jt} \quad (4.18) \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} = (1 - h_j) \cdot e_{jt-1} - e_{jt} + a_{jt} + \sum_{(l,j) \in A} x_{ljt}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{jit} \geq \alpha_{jt} a_{jt}, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.19)$$



$$e_{jt} \geq l_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.3)$$

$$e_{jt} \leq u_j, \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.4)$$

$$x_{ijt} \geq d_{jt} \cdot x_{jit-1}, \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (4.20)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} \leq \sum_{m \in M} (CR \cdot b_{im} - Gov) \cdot y_{imt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.21)$$

$$p_{it} + n_{it} = \sum_{(j,i) \in A} x_{jit} + \sum_{m \in M} Gov \cdot y_{imt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.22)$$

$$p_{it} \leq \sum_{m \in M} b_{im} \cdot y_{imt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.23)$$

$$(1 - s) \cdot p_{it-1} = \sum_{J \cup DI(i,j) \in A} x_{ijt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.8)$$

$$z_{jt} = g_{jt} + z_{jt-1} - \sum_{i \in I} x_{ijt}, \quad \forall j \in D, t \in T, z_{jt} = 0, \forall j \in D, t = |T| \quad (4.24)$$

$$s \cdot p_{it-1} + n_{it-1} = \sum_{(i,k) \in A} x_{ikt}, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.9)$$

$$y_{imt} \geq y_{imt-1}, \quad \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (4.25)$$

$$\sum_{m \in M} y_{imt} \leq 1, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.26)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} f_{im} \cdot (y_{imt} - y_{imt-1}) \leq W_t, \quad \forall t \in T \quad (4.27)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} x_{jit} + \sum_{(i,k) \in A} x_{ikt} \leq w_t, \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.11)$$

$$y_{imt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, m \in M, t \in T \quad (4.29)$$

$$x_{ijt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (4.14)$$

$$p_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.15)$$

$$n_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4.16)$$

$$e_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (4.17)$$

$$z_{it} \geq 0 \quad \forall i \in D, t \in T \quad (4.30)$$



A nova função objetivo, descrita em (4.18), agora considera a abertura de CRCs de capacidade m . Para cada m -ésima opção de capacidade, está associado um custo de instalação, que pode, ou não, ser proporcional à capacidade dada, ao local da possível abertura de um CRC, dentre outros fatores. Quando se consideram opções discretas de capacidade, há um aumento considerável do número de variáveis binárias do problema, sendo m vezes o número de variáveis binárias da formulação de fluxos em redes. A segunda e a terceira parcelas da função objetivo, que consideram os custos de transporte na rede logística e os custos de não processamento de material, permanecem inalteradas. Uma quarta parcela foi adicionada, para representar a penalidade por atraso na entrega de computadores solicitados para doação.

As restrições (4.2) a (4.20) fazem o balanço de massa nos TCs. A restrição (4.2) garante que tudo que entra em um dado TC em um dado período seja igual ao que sai desse mesmo TC. A restrição (4.19) garante a possibilidade de aproveitamento direto dos computadores doados pela comunidade aos TCs. As restrições (4.3) e (4.4), garantem a manutenção dos níveis mínimo e máximo que um TC comporta, por todos os períodos de planejamento. As restrições descritas em (4.20) garantem que a demanda por computadores recondicionados nos TC sejam atendidas em todos os períodos.

As restrições (4.21) a (4.9) garantem o balanço de massa para os CRCs. As restrições (4.21) garantem que a quantidade de material recebido em um CRC aberto, em cada período, respeite a sua capacidade de recebimento, que é proporcional à sua capacidade de processamento, que agora considera as diferentes alternativas discretas e desconta o material que é enviado pelo Governo Federal, *Gov*. As restrições mostradas em (4.22) garantem que a soma do material que é processado com o material não processado seja igual ao recebimento a partir dos TCs acrescido do material enviado pelo Governo Federal.

Em (4.23), garante-se que a quantidade de material processado em um CRC, em todos os períodos, deve respeitar a capacidade da alternativa discreta escolhida para o referido CRC. As restrições (4.8) garantem que o material que é processado e recuperado dever ser enviados de volta para os TCs e para doação. As restrições (4.24)



estabelecem que as demandas para doação devem ser atendidas, mesmo que atrasada e de forma fracionada ao longo do horizonte de planejamento. Em (4.9), garante-se que o material processado e não recuperado, mais o material não processado em um CRC em cada período, deve ser enviado para as recicladoras.

As restrições (4.25) e (4.26) cercam as últimas condições para a abertura de um CRC. Em (4.25), garante-se que um CRC aberto, para uma determinada alternativa discreta de capacidade, deve permanecer aberto por todo o horizonte de planejamento. As restrições (4.26), por sua vez, garantem que apenas uma alternativa discreta de capacidade pode ser selecionada para cada CRC em cada período.

As restrições (4.27) e (4.11) estabelecem as restrições de orçamento do projeto, em cada período, para a abertura de novos CRCs, considerando as alternativas discretas de capacidade, e para o transporte de material na rede logística reversa, respectivamente. As demais restrições, (4.29), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.30) estabelecem os domínios das variáveis. As variáveis descritas em (4.29), que são binárias, agora possuem um índice adicional, para considerar as alternativas discretas de investimento. As variáveis descritas em (4.30) representam as entregas em atraso de material nos pontos de doação. As demais permanecem as mesmas da formulação de fluxos em rede apresentada na seção 4.2. O modelo resultante da adição de alternativas discreta apresenta $|T|(|A|+2|I|+|I||M|+|J|+|D|)$ variáveis, sendo $|I||M|T|$ binárias, e $|T|(3|J|+7|I|+|I||M|+|I||J|+|D|+2)$ restrições.



5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os modelos propostos neste trabalho, assim como o modelo proposto por Oliveira (2014), foram implementados na linguagem de modelagem AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2002) e os testes foram realizados com dois *softwares* de otimização, o AMPL/CLPEX 11.1 e o *software* livre GNU GLPK 4.8. E como plataforma foi utilizado um computador Intel(R) Core(TM) i7-4500 CPU @ 1.80GHz 2.40 GHz, sistema operacional Windows 10.

