

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

FELIPE SANCHES STARK

**CONFIGURAÇÃO DA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS  
NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Sorocaba

2015

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

**CONFIGURAÇÃO DA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS  
NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Felipe Sanches Stark

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

Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Eli Angela Vitor Toso.

**Financiamento:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

Sorocaba

2015

S795c Stark, Felipe Sanches.  
Configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no estado de São Paulo. / Felipe Sanches Stark. -- 2015.  
124 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, *Campus* Sorocaba, Sorocaba, 2015  
Orientador: Eli Angela Vitor Toso  
Banca examinadora: Douglas José Alem Junior, Ana Paula Ferreira Dias Barbosa Póvoa  
Bibliografia

1. Logística empresarial. 2. Pneumáticos. I. Título. II. Sorocaba-Universidade Federal de São Carlos.

CDD 658.5

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.

FELIPE SANCHES STARK

**"CONFIGURAÇÃO DE REDE LOGÍSTICA REVERSA DE  
PNEUS INSERVÍVEIS NO ESTADO DE SÃO PAULO"**

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

Sorocaba, 20 de março de 2015

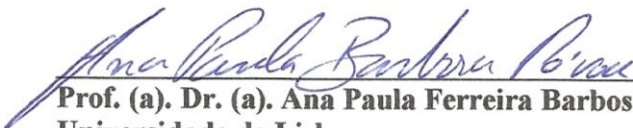
**Orientador (a):**



---

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

**Examinadores (as):**



---

**Prof. (a). Dr. (a). Ana Paula Ferreira Barbosa-Póvoa**  
Universidade de Lisboa



---

**Prof. (a). Dr. (a). Douglas José Alem Júnior**  
DEP/UFSCar

*Dedico este trabalho à Deus e a vida, pois da vida vem o pensamento.*

*Aos meus pais, Marli e Vicente, pelo apoio em toda minha carreira acadêmica.*

*À minha segunda mãe, Marcia, por todos os dias que me suportou nessa jornada.*

*À minha irmã, Juliana, que apesar da distância já tinha percorrido o mesmo caminho, sendo um bom exemplo.*

*À minha namorada, Lívia, por toda a paciência nas semanas mais intensas dessa jornada, as quais mal tiveram tempo para encontra-la.*

*À todos os grandes artistas que falam suas emoções através da música, pois a música deles me acompanhou nos momentos mais solitários da pesquisa, durante os estudos para as provas e trabalhos.*

## **AGRADECIMENTO**

*Agradeço a força que nos concedeu a vida pela oportunidade de desenvolver este trabalho e durante o caminho poder conhecer não somente outras pessoas como também mais de mim mesmo.*

*A gradeço à minha orientadora Eli, pela sua orientação, paciência e confiança para comigo e que foi essencial durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Aprendi muito com ela e essa aprendizagem é algo imensurável. Espero que este trabalho possa representar o quanto aprendi com ela.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSCar – Sorocaba. Aos professores, pelo conhecimento e respeito. À Erica, pelo auxílio e gentileza em tudo que precisei como discente.*

*Aos membros da banca de avaliação, Prof<sup>ra</sup> Ana Paula e Prof<sup>o</sup> Douglas, que dedicaram seu tempo para a leitura e avaliação deste trabalho. Suas contribuições, sem dúvida, foram essenciais para estudo.*

*A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa concedida no ano de 2013.*

*À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – pela bolsa e reserva técnica no ano de 2014-2015, através do processo 2013/227843.*

*Aos meus colegas de mestrado, Diego, pelas conversas produtivas sobre modelagem e Alfredo, por me ensinar a ser melhor na programação de modelos.*

*Ao Sr. César Faccio, da RECICLANIP, por fornecer informações via e-mail sobre alguns aspectos da rede reversa.*

*A Sr<sup>a</sup> Sandra, pelo auxílio na busca pela perfeição do inglês do texto.*

## RESUMO

STARK, Felipe S. *Configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo*. 2015. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2015.