5.1 Experimentos com Dados Ilustrativos

Para se testar os modelos de Oliveira (2014) e propostos no presente trabalho, foi utilizado um exemplo ilustrativo, com $|J| = 3$, $|I| = 3$, $|K| = 1$ e $|D| = 1$, distribuídos ao longo da rede logística do programa “Computadores para Inclusão”, conforme ilustrado na Figura 4. Os custos nos arcos são apresentados no grafo, sendo que os custos diretos e reversos entre os TCs e os CRCs são simétricos. A partir dos CRCs, tanto para os pontos de reciclagem como de doação, o fluxo é permitido apenas no sentido direto.

Em um planejamento de $|T| = 6$ períodos de planejamento, as quantidades de computadores usados recebidos nos TCs e doados pela comunidade em cada período foram consideradas constantes e com valor igual a 50 kg. Em cada TC, as quantidades de computadores mantidos devem estar entre 20 kg e 100 kg, em todos os períodos. As quantidades enviadas pelo Governo Federal para os CRCs abertos foram consideradas constantes e iguais a 10 kg. A taxa de deterioração dos computadores nos TCs foi considerada $h = 0,05$ na formulação em redes propostas, sendo que este valor, em termos do modelo de Oliveira (2014) equivale a $h = 50 \times 0,05 = 2,5$ kg de computadores deteriorados em cada TC a cada período.

Para a abertura dos CRCs, foram considerados como capacidade de processamento b , para cada um dos candidatos a CRC os seguintes valores: 5000 kg, 1000 kg e 1500 kg, respectivamente, para os CRCs 1, 2 e 3. A capacidade de



recebimento CR foi considerada três vezes maior que a capacidade de processamento. A porcentagem de material não recuperado $s = 0,7$.

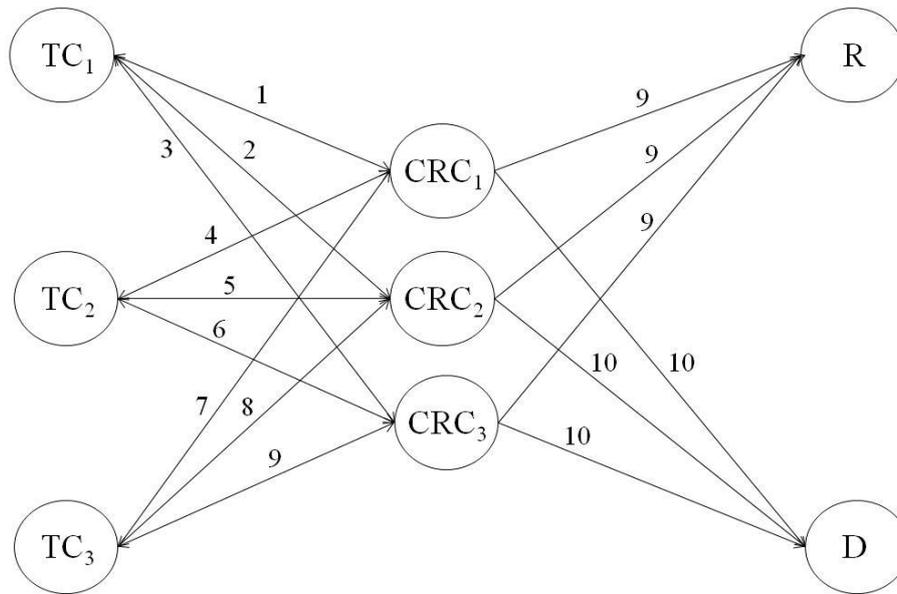


Figura 3. Rede de Logística Reversa Hipotética para o programa “Computadores para Inclusão”

Os custos de abertura dos CRCs foram considerados como R\$ 1.500.000,00, R\$ 3.000.000,00 e R\$ 4.500.000,00, respectivamente. Os custos de não processamento de material $\delta + \beta = \text{R\$ } 1.000,00 + \text{R\$ } 10.000,00 = \text{R\$ } 11.000,00$ e o custo de não retorno de material recuperado para os TCs, para compatibilizar a proposta de modelagem em fluxos em redes com a formulação de Oliveira (2014), além dos custos descritos no grafo, no modelo de Oliveira, utilizou-se um valor de $\alpha = 1$.

5.1.1 Resultados de Oliveira (2014)

A solução ótima foi encontrada, e é de R\$1.507.909,50. Foram elaboradas algumas tabelas para melhor compreensão dos resultados. Foi escolhido para abrir o CRC 1, que abriu no primeiro período e permaneceu aberto durante todo o horizonte de planejamento. As quantidades de computadores enviadas, tanto pelo Governo como pelos TCs, aos CRCs são mostradas na Tabela 1.



Tabela 1. Quantidade de computadores enviados ao CRC1

| Período | x_{ijt} (kg) | | | Total de material no CRC1 (kg) |
|---------|----------------|------|------|--------------------------------|
| | TC1 | TC2 | TC3 | |
| 1 | 50 | 50 | 50 | 160 |
| 2 | 50 | 50 | 50 | 160 |
| 3 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 167,5 |
| 4 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 167,5 |
| 5 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 167,5 |
| 6 | 52,5 | 52,5 | 52,5 | 167,5 |

Fonte: a autora

Do total de computadores enviados ao CRC1, não houve material que não foi processado, isto é, $yn_{jt} = 0$, para todos os períodos. Todo o material processado foi enviado aos TCs. Assim, $m_{jt} = 0$, para todo j e todo t , que é o material processado e recuperado no CRC1 que não é encaminhado ao TC. Isso significa que, como pode ser observado na Tabela 2, não houve envio para doação. Também se observa que só foram enviados computadores para os TCs a partir do período 2, que respeita a condição imposta no modelo para o retorno de material somente a partir de $t > q$.

Tabela 2. Quantidade de computadores que o CRC1 envia para as entidades

| Período t | R (y_{jkt}) (Kg) | TC1(n_{1t}) | TC2 (n_{2t}) | TC3(n_{3t}) | Total (yp_{jt}) |
|-------------|----------------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|
| | | (Kg) | (Kg) | (Kg) | (Kg) |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 112 | 38 | 5 | 5 | 160 |
| 4 | 112 | 0 | 2,5 | 45,5 | 160 |
| 5 | 117,25 | 0 | 50,25 | 0 | 167,5 |
| 6 | 117,25 | 15,5 | 34,75 | 0 | 167,5 |

Fonte: a autora

E, por fim, a Tabela 3 mostra as quantidades de computadores nos TCs em cada período t . Os estoques nos TCs 1, 2 e 3, no período 2, não estão de acordo com os parâmetros d e l , que estabelecem as quantidades mínimas e máximas para garantir o funcionamento dos CRCs. Como esses dados foram considerados como 20 kg e 100 kg, respectivamente, verifica-se que no segundo período, todos os TCs estão com



quantidades de computadores inferiores à quantidade mínima necessária ao seu funcionamento.

Essa incoerência do modelo foi mostrada na seção 4.2, estando relacionada à restrição (2.3). Apesar desse resultado violar uma premissa básica do problema, o modelo retorna essa solução como solução ótima, pois, como já comentado, ocorre desconto da quantidade de computadores nos TCs no período 2 por deterioração, de acordo com a restrição (2.3), sem que essa quantidade de computadores seja enviada para um CRC, de acordo com a restrição (2.2). Dessa forma, essa quantidade de computadores não faz parte do balanço de massa nos TCs.

Tabela 3. Quantidade de computadores no TC (v_{it})

| Período t | TC1 (Kg) | TC2 (Kg) | TC3 (Kg) |
|-------------|----------|----------|----------|
| 1 | 20 | 20 | 20 |
| 2 | 17,5 | 17,5 | 17,5 |
| 3 | 53 | 20 | 20 |
| 4 | 50,5 | 20 | 63 |
| 5 | 48 | 67,75 | 60,5 |
| 6 | 61 | 100 | 58 |

Fonte: a autora

5.1.2 Resultado do modelo de fluxo em redes

Para o a formulação baseada em fluxos em redes, a solução ótima encontrada foi de R\$1.506.070,697. O CRC1 foi aberto no período 3 e permanece aberto por todo o horizonte de planejamento. Na Tabela 4, podem ser vistas as quantidades de computadores enviadas aos CRCs, tanto pelo Governo como pelos TCs, que recebem da comunidade.

Depois de processar o material, o CRC envia os equipamentos processados para os TCs, ou para as Recicladoras. As recicladoras também recebem os materiais não



processados, $n_{it} = 0$, para todo i e para todo t . O CRC aberto só envia material ao TC1 que é o mais próximo dele, como mostra a Tabela 5.

Tabela 4. Quantidade de computadores enviados ao CRC1

| Período t | x_{jit} | | | | Total de material no CRC1(Kg) |
|-------------|-----------|---------|---------|---------|-------------------------------|
| | Gov(Kg) | TC1(Kg) | TC2(Kg) | TC3(Kg) | |
| 1 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 2 | 10 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 3 | 10 | 42,625 | 42,625 | 42,625 | 137,875 |
| 4 | 10 | 45 | 45 | 45 | 145 |
| 5 | 10 | 88,5 | 45 | 45 | 188,5 |
| 6 | 10 | 101,55 | 45 | 45 | 191,55 |

Fonte: a autora

Tabela 5. Quantidade de computadores CRC1 envia para

| Período t | R (x_{ikt}) (Kg) | TC1(x_{1ji}) | TC2 (x_{2ji}) | TC3(x_{3ji}) | Total (p_{it}) |
|-------------|----------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| | | (Kg) | (Kg) | (Kg) | (Kg) |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 137,875 |
| 4 | 96,5125 | 0 | 0 | 0 | 145 |
| 5 | 101,5 | 43,5 | 0 | 0 | 188,5 |
| 6 | 131,95 | 56,55 | 0 | 0 | 201,55 |

Fonte: a autora

Diferente do caso do modelo de Oliveira (2014), o novo modelo de fluxo em redes garante que as quantidades máximas e mínimas, parâmetros l e u , respectivamente, necessárias para a utilização dos TCs sejam respeitadas. A Tabela 6 mostra esses resultados.

A Tabela 7 apresenta um resumo comparativo entre o modelo de Oliveira (2014) e a reformulação baseada em fluxos em redes proposta neste trabalho. É possível verificar que o número de variáveis binárias da formulação de fluxos em redes é a metade daquela encontrada para o modelo de Oliveira (2014). Isso mostra uma



vantagem computacional do modelo proposto neste trabalho em relação à formulação de Oliveira (2014), visto que ambas as formulações são NP-difíceis.

Tabela 6. Quantidade de computadores no TC (e_{jt})

| Período t | TC1(Kg) | TC2(Kg) | TC3(Kg) |
|-------------|---------|---------|---------|
| 1 | 50 | 50 | 50 |
| 2 | 97,5 | 97,5 | 97,5 |
| 3 | 100 | 100 | 100 |
| 4 | 100 | 100 | 100 |
| 5 | 100 | 100 | 100 |
| 6 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: a autora

Outro ponto importante é que a formulação de Oliveira (2014) viola a premissa de manutenção de um estoque mínimo de computadores em cada TC no segundo período do horizonte de planejamento. O balanço de massa da rede de logística reversa proposto por Oliveira (2014) também não pode ser visto como um sistema conservativo, muito embora, de acordo com as premissas, o sistema deveria conservar sua quantidade de massa, ao longo da rede e ao longo dos períodos.