O aumento na geração de resíduos urbanos e industriais tem ocasionado problemas de ordem ambiental e de saúde pública, e, como consequência, legislações específicas surgiram para tratar do assunto. No Brasil, a Lei Federal nº 12.350/10, da Política Nacional de Resíduos Sólidos, tornou obrigatória a logística reversa (LR) de alguns produtos, entre os quais o pneu usado sem condição de rodagem (inservível). Entretanto, a LR de pneus inservíveis já se apresentava em fase de estruturação, uma vez que resoluções ambientais propunham o tratamento do passivo deixado por anos de descarte incorreto dos pneus no meio ambiente. Atualmente, a rede reversa de pneus é administrada por associações de fabricantes e importadores, e as destinações comumente utilizadas são o coprocessamento, em fornos de cimenteira, e a recuperação da borracha e do aço como subprodutos, por meio de processos como a granulação ou a laminação. Os crescentes custos do transporte terrestre e as proposições de melhorias na rede logística tornam a configuração da rede de logística reversa de pneus como uma proposta para o total cumprimento da meta, alinhados ao planejamento que considere as questões financeiras como a minimização de custos logísticos ou maximização do lucro, enquanto cumprem as exigências dos órgãos ambientais. Esta configuração envolve decisões estratégicas essenciais, como a localização de instalações e determinação dos fluxos de materiais, sendo que muitos parâmetros estão presentes simultaneamente. O objetivo deste estudo é propor um modelo de configuração de rede logística reversa de pneus inservíveis considerando: (i) fluxos a partir da saída dos pontos de coleta (ecopontos) até as empresas destinadoras; (ii) processos como a possibilidade da triagem dos pneus usados em servíveis e inservíveis; (iii) a trituração como fase intermediária e para qual tipo de destinação enviar. São considerados ainda custos fixos para instalação de centros de armazenamento, para triagem dos pneus usados, e empresas intermediárias, para trituração e separação de componentes, além dos custos variáveis de operação, transporte e as possíveis rendas geradas com a substituição da matéria-prima ou combustível nas empresas destinadoras. O modelo apresenta formulação linear inteira mista (MILP) com múltiplos períodos. São feitos experimentos com único período, e com a variação de parâmetros. Posteriormente são estudadas restrições financeiras como orçamento anual e uma abordagem que inclui a pegada de carbono (CO<sub>2</sub>) no transporte e processamento. Os resultados encontrados apresentaram configurações que cumprem a meta e apresentam um pequeno lucro, indicando que os centros de armazenamento são preferíveis em locais afastados das destinadoras e com baixa demanda, enquanto as empresas intermediárias apresentam comportamento oposto. Quando se utilizou a pegada de carbono, verificou-se que a triagem de pneus ganha mais importância, dada a redução nas emissões do reuso ou reforma dos pneus em relação à fabricação de novos pneus.

**Palavras-chave:** Logística reversa. Pneu inservível. Pneu usado. Modelo de configuração de rede. Localização e alocação. Programação mista inteira linear.

## ABSTRACT

The increase in the municipal and industrial waste generation has caused environmental and public health problems and as a consequence laws exist to address the issue. In Brazil, with the Federal Law No. 12,350 / 10 about the “Política Nacional de Resíduos Sólidos” reverse logistics (RL) of some products has become mandatory, including waste tires. However, RL of waste tires has been structured since environmental government agency resolutions propose treatment for tires disposal incorrectly in the environment and new generation of waste tires. Currently, the reverse network is managed by the tire manufacturers and importers associations, and destinations are commonly used are co-processing in cement kilns, and the recovery of rubber and steel as secondary products, by processes such as scrapping or lamination. Increasing transportation and operation costs in the logistics network make the network design critical for the full compliance with the legal goal. This network design is aligned with a planning that considers the financial issues like the minimization of costs or the maximization of profit, while meets the requirements of environmental government agencies. So it involves key strategic decisions, as the location of facilities and material flows, taking into account many parameters simultaneously. The objective of this study is to propose a model for waste tires reverse logistics considering: (i) flows from the output of the collection points (called ‘ecopontos’) to the destination companies; (ii) the possibility of processes as the sorting of used tires in usable condition or not; (iii) the grinding process as an intermediate phase and for which type of destination the tire would be sent. Still are considered fixed costs for the installation of storage centers, for sorting used tires, and intermediary companies, for grinding and separation of components, in addition to the variable operating costs, transportation and potential revenues generated from the substitution of raw materials or fuel in destination companies. The model is a mixed integer linear problem (MILP) with multiple time periods. Experiments are done with a single and multiple periods, finally were present some sensitivity analysis. Other financial constraints as the annual budget and an approach that includes the carbon footprint (CO<sub>2</sub>) in the transport and processing are explored. The results showed configurations that meet the goal and have a small profit, indicating that storage centers are preferred in places far from destination points and low demand, while the pre-processing companies have opposite behavior. When using the carbon footprint, it was found that the sorting of used tires gain more importance in the view of reducing emissions, because there is less emission in the reuse or refurbishment compared to the manufacturing of new tires.

**Keywords:** Reverse logistics. Waste tire. Used tire. network configuration. Location and allocation model. Mixed integer linear programming (MILP).