Tabela 7. Comparação entre o Modelo de Oliveira (2014) e o modelo de fluxo em redes

| Modelo | Restrições | Variáveis | Variáveis Binárias | Função Objetivo (R\$) |
|-----------------|------------|-----------|--------------------|-----------------------|
| Oliveira (2014) | 193 | 234 | 36 | 1.507.909,5 |
| Fluxos em redes | 175 | 216 | 18 | 1.506.070,697 |

Fonte: a autora

Ao se analisar o número de restrições e de variáveis não negativas, não há diferença significativa de porte entre as duas formulações. As diferenças de valor em relação às duas funções objetivo é de apenas 0,12% do valor da função objetivo da formulação de fluxos em redes.

Assim, apesar de haver diferenças nas premissas e nos fluxos observados na solução ótima, é possível considerar que os dois problemas possuem um alto grau de



semelhança, no que se refere à representação do sistema real estudado. Porém, espera-se que a formulação baseada em fluxos em redes apresente menor complexidade computacional.

5.1.3 Modelo de fluxo em redes com avaliação de alternativas discretas

Com o propósito de testar a coerência do modelo de fluxo em redes com avaliação de alternativas discretas de investimento, os dados do modelo baseado em fluxos em redes foram adaptados, agora levando em consideração alternativas discretas de capacidade para os candidatos à abertura dos CRCs e demandas nos pontos de doação e nos TCs.

A solução ótima encontrada foi de R\$ 576.950,4211 e foram abertos de 2 CRCs, primeiro o CRC1, de tamanho Médio que é aberto no primeiro período, e o CRC2, de tamanho Pequeno, que abriu no segundo período e depois permaneceram abertos por todo o horizonte de planejamento, de acordo com a restrição (4.25). A restrição (4.26) também é respeitada, devido ao fato de que foi escolhido apenas um tipo de CRC para ser aberto. Os CRCs recebem material de duas maneiras, a comunidade envia aos TCs e esses repassam aos CRCs, e o Governo Federal que envia os materiais diretamente aos CRCs. A Tabela 8 apresenta o fluxo de chegada desses materiais.

As Tabelas 9 e 10 mostram o fluxo de material processado dos CRCs 1 e 2 em cada período t , que estão abertos, e para qual entidade foram enviados os materiais. Existe a entrega de materiais dos CRCs aos pontos de doação, isso é assegurado pela restrição (4.24), que garante que essa demanda seja entregue, mesmo que em atraso. O CRC1 apresenta quantidades muito maiores de materiais processados e enviados, isso se dá ao fato de ele ser de médio porte, enquanto que o CRC2 é de pequeno porte.

Assim as Tabelas 11 e 12 mostram o fluxo total de material que passa pelos CRCs, seja ele processado, ou não, para todos os períodos em que estão abertos. As colunas 1 e 2, representam a quantidade de material processada nos CRCs e a coluna 3 o material não processado que tem destinação direta para as recicladoras. A última coluna representa a soma de todos os materiais processados e os não processados, que devem



respeitar a capacidade de processamento de cada CRC de acordo com seu porte. As capacidades de processamento dos CRCs 1 e 2 que foram abertos são, respectivamente, 600 e 150 Kg, e foram respeitadas durante todos os períodos.

Tabela 8. Chegada de material no CRCs e nos TCs

| Período <i>t</i> | GovCRC (Kg) | Comunidade - TC1 (Kg) | Comunidade - TC2 (Kg) | Comunidade - TC3 (Kg) |
|------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 30 | 250 | 150 | 200 |
| 2 | 30 | 20 | 40 | 120 |
| 3 | 30 | 45 | 70 | 150 |
| 4 | 30 | 180 | 210 | 350 |
| 5 | 30 | 75 | 200 | 30 |
| 6 | 30 | 80 | 20 | 100 |

Fonte: a autora

Tabela 9. Fluxo de material processado do CRC1

| Período <i>t</i> | CRC1 - TC1 (Kg) | CRC1 - TC2 (Kg) | CRC1 - TC3 (Kg) | CRC1 - DO1 (Kg) | CRC1-DO2 (Kg) |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 57,500 | 25 | 20 | 0 | 29,5 |
| 3 | 19,125 | 15,375 | 18,5 | 0 | 19,6 |
| 4 | 15,781 | 20,4688 | 25,625 | 21 | 0,375 |
| 5 | 46,195 | 50,4922 | 47,4063 | 0 | 26,9063 |
| 6 | 45,922 | 61,3105 | 4,35156 | 0 | 12,1187 |

Fonte: a autora

Tabela 10. Fluxo de material processado do CRC2

| Período <i>t</i> | CRC2 - TC1 (Kg) | CRC2 - TC2 (Kg) | CRC2 - TC3 (Kg) | CRC2 - DO1 (Kg) | CRC2 -DO2 (Kg) |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 |
| 5 | 0 | 0 | 22,5 | 0 | 13,5 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 |



As Tabelas 11 e 12, possuem uma linha a mais para a coluna de Total de Material, esse número representa a quantidade de estoque inicial de CRC no próximo período.

Tabela 11. Total de material processado e não processado no CRC1

| Período t | Material Processado (Kg) | | Material não processado (Kg) | Total de Material (Kg) |
|-------------|--------------------------|--------|------------------------------|-----------------------------------|
| | TC e DO | CRC1-R | CRC1 – R | Total de material que sai do CRC1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 132 | 308 | 0 | 440 |
| 3 | 72,6 | 169,4 | 0 | 242 |
| 4 | 83,250 | 194,25 | 36,375 | 313,875 |
| 5 | 171 399,005 | | 0 | 570,005 |
| 6 | 123,703 288,641 | | 0 | 412,344 |
| - | - | - | - | 255,483 |

Fonte: a autora

Tabela 12. Total de material Processado e não Processado no CRC2

| Período t | Material Processado (Kg) | | Material não processado (Kg) | Total de material (Kg) |
|-------------|--------------------------|----------|------------------------------|-----------------------------------|
| | CRC2 - TC e DO | CRC2 - R | CRC1 – Recicladora | Total de material que sai do CRC1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 9 | 21 | 0 | 30 |
| 4 | 9 | 21 | 0 | 30 |
| 5 | 36 | 84 | 0 | 120 |
| 6 | 9 | 21 | 0 | 30 |
| - | - | - | - | 30 |

Fonte: a autora

A Tabela 13 mostra a quantidade de estoque em todos os períodos do horizonte, considerando um estoque inicial zero.