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede logística dos pneumáticos.....	27
Figura 2- Mapa do Estado de São Paulo com destaque para os municípios com ecopontos, empresas intermediárias e destinadoras.....	30
Figura 3 - Diagrama dos fluxos básicos das atividades de LR.....	36
Figura 4 - Caso de remanufatura de pneus de caminhão.....	46
Figura 5 - - Rede logística atual. ....	54
Figura 6 - Rede logística conceitual proposta para modelagem.....	55
Figura 7 - Fluxos brutos entre os níveis da rede proposta com único período.....	72
Figura 8 - Instalações realizadas na configuração do modelo monopériodo.....	74
Figura 9 - Fluxos anuais médios entre os níveis da rede proposta com múltiplos períodos. ...	77
Figura 10 - Instalações realizadas na configuração do modelo multiperíodo. ....	80
Figura 11 - Instalações da configuração do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo com custo do crédito carbono baixo.....	97
Figura 12 - Instalações da configuração do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo com custo do crédito carbono alto.....	98
Figura 13 - Fluxos brutos médios anuais entre os níveis da rede proposta pelo modelo com crédito de carbono ao custo de € 3,3. ....	99
Figura 14 - Fluxos brutos médios anuais entre os níveis da rede proposta pelo modelo com crédito de carbono ao custo de € 16,5. ....	100
Figura 15 - Instalações em comum* entre os cenários do teste com variação na demanda...	121
Figura 16 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nas rendas. ....	122
Figura 17 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nos custos das instalações.....	123
Figura 18 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nos custos de transporte. ....	124
Figura 19 - Instalações na configuração do modelo com restrição de orçamento e diferenças entre o modelo com múltiplos períodos original. ....	125

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição média dos pneus radiais de passeio.....	22
Gráfico 2 - Quantidade de veículos no Brasil entre 1998 e 2014 (emplacados ou não). ....	32
Gráfico 3 - Uso da capacidade instalada total dos centros (C) ao longo do horizonte de 8 anos. .....	78
Gráfico 4 - Uso da capacidade instalada total das empresas intermediárias (K) ao longo do horizonte de 8 anos. ....	78
Gráfico 5 - Estoques de borracha triturada nas empresas intermediárias (k) no horizonte de 8 anos.....	81

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Tecnologia de destinação e quantidade bruta de pneus inservíveis destinados. ....	24
Tabela 2 - Resultados globais de custos, renda e instalações realizadas na configuração de rede do modelo único período. ....	71
Tabela 3 - Resultados médios anuais de custos, renda e instalações realizadas na configuração de rede do modelo multiperíodo. ....	76
Tabela 4 - Planejamento dos testes e cenários propostos. ....	83
Tabela 5 - Resultados globais anuais de custos, rendas e instalações para os cenários de variação de demanda. ....	84
Tabela 6 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações para os cenários de variação de renda. ....	86
Tabela 7 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações para o teste de dominância dos tipos de custo. ....	88
Tabela 8 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações do modelo com restrição de orçamento. ....	90
Tabela 9 - Resultados gerais médios anuais de custos, rendas e instalações do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo. ....	95
Tabela 10 - Destinações totais realizadas e emissão de carbono, no horizonte de 8 anos, nos cenários de crédito de carbono baixo e alto. ....	100
Quadro 1 - Trabalhos quantitativos revisados de rede logística reversa. ....	50

## SIGLAS

ABIDIP/ABIDIPA Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus.

ABR Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus.

ANIP Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos.

BNDES Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

CEMPRE Compromisso Empresarial para Reciclagem.

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente.

DENATRAN Departamento Nacional de Trânsito.

EPR *Extended Producer Responsibility* ou responsabilidade estendida do produtor.

GEE Gases do Efeito Estufa.

IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

LD Logística Direta (ou Tradicional).

LR Logística Reversa.

PGP Plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação de pneus inservíveis (resolução CONAMA 416/09).

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010).

SEADE Sistema Estadual de Análise de Dados.

SMA Secretaria do Meio Ambiente.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1.OBJETIVO .....	19
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
<b>2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA: A LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS</b> .....	21
2.1. AS CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS E AS FORMAS DE DESTINAÇÃO FINAL. .....	21
2.2. A REDE LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL E CARACTERIZAÇÃO DA REDE DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	25
2.3. DESAFIOS PARA A DESTINAÇÃO ADEQUADA DOS PNEUS INSERVÍVEIS ..	31
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	34
3.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS DE CONFIGURAÇÃO DE REDE DE LR ....	34
3.2. OS MOTIVADORES PARA A LOGÍSTICA REVERSA .....	37
3.3. MODELOS DE CONFIGURAÇÃO DE REDE DE LR.....	40
3.3.1. Modelos reversos.....	41
3.3.2. Modelos integrados ou de cadeia fechada.....	42
3.3.3. Modelos multiobjetivo .....	43
3.3.4. Modelos para a logística reversa de pneus .....	45
3.3.5. Síntese das características dos modelos, tendências e lacunas.....	47
<b>4. ABORDAGEM PROPOSTA PARA O PROBLEMA</b> .....	54
4.1. CONSIDERAÇÕES PARA A MODELAGEM.....	55
4.2. MODELO DE CONFIGURAÇÃO DE REDE .....	59
<b>5. ESTUDOS COMPUTACIONAIS</b> .....	67
5.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS .....	67
5.2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM UM ÚNICO PERÍODO .....	70
5.3. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM MÚLTIPLOS PERÍODOS .....	75
5.4. TESTES COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.....	83
5.4.1. Teste com variação na demanda nos ecopontos.....	84
5.4.2. Teste com a variação nas rendas .....	86
5.4.3. Teste com variação nos custos .....	88
5.4.4. Teste com restrição de orçamento para a instalação de centros de armazenamento (C).....	90
<b>6. ABORDAGEM COM CRITÉRIOS DE REDUÇÃO DA EMISSÃO CO<sub>2</sub></b> .....	92
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	102
7.1. CONCLUSÕES .....	102

7.2. PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS.....	104
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	106
<b>APENDICE A</b> – Levantamento e breve revisão da legislação vigente sobre o tema dos pneus inservíveis no Brasil e cálculos da meta legal. ....	116
<b>APÊNDICE B</b> - Dados da rede de LR de pneus inservíveis no Estado de São Paulo. ....	120
<b>APÊNDICE C</b> – Mapas com localidades em comum nos testes de variação de parâmetros	121

## 1. INTRODUÇÃO

O pneu inservível é aquele que após o uso apresenta danos estruturais irreparáveis não permitindo a rotação ou reforma (Resolução CONAMA nº 416/09), e trata-se de um resíduo que, mal gerenciado, ocasiona sérios riscos ambientais e de saúde pública, sendo assunto de legislações específicas em diversos países no mundo (LAGARINHOS, 2011). Nos pneus usados, outro grupo está presente, os pneus servíveis que podem ainda ter sua vida estendida por meio do reuso ou remanufatura.

Em aterros sanitários ou controlados, o pneu inservível, devido ao seu formato, acumula gases provenientes da decomposição de matéria orgânica, o que dificulta a compactação e prejudica a estabilidade das células de contenção de resíduos, consequentemente diminuindo a vida útil destas obras (ADHIKRI, MAITI, 2000; MOTTA, 2008). Em diversos países Europeus, assim como no Brasil, é proibida a disposição de pneumáticos em aterros (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009).

Nos depósitos a céu aberto, os pneus representam risco à saúde pública, pois se tornam criadouros para macro e micro vetores de doenças (como do mosquito *Aedes Aegypti*); e ambientais, pois ficam sujeitos a incêndios, resultam em emissões de gases como dióxido de carbono, dioxinas (substâncias altamente tóxicas e cancerígenas) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (OLIVEIRA; CASTRO, 2007). A queima de um pneu de passeio, por exemplo, libera em média 10 litros de óleo, que podem contaminar o solo e água subterrânea (MOTTA, 2008). Nas questões econômicas, o transporte é prejudicado devido à forma do produto (LAGARINHOS, 2011), e a ampla distribuição geográfica dos pneus inservíveis dificulta sua coleta (OLIVEIRA; CASTRO, 2007).

Os impactos na saúde humana e no meio ambiente são os principais motivos pelos quais surgem legislações para tratar da logística reversa dos produtos de pós-consumo. Estes instrumentos legais podem transferir a responsabilidade de gerenciamento dos produtos após o fim da vida útil às empresas produtoras e importadoras de pneumáticos, utilizando a estratégia de responsabilidade estendida do produtor (ou da sigla em inglês *EPR - Extended Producer Responsibility*), o que impacta nos custos da organização para efetuar essa destinação ambientalmente adequada.