A restrição (4.24) assegura uma demanda por doação, mesmo que seja em atraso. Na tabela 14 é comprovada a veracidade de tal restrição, já que ela apresenta a



quantidade de computadores armazenadas em cada período a espera por serem entregues. No último período não existe quantidade em espera, que assegura não existir doações pendentes.

Tabela 13. Quantidade de computadores no TC (e_{jt})

| Período t | TC1(Kg) | TC2(Kg) | TC3(Kg) |
|-------------|---------|---------|---------|
| 1 | 20 | 50 | 120 |
| 2 | 20 | 50 | 120 |
| 3 | 20 | 50 | 120 |
| 4 | 30 | 75 | 150 |
| 5 | 30 | 75 | 150 |
| 6 | 30 | 75 | 146,852 |

Fonte: a autora

Tabela 14. Quantidades de computadores que faltam ser entregues para doação (z_{jt})

| Período t | DO1(Kg) | DO2(Kg) |
|-------------|---------|---------|
| 1 | 0 | 100 |
| 2 | 0 | 70,5 |
| 3 | 21 | 70,9 |
| 4 | 0 | 61,525 |
| 5 | 0 | 21,1187 |
| 6 | 0 | 0 |

Fonte: a autora

O modelo de fluxo em redes com avaliação de alternativas discretas cumpre todas as adaptações propostas e se torna um modelo bem mais próximo à realidade que o modelo de Oliveira (2014).

5.2 Coleta e Análise de Dados para o Projeto “Computadores para Inclusão”

Como os dados utilizados por Oliveira (2014) eram de TCs espalhados por todo o país, sendo 80 TCs Nucleados, 80 candidatas a CRCs, em um período de 48 meses,



foram necessários alguns ajustes para se considerar somente a região Sudeste, no mesmo período. Então, foram filtrados os dados já existentes.

Os novos conjuntos de dados são: 25 TCs, 25 CRCs candidatos a abertura, 19 recicladoras e apenas um ponto de doação. O conjunto A representa todos os arcos, onde ocorre o fluxo de materiais. A quantidade mínima e máxima, que um TC necessita para funcionar são respectivamente, 75 e 90 computadores por mês. A capacidade de recebimento dos TCs é 3 vezes maior que sua capacidade de processamento. E a quantidade enviado pelo governo aos CRCs é considerada 50 computadores.

Na região Sudeste existem 25 cidades que possuem TCs e apenas dois CRCs já abertos, como pode ser visto na Tabela 15.

São considerados 25 CRCs que podem ser abertos, e o custo de abertura de cada CRC (R\$) pode ser observado na Tabela 16. Onde o custo de abertura é zero, significa que o CRC já está aberto. Ainda é possível observar a capacidade de todos os CRCs, que é considerada a mesma em todo o horizonte de planejamento, e é medido em Kg.

Foi considerado para o horizonte de planejamento uma quantidade em Kg fixa de quantidade recebida pelos TCs. E ainda deve-se considerar a taxa de deterioração dos computadores em todos esses períodos. Segue as informações na Tabela 17.

Com relação as distâncias entre os TCs e CRCs, dos CRCs e recicladoras, CRCs e doações, todos esses dados foram multiplicados pelo parâmetro de custo *gama*, e assim tornar mais próximo a reformulação com o modelo original de Oliveira (2014).



Tabela 15. Cidades que possuem TCs e CRCs na região Sudeste

| CIDADES | TCS | CRCs |
|-------------------|------------|-------------|
| Vitória | TC18 | |
| Vila Velha | TC19 | |
| Vitória | TC20 | |
| Belo Horizonte | TC29 | |
| Belo Horizonte | TC30 | |
| Belo Horizonte | TC31 | |
| Uberaba | TC32 | CRC32 |
| Rio de Janeiro | TC45 | |
| Rio de Janeiro | TC46 | |
| Niterói | TC47 | |
| Iguaçu | TC48 | |
| Rio de Janeiro | TC49 | |
| Teresópolis | TC50 | |
| São Paulo | TC65 | |
| São Paulo | TC66 | |
| Amparo | TC67 | |
| Bragança Paulista | TC68 | |
| Campinas | TC69 | |
| Diadema | TC70 | |
| Guarulhos | TC71 | CRC71 |
| Indaiatuba | TC72 | |
| Osasco | TC73 | |
| Piracicaba | TC74 | |
| Santos | TC75 | |
| Santo André | TC76 | |

Fonte: a autora



Tabela 16. Dados de custos e capacidades quando se considera a abertura de CRCs

| CRCs | CUSTO DE ABERTURA(R\$) | Capacidade de processamento (Kg) |
|-------------|-------------------------------|---|
| CRC18 | 640000 | 1800 |
| CRC19 | 640000 | 1800 |
| CRC20 | 640000 | 1800 |
| CRC29 | 320000 | 1800 |
| CRC30 | 320000 | 1800 |
| CRC31 | 320000 | 1800 |
| CRC32 | 0 | 1800 |
| CRC45 | 640000 | 1800 |
| CRC46 | 640000 | 1800 |
| CRC47 | 640000 | 1800 |
| CRC48 | 640000 | 1800 |
| CRC49 | 640000 | 1800 |
| CRC50 | 640000 | 1800 |
| CRC65 | 640000 | 1800 |
| CRC66 | 640000 | 1800 |
| CRC67 | 640000 | 1800 |
| CRC68 | 640000 | 1800 |
| CRC69 | 640000 | 1800 |
| CRC70 | 640000 | 1800 |
| CRC71 | 0 | 1800 |
| CRC72 | 640000 | 1800 |
| CRC73 | 640000 | 1800 |
| CRC74 | 640000 | 1800 |
| CRC75 | 640000 | 1800 |
| CRC76 | 640000 | 1800 |