No Brasil, a LR e a participação empresarial teve como marco a promulgação da Lei nº 12.305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), na qual acordos setoriais como de produtores de pneumáticos, baterias, lâmpadas fluorescentes, devem permitir maior eficiência na coleta e destinação de produtos no fim de vida. No setor de pneumáticos, já havia iniciativas inicializadas a partir de Resoluções do Conselho Nacional de Meio ambiente

(CONAMA) desde 1999. Atualmente, estão em vigência a Resolução CONAMA 416/09 e a Instrução Normativa nº 1/2010, ambas tratam dos aspectos operacionais relativos à LR de pneus inservíveis.

Como consequência da responsabilidade compartilhada, foi criada no Brasil uma entidade sem fins lucrativos, chamada de RECICLANIP, que é organizada pelos fabricantes de pneumáticos da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP). O objetivo da RECICLANIP é coordenar as ações de logística reversa (LR) para o cumprimento das Resoluções CONAMA e PNRs. Os importadores, representados pela Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus (ABIDIP), também promovem ações de forma análoga, mas sem uma associação específica como a dos fabricantes.

A LR de pneus inservíveis se inicia em pontos de coleta, conhecidos como ecopontos, que englobam revendedores, borracheiros ou locais criados em parceria público-privada, isto é, as prefeituras cedem o terreno e mão-de-obra, enquanto os produtores através da RECICLANIP administram o recolhimento dos pneus e cobrem custos financeiros oriundos do transporte entre os ecopontos e as destinações finais (RECICLANIP, 2013; LAGARINHOS, 2011). O material deixado nos ecopontos é enviado diretamente para empresas de destinação, que pagam pela obtenção dos pneus (caso dos recicladores) ou podem receber para dar a destinação (caso do coprocessamento). Ainda podem ocorrer casos de pré-processamento em intermediários antes da destinação, por exemplo, para o coprocessamento em fornos de cimenteiras, os pneus podem estar inteiros (configurando envio direto) ou triturados (envio indireto). A atuação da coleta e transporte não segue uma estimativa de previsão ou planejamento prévio, ocorre por meio da solicitação de recolhimento do material no ecoponto, quando se atinge 2000 pneus de passeio ou 300 de caminhão, e em seguida, recolha e envio para a destinação tem prazo de até duas semanas

No caso dos importadores, o procedimento é semelhante ao dos produtores. De acordo com a Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus – ABIDIP (2013) há ecopontos em todos os Estados e parcerias com as recicladoras, as quais são pagas para fazer a destinação dos pneus inservíveis. Entretanto, há poucas informações disponíveis sobre a localização destes pontos, uma vez que, no Relatório de Pneumáticos do IBAMA não há separação dos locais entre importadores e produtores.

De acordo com Souza e D'Agosto (2013), os custos de transporte de pneus na cadeia reversa podem chegar a 67% do custo total do sistema de logística reversa, que engloba também custos de armazenamento, manuseio e administrativos, portanto, o estudo da configuração da rede logística reversa pode auxiliar a redução destes custos.



Atualmente, a rede de logística reversa para a coleta de pneus inservíveis 1571 ecopontos (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2014). Estes pontos são heterogêneos quanto à forma de operação, pois são gerenciados por agentes diferentes, como, por exemplo, prefeituras municipais e revendedores de pneus. Conforme observado por Lagarinhos (2011), alguns pontos podem ter um processo de triagem que separe pneus ainda em condição de uso/reforma. Esta triagem é importante, pois caso contrário, estes pneus são encaminhados para a destinação antes da condição de inservíveis, o que implica em perda de capital e contribui ainda mais para a exaustão de recursos naturais. Segundo estimativa do autor, do total de pneus usados coletados no país, em média, 70% são inservíveis, enquanto 20% podem ser reformados e 10% podem ser reutilizados como pneus “meia-vida” sem qualquer reprocessamento, exceto limpeza.

Quanto ao cenário do Estado de São Paulo, há ecopontos em 218 do total de 645 municípios, totalizando 394 ecopontos disponíveis em locais como instalações de parcerias publico-privada, revendedores, borracheiros e empresas destinadoras (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2014), portanto nem todos os municípios contam com ecopontos e alguns municípios possuem mais de um ecoponto, como é o caso de São Paulo capital que conta com 25 ecopontos. A dispersão dos pontos é um fator que afeta diretamente no custo do transporte e armazenamento, primeiramente pelas próprias dimensões rodoviárias presentes no Estado e subsequentemente na escolha das áreas a serem cobertas pelos pontos no restante dos municípios não atendidos, que devem ser objeto de planejamento pelos responsáveis pelo sistema de LR conforme Resolução CONAMA 416/09.