Fonte: a autora



Tabela 17. Dados dos TCs da região Sudeste

| TELECENRO | QUANTIDADE DE MATERIAL RECEBIDA (Kg) | QUANTIDADE DE DETERIORAÇÃO |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------|
| TC18 | 135.6 | 9 |
| TC19 | 345.4 | 9 |
| TC20 | 135.6 | 9 |
| TC29 | 659.8 | 9 |
| TC30 | 659.8 | 9 |
| TC31 | 659.8 | 9 |
| TC32 | 246.7 | 9 |
| TC45 | 1756.4 | 9 |
| TC46 | 1756.4 | 9 |
| TC47 | 406.1 | 9 |
| TC48 | 662.7 | 9 |
| TC49 | 1756.4 | 9 |
| TC50 | 136.5 | 9 |
| TC65 | 4685.2 | 9 |
| TC66 | 4685.2 | 9 |
| TC67 | 54.9 | 9 |
| TC68 | 122.2 | 9 |
| TC69 | 900.8 | 9 |
| TC70 | 321.7 | 9 |
| TC71 | 1018.6 | 9 |
| TC72 | 168.2 | 9 |
| TC73 | 555.3 | 9 |
| TC74 | 304.1 | 9 |
| TC75 | 349.8 | 9 |
| TC76 | 561.6 | 9 |

Fonte: a autora

5.3 Testes com Instâncias Realistas do modelo de fluxo em redes

A aplicação da abordagem de fluxos em redes ao problema do programa ‘Computadores para a Inclusão’ para a região Sudeste resultou em um problema com



12.024 restrições, 88.800 variáveis, das quais 1.220 são binárias, e a solução ótima foi encontrada em 15 minutos e 47 segundos no *software* GLPK. Com o AMPL/CPLEX, a solução ótima foi obtida em 7,959 s. Isso mostra que, para os dados do Sudeste, ambos os *softwares* obtêm a solução ótima em tempo computacional aceitável. O custo total da função objetivo foi de R\$ 112.680.820,00. Desse custo, R\$ 5.440.000,00, aproximadamente 4,82%, do orçamento gasto com a abertura dos novos CRCs. Foram abertos 9 novos CRCs, somando aos dois que já estavam em funcionamento, deu um total de 11 CRCs abertos.

Todos eles foram abertos no período 1 e se mantiveram abertos por todo o horizonte de planejamento, como já esperado. Pode-se observar que a cidade do Rio de Janeiro foi a única que recebeu dois CRCs, isso também pode ser visto na solução de Oliveira (2014), para todo o país, onde o modelo determina que sejam abertos 3 CRCs no Rio de Janeiro, mais que em todas as outras cidades. Os resultados podem ser vistos na Tabela 18.

As Tabelas 19 e 20 mostram o fluxo de material que os TCs enviam aos CRCs, e quais Recicladoras e TCs são atendidos por determinados CRCs, respectivamente.

5.4 Testes com Instâncias Realistas do modelo de Oliveira (2014)

O modelo de Oliveira foi testado com os mesmos dados que a formulação de fluxos em redes. No entanto, não foi possível se obter a solução ótima para o problema. O modelo foi testado e, mesmo com 4 horas de processamento, a solução ótima não foi obtida. Então, foi realizada uma bateria de testes, em que o tempo de processamento do AMPL/CPLEX foi limitado no mesmo tempo necessário para a obtenção ótima do modelo de fluxos em redes, que foi de 7,959 s. Depois, outros testes foram sendo realizados, com o limitante de tempo sendo igual ao dobro, ao triplo do tempo utilizado para obtenção ótima do modelo de fluxos em redes. E assim por diante, até a realização de 10 testes. Como pode ser visto na Tabela 21, o melhor GAP de otimalidade obtido, foi de 0,57%, mas depois disso, o algoritmo de *brach-and-cut* não consegue avançar.



Tabela 18. CRCs selecionados para abertura e custo dos mesmos

| CIDADE | CRCs selecionados para abertura | Custo de abertura (R\$) |
|--------------------|--|--------------------------------|
| Belo Horizonte | CRC31 | 320000,00 |
| Uberaba | CRC32 | 0,00 |
| Rio de Janeiro | CRC45 | 640000,00 |
| Rio de Janeiro | CRC46 | 640000,00 |
| São Paulo | CRC65 | 640000,00 |
| São Paulo | CRC66 | 640000,00 |
| Amparo | CRC67 | 640000,00 |
| Diadema | CRC70 | 640000,00 |
| Guarulhos | CRC71 | 0,00 |
| Indaiatuba | CRC72 | 640000,00 |
| Osasco | CRC73 | 640000,00 |
| Total gasto | | 5440000,00 |

Fonte: a autora

Tabela 19. Fluxo de materiais dos TCs aos CRCs

| TC | CRC | TC | CRC |
|-----------|------------|-----------|------------|
| TC18 | 31 | TC65 | 66,67,70 |
| TC19 | 71 | TC66 | 66,67,71 |
| TC20 | 71 | TC67 | 67 |
| TC29 | 31 | TC68 | 67 |
| TC30 | 31 | TC69 | 72 |
| TC31 | 31 | TC70 | 70 |
| TC32 | 32 | TC71 | 71 |
| TC45 | 45,46 | TC72 | 72 |
| TC46 | 45,46 | TC73 | 73 |
| TC47 | 45 | TC74 | 72 |
| TC48 | 71 | TC75 | 73 |
| TC49 | 45,46 | TC76 | 73 |
| TC50 | 71 | | |

Fonte: a autora



Tabela 20. Fluxos de material entre os CRCs, Recicladoras e TCs

| CRC | Recicladoras | TCs |
|-------|--------------|--|
| CRC31 | R19 | 29,30,31 |
| CRC32 | R19 | 32 |
| CRC45 | R2 | 18,19,20,47,48,50 |
| CRC46 | R2 | 18,19,20,47,48,50 |
| CRC65 | R19 | 18,19,20,29,30,31,32,67,68,70,73,74,75 |
| CRC66 | R19 | 18,19,20,29,30,31,32,67,68,73,75 |
| CRC67 | R4 | 67,72,74 |
| CRC70 | R5 | 67,70,73 |
| CRC71 | R16 | 71,75,76 |
| CRC72 | R3 | 72 |
| CRC73 | R2 | 73 |

Fonte: a autora

Na tentativa de se encontrar um GAP de otimalidade menor, outra bateria de testes foi conduzida, porém, variando-se o parâmetro que limita o tempo de processamento em intervalos de meia hora, ou seja, de 1.800 s. Até 4 h de processamento, o AMPL/CPLEX não ainda não tinha conseguido uma solução melhor para o conjunto de dados do Sudeste.