Com relação à quantidade tratada e gerada no Estado, através do Relatório de Pneumáticos 2014 do IBAMA, observa-se que mais de 166.277 toneladas anuais de pneus considerados inservíveis são destinados nas 16 empresas cadastradas junto ao IBAMA, representando um pouco mais de 33,8% do total nacional. A geração interna estimada, com base na porcentagem. Caso haja déficit ou superávit na capacidade de tratamento dos pneus inservíveis, a carga pode ser enviada para outros Estados da Federação, representa custos adicionais no curto prazo como de transporte e tributação, além da necessidade de planejamento em longo prazo, pois a frota de veículos é crescente.

Neste sentido, a Resolução CONAMA 416/09 sugere a proximidade entre ponto de geração e local de destinação, para evitar a transferência do passivo ambiental para outra localidade, por exemplo, no caso de fronteiras administrativas. O passivo ambiental é

entendido como a obrigação de uma organização para com o meio ambiente, neste caso, até a década passada muitas empresas de pneus apresentavam passivos ambientais pelos pneus inservíveis descartados incorretamente ou que estavam em grandes depósitos à espera do tratamento adequado, mas que a partir de legislações anteriores (Apendice A) foram destinados progressivamente.

Além da sugestão legal do tratamento próximo ao local gerado (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2009), já há Estados com legislações específicas para os pneus inservíveis. Como exemplo, o Estado do Paraná possui a Resolução SEMA nº 57 de 25 de novembro de 2008, na qual pneus usados são proibidos de serem trazidos a partir de outros Estados da Federação e/ou de outros países, ou seja, somente pneus novos são permitidos, conforme Portaria nº 23 de 27 de fevereiro de 2009 (IAP, 2013). Deste modo, no futuro, legislações que limitem o transporte dos pneus inservíveis entre fronteiras administrativas podem surgir em mais Estados, ocasionando a necessidade da expansão da capacidade de destinação interna do Estado de São Paulo.

Há ainda recomendações legais para as boas práticas ambientais, como a coleta regional para municípios sem ecopontos, a preferência pela reforma quando possível e das restrições legais que surjam ao transporte de pneus inservíveis entre Estados da Federação, a rede pode enfrentar a necessidade de rearranjos, o que do ponto de vista da tomada de decisão, teriam maior suporte mediante a modelagem e configuração de rede que levassem em conta tais características e limitações.

As oportunidades presentes na rede estão na instalação de dois níveis entre os ecopontos e as empresas de destinação na rede de LR de pneus inservíveis:

- a) **Centros de armazenamento** – atualmente não há uma triagem padronizada, e os centros tem como função a recolha do material dos ecopontos, promovendo uma triagem dos pneus usados em servíveis e inservíveis, além de consolidar a carga o que permitiria ganho de eficiência no arranjo da quantidade transportada e redução da quantidade de pneus servíveis nos fluxos para a destinação.
- b) **Empresas intermediárias de pré-processamento (trituração)** – que estão presentes atualmente na rede, mas em locais próximas as destinadoras. A exploração deste tipo de instalação, além das funções análogas aos dos centros, promove a recuperação do aço presente na estrutura do pneu e diminuição dos espaços vazios no transporte de pneus inteiros agora transformados em lascas. De acordo com a legislação, os pneus podem ser estocados triturados por até um ano, deste modo é outra característica adicional que permite o armazenamento em caso de falta de capacidade, por exemplo.

Portanto, o estudo da logística reversa de pneus inservíveis é interessante uma vez que a rede logística está em constante mudança nas instalações presentes nesta e na necessidade do tratamento da quantidade de pneus inservíveis gerados por uma frota crescente no país. E neste estudo apresenta-se uma revisão do sistema de LR presente no Brasil, com a caracterização da rede para o Estado de São Paulo, em seguida a partir das características da rede de LR e da revisão bibliográfica é proposto um modelo de configuração com as oportunidades apresentadas anteriormente, em um planejamento de horizonte dinâmico e experimentos com requisitos financeiros, como um orçamento; e ambientais, como a maximização do crédito de carbono no transporte e operações.

### 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é a proposta do estudo de melhorias na rede reversa de pneus inservíveis por meio de um modelo linear inteiro misto para apoiar as decisões de localização de instalações de centros de armazenamento e empresas intermediárias; e alocação do material entre os níveis de ecopontos, centros, empresas intermediárias e destinação, além do estoque, na rede de logística reversa de pneus inservíveis visando à minimização dos custos de operação, armazenamento, instalação e transporte, utilizando-se uma penalização intangível para o caso de não tratamento dos pneus.