Tabela 21. GAPs para o modelo de Oliveira (2014)

| Tempo de processamento (s) | GAP final (%) | Função Objetivo (R\$) | GAP final (R\$) |
|-------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| 7,959 | 1,1 | 170.639.157,30 | 57.958.337,30 |
| 15,918 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 23,877 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 31,836 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 39,795 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 47,754 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 55,713 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 63,672 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 71,631 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |
| 79,590 | 0,57 | 169.734.102,40 | 57.053.282,40 |



O GAP de otimalidade final encontrado apresenta uma porcentagem baixa, mas a diferença entre a solução ótima para o problema de fluxos em redes é de R\$ 57.053.282,40, o que significa que o uso da formulação de Oliveira (2014) para gerir o projeto poderia gerar um consumo elevado de recursos do orçamento anual, reduzindo, assim, as possibilidades de alcance dos TCs e os investimentos em novos CRCs.

O próximo passo lógico dos experimentos computacionais seria a aplicação dos dados da região Sudeste para a formulação com alternativas discretas de investimento. Esses testes não foram realizados pela impossibilidade de obtenção de dados adicionais, além daqueles que estão descritos no trabalho de Oliveira (2014). Como a autora considera que todos os TCs são homogêneos, o resultado obtido não contemplaria vários aspectos das premissas consideradas no modelo para avaliação de alternativas discretas, como por exemplo, variações nos padrões regionais de doação de computadores aos TCs, as próprias demandas de computadores recondicionados, além de não ser possível obter, até o presente momento, dados de escolas, bibliotecas e ONGs que fazem pedidos de computadores para doações.

Outro ponto interessante em relação aos dados de Oliveira (2014) é que os padrões de doações de computadores pós-consumo pela comunidade são constantes ao longo dos 48 períodos de planejamento, além dos dados de deterioração serem homogêneos para todas as regiões do país. Assim, ao se considerar, no modelo com alternativas discretas, as porcentagens de computadores doados em perfeitas condições de uso não levaria em conta o fato de que em regiões com maior desenvolvimento econômico o ciclo de consumo desses equipamentos é mais curto. Além disso, algumas regiões têm apresentado crescimento econômico maior que a média nacional, o que em um horizonte de 48 meses de análise, vai gerar um padrão crescente de descarte desses computadores.

Diante desse contexto, optou-se por não apresentar um exemplo de teste para o modelo de alternativas discretas para o Sudeste, pois os resultados não poderiam ser condizentes com a realidade do projeto "Computadores para Inclusão" com os dados que se encontram atualmente disponíveis. Uma outra motivação para a realização desse



teste seria a possibilidade de comparação da complexidade deste modelo com o de Oliveira (2014). Mas como não foi possível se obter a solução ótima para Oliveira (2014), tudo o que se pode afirmar, neste momento é que a complexidade computacional do modelo com alternativas discretas de investimento é maior do que a do modelo de fluxos em rede proposto e menor que a do modelo de Oliveira (2014).



6 CONCLUSÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, em vigor desde 2010, incentivou a implantação e a prática de diversos programas voltados à melhor gestão do recolhimento, reaproveitamento, reciclagem e descarte de diversos tipos de resíduos, inclusive computadores considerados velhos pelos usuários. Nesse contexto, o programa "Computadores para Inclusão" teve fundamental importância para a logística reversa de materiais eletro-eletrônicos no Brasil, pois possibilitou a formação de uma rede nacional de recolhimento, recondicionamento, doação e reciclagem de materiais encontrados em computadores doados pela própria população, aliando objetivos ambientais, sócio-educativos e de inclusão digital.

Nesse contexto, Oliveira (2014) desenvolveu um importante trabalho, ao sistematizar um arcabouço teórico para o planejamento dessa rede de logística reversa, discutindo vários contextos de uso e planejamento dessa rede. Nesse mesmo trabalho, Oliveira (2014) formulou três modelos para aplicação ao referido projeto. Dentre eles, o modelo capacitado de locação-alocação multiperíodo com fluxo de retorno direcionado, que está voltado à localização CRCs, que recebem material dos TCs e fornecem material para os mesmos TCs, para doação e para empresas recicladoras. Embora muito abrangente, esse trabalho deixou algumas perspectivas interessantes de trabalhos futuros.

Dentre essas perspectivas, o presente trabalho teve como objetivo estender o modelo de Oliveira (2014) para considerar a avaliação simultânea de alternativas discretas de investimento em capacidade para os CRCs. Além disso, também se considerou interessante realizar uma análise computacional relacionada à complexidade de porte, tanto do modelo de Oliveira, quanto da sua extensão com alternativas discretas de capacidade, uma vez que ambos são pertencentes à classe NP-difícil. Porém, ao se implementar o modelo de Oliveira (2014), percebeu-se, primeiramente, que o mesmo apresenta algumas incoerências nos balanços de massa nos vértices da rede, especialmente no acoplamento entre os períodos de planejamento nos estoques dos TCs. Em um segundo momento, principalmente devido ao uso de dois conjuntos de variáveis



binárias, uma para representar o momento em que um CRC é aberto e a outra para garantir que um CRC aberto permaneça aberto, percebeu-se que o modelo de Oliveira (2014) apresentava elevada complexidade computacional, mesmo para instâncias de pequeno porte.