O modelo contempla três proposições:

- a) A primeira é com relação à possibilidade da abertura de centros de armazenamento na rede atual, que atuariam como locais de recepção, consolidação e separação dos pneus em servíveis e inservíveis. Esta proposição é análoga ao uso de centros de distribuição (CD) da logística direta, contudo, ao contrário de distribuir os produtos para pontos menores, os centros de armazenamento realizariam a função oposta, recebendo de locais menores. As empresas intermediárias também se apresentam nesta proposição, mas com algumas características adicionais.
- b) A operação dos centros de armazenamento e empresas intermediárias seria homogênea, permitindo uma separação padronizada dos pneus servíveis e a posterior venda destes para gerar uma renda. Com isso, os pneus a serem reutilizados ou reformados teriam maior segurança, uma vez que a vistoria destes pode seguir procedimentos padrão de triagem e a quantidade de pneus retornados teria sua vida útil aumentada.

- c) A necessidade de expansão da rede atual, considerando que os Estados da Federação tendem a promulgar leis que sejam restritivas quanto ao transporte de pneus inservíveis e consequentemente restrinjam as opções envio entre os pontos de coleta e as empresas de destinação. Portanto, o modelo também permite a expansão da capacidade de tratamento da rede de logística reversa atual por meio da maior separação do aço nas empresas intermediárias.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no **Capítulo 2** é apresentada a descrição do problema com as características gerais dos pneumáticos; os problemas ambientais decorrentes da destinação incorreta dos pneus inservíveis; os desafios logísticos oriundos das características do produto; a legislação nacional pertinente ao assunto; e, a atual rede logística reversa presente no Brasil. O **Capítulo 3** apresenta a revisão da literatura que aborda a área de LR em geral e no caso dos pneus, e posteriormente os modelos quantitativos para a configuração de redes de LR gerais e de pneus. O **Capítulo 4** é dedicado ao desenvolvimento do modelo com base nas características da LR de pneus inservíveis no Brasil. Os resultados referentes aos dados para o Estado de São Paulo e as discussões são apresentados no **Capítulo 5**. Por fim, a conclusão do estudo e futuras extensões são apresentadas no **Capítulo 6**.

## **2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA: A LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS**

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada do problema: descrevendo inicialmente os desafios para a destinação correta dos pneus inservíveis; uma descrição do produto pneu, sua composição e as relações desta com as possíveis destinações; a legislação ambiental que impulsiona a LR e trata de alguns limitantes e características que a rede deve ter e conseqüentemente o sistema de logística reversa presente no Brasil, com sua caracterização geral e formas de operação. Ao final do capítulo, é apresentada uma síntese do problema e as áreas a serem revisadas na literatura.

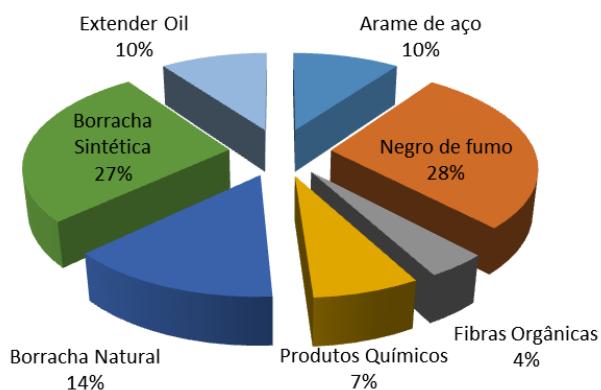
### **2.1. AS CARACTERÍSTICAS DOS PNEUS E AS FORMAS DE DESTINAÇÃO FINAL.**

Os pneus apresentam em sua composição elementos como borracha natural e sintética, negro de fumo e outros derivados de petróleo, cordões de aço, náilon e o enxofre utilizado no processo de vulcanização (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos , 2013; COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2013). Há dois tipos de pneus comumente usados no transporte rodoviário: os radiais e os diagonais, também chamados de convencionais, em ambos os casos os pneus são produtos com forma tubular que apresentar baixa compressibilidade.

Os pneus radiais são geralmente utilizados em veículos leves, como carros e camionetas; já os pneus diagonais em veículos de grande porte, como caminhões e ônibus (ANDRADE, 2007). As diferenças entre os dois tipos são estruturais, tendo os radiais reforços estruturais de aço enquanto os diagonais utilizam de materiais têxteis como o nylon; composição, a borracha sintética tem maior proporção no pneu radial do que diagonal. As características dos tipos de pneus influenciam na preferência pela forma a qual um pneu pode ser destinado, por exemplo, pneus radiais, devido ao seu reforço estrutural, são menos interessantes para processos de laminação da borracha, pois nesta o aço necessariamente tem de ser cortado (LAGARINHOS, 2008).