Essas duas descobertas motivaram uma etapa adicional da presente pesquisa, que se constituiu na reformulação do modelo de Oliveira (2014) se utilizando de uma estrutura de fluxos em redes. Com isso, o número de variáveis binárias do problema foi reduzido à metade das geradas pela formulação original. Esse resultado motivou, ainda, a adaptação dessa formulação em redes para considerar a possibilidade de reaproveitamento direto de computadores nos próprios TCs, a consideração de dados de demanda nos TCs e pontos de doação, podendo esses últimos serem atendidos com atraso, caso não haja disponibilidade de computadores reconicionados. Só depois disso, a consideração das alternativas discretas de capacidade foi incorporada ao modelo, deixando-o mais próximo da realidade do projeto e com fluxos coerentes.

Foram utilizados dados ilustrativos para mostrar a grande semelhança entre a formulação de Oliveira (2014) e a formulação baseada em fluxos em redes. Esses testes serviram para mostrar que o modelo de Oliveira (2014) viola algumas premissas básicas, como a manutenção de uma quantidade mínima de computadores nos TCs em todos os períodos. Também serviram para mostrar que a proposta baseada em fluxos em redes, apesar de muito próxima do modelo de Oliveira (2014), não é adequada à aplicação prática direta, uma vez que cada CRC só abastece o TC mais próximo, em todos os períodos.

Depois de adaptada, a mesma base de dados foi aplicada ao modelo estendido, que também considera as alternativas discretas de investimento. Esse modelo apresenta uma estrutura em redes completa, com os fluxos sendo empurrados por pontos de ofertas de computadores pós-consumo, e puxados, pelas demandas por computadores reconicionados nos TCs e nos pontos de doação. Alguns testes adicionais foram realizados com dados realistas, baseados no trabalho de Oliveira (2014), mostrando que a complexidade computacional do modelo de Oliveira (2014) o torna intratável em



contextos reais, ao passo que o mesmo não acontece com os modelos propostos neste trabalho.

Como o número de testes realizados até o momento não é suficiente para que possam ser feitas afirmações adicionais, nem sobre a aplicabilidade dos modelos propostos, nem sobre o aumento da sua complexidade computacional à medida que se aumenta o tamanho da rede do projeto "Computadores para Inclusão", sugere-se que uma bateria maior de testes seja realizada, se possível, utilizando-se dados gerados aleatoriamente, mas permitam caracterizar o comportamento do modelo quando se aumentam o número de vértices de oferta e demanda na rede, o número de candidatos à abertura de CRCs e diferentes padrões de equilíbrio entre os fluxos e a capacidade do sistema, no que diz respeito às capacidades de recebimento e processamento nos CRCs.

Outras perspectivas interessantes para a realização de trabalhos futuros incluem ainda a formulação de modelos mais complexos, que considerem, por exemplo, custos de manutenção de computadores e ofertas de cursos nos TCs, a existência de estoques dentro dos próprios CRCs, novas estruturas de custos tangíveis e intangíveis para a função objetivo, entre outras possibilidades. Também se indica o desenvolvimento de algoritmos de solução para esses modelos, podendo-se considerar tanto métodos exatos, quanto heurísticas e metaheurísticas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

+TCs **Institucional**. Disponível em: <<http://www.maisTCs.com.br/>>. Acesso: 20 de Abr 2016.

ABINEE. **Abinee- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica**. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/noticias/releases.htm>>. Acesso em: 14 de Jan 2016.

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L.; ORLIN, J. B. **Network flows: theory, algorithms, and application**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

ALUMUR, S. A. et al. Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, v.200, n. 1, p. 67-78, jul. 2012

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2007.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 1993.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. **Modelling and Simulation. Operations management research methodologies using quantitative modeling**. 2002. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22 No. 2, 2002.

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: 14 de Jan 2016.



CSCMP. **Supply Chain Management Definitions and Glossary**. Disponível em: <<https://cscmp.org/supply-chain-management-definitions>>. Acesso em: 18 de Abr 2016.

DASKIN, M. S. **Network and discrete location: models, algorithms and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

DONATO, V. **Introdução à logística: o perfil do profissional**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2010.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming**. Cole Publishing Company, 2002.

HERNÁNDEZ, C. T.; **Gerenciamento da Logística Reversa: um modelo conceitual**. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2011.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES. **Computadores para Inclusão**. Disponível em: <<http://www.governoeletronico.gov.br/acoes-e-projetos/inclusao-digital/computadores-para-inclusao/#mtopo>>. Acesso em: 14 de Jan 2016.

MINISTERIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO. **Computadores para Inclusão**. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/assuntos/logistica-e-tecnologia-da-informacao/noticias/governo-lanca-projeto-computadores-para-inclusao>>. Acesso em: 20 de Abr 2016.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Modelagem e Simulação**. In: MIGUEL, P. A. C. Metodologia de Pesquisa em engenharia de produção e Gestão de Operações. Rio de Janeiro: Campus, 2012. Pág. 169-186.



OLIVEIRA, M. G. S. **Modelo para configurações da rede Logística do programa ‘Computadores para a Inclusão’**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. 2014.

ONUBR. **Tratamento adequado de resíduos pode ser verdadeira ‘mina de ouro’, mostra estudo da ONU**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/tratamento-adequado-de-residuos-pode-ser-verdadeira-mina-de-ouro-mostra-estudo-da-onu/>>. Acesso em: 15 de Abr 2016.

PAOLESCHI, B. **Logística Industrial Integrada – Do planejamento, Produção, Custo e Qualidade à satisfação do Cliente**. São Paulo: Érica, 2009.

PROGRAMA DO FUTURO. **Ministro das Comunicações defende importância de CRCs para inclusão digital**. Disponível em: <<http://www.programandoofuturo.org.br/metarec/?m=201604>>. Acesso em: 20 de Abr 2016.

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.

SCHWARTZ FILHO, A. J. **Localização de indústrias de reciclagem na cadeia logística reversa do coco verde**. 2006. 127 f. : il. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

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.