A composição média de um pneu radial de passeio é exemplificada no Gráfico 1; os pneus de carga tem a proporção inversa no caso das borrachas.

Gráfico 1 - Composição média dos pneus radiais de passeio.



Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 1998.

A borracha natural dos pneus de caminhões e ônibus tende a aumentar a vida útil destes quando comparados aos pneus radiais de veículos leves, pois permite maior quantidade de reformas. Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ABR, 2013), cerca de dois terços dos pneus de carga em uso no país são reformados; e a proporção de pneus destinados para queima em fornos de cimenteiras é de 20% para os diagonais e 80% para demais usos, enquanto para os pneus radiais a proporção é inversa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUS, 2013).

Estes dados são usados para definir as metas e possibilidades para tratamento pelas empresas produtoras e importadoras de pneus, uma vez que um pneu inservível de caminhão/ônibus equivale aproximadamente, em massa, a oito pneus de um veículo leve (LAGARINHOS, 2011) e a reforma não é uma atividade contabilizada como destinação, apesar de ser preferível, inclusive pela legislação, antes das outras formas de destinação (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2010).

A composição do pneu tem ainda relação com as possíveis destinações, por exemplo, a borracha presente apresenta potencia combustível, enquanto o aço pode ser separado e reciclado por siderúrgicas. De acordo com o levantamento dos trabalhos internacionais na área de resíduos de borracha e pneus (ADHIKARI, DE; MAITI, 2000; ANTONIOU; ZABANIOTOU, 2013) e com base no estudo do cenário nacional da logística reversa de pneus inservíveis (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008, 2009), as principais destinações são: o coprocessamento em fornos de cimenteira e na industrialização do xisto betuminoso no caso do Brasil, a laminação, a granulação, a pirólise e mais recentemente a regeneração da borracha (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2014).

- a) O coprocessamento consiste no uso dos pneus como combustíveis alternativos em processos industriais já existentes, deste modo há a recuperação da energia por meio da queima da borracha contida no pneu. No Brasil, este tipo de destinação foi da ordem de 54,4% em fornos de cimenteiras, que utilizam em substituição ao coque, e 2,99% no processo de industrialização do xisto para o ano de 2013 (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2014). De acordo com a RECICLANIP (2013), o calor líquido do pneu inservível é de 27 mil BTUs/kg, um pouco acima do carvão com 25 mil BTUs/kg, entretanto outras fontes relatam valores abaixo, entre 9 e 16 mil BTUs/kg (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2013). Os pneus podem ser utilizados inteiros ou em lascas, sendo que no primeiro caso a recuperação do aço não é possível para envio às siderúrgicas, pois este acaba entrando como um componente do cimento. Na industrialização do xisto, o pneu é utilizado como substituinte parcial no processamento do xisto betuminoso.
- b) Segundo o IBAMA (2013), a laminação trata do processo de fabricação de artefatos de borracha. Lagarinhos (2008) descreve a laminação como um processo que inclui diversas operações de corte específico nos pneus inservíveis, produzindo, como exemplo: cintas, solados, saltos e palmilhas para a indústria de estofamento e confecção de tubos para escoamento de águas pluviais. É um processo que deve ser impactado pela diminuição gradativa na produção de pneus diagonais frente aos radiais (LAGARINHOS, 2008), pois os pneus radiais contêm reforços estruturais de fios de aço que dificultam os cortes.
- c) A granulação é um processo mecânico no qual os pneus são moídos até obter-se um pó de borracha, e o pó de borracha pode ser adicionado em compostos usados em fábricas e reformadoras de pneus, tapetes e capachos, saltos e solados de calçados (BORCOL, 2014a). Há também a trituração que se trata de processo mecânico no qual o pneu é triturado ou transformado em lascas que podem, por exemplo, serem empregadas como agregados em pisos asfálticos. A separação da malha de aço para a reciclagem pode ocorrer antes da trituração ou granulação por máquinas secundárias ou durante esta por meio de eletroímãs, e como resíduo resultante há principalmente as fibras de nylon. O processo ainda pode ser a temperatura ambiente ou por resfriamento criogênico, diferindo em relação aos custos de instalação e de operação. No Brasil, o processo à temperatura ambiente é o mais utilizado (LAGARINHOS, 2011).

d) A pirólise é um processo térmico de recuperação, em que não ocorre a queima do pneu, em reatores com pouca presença de oxigênio (WILLIAMS, 2013). A pirólise é uma recuperação química dos componentes do pneu, que é separado em frações ao longo do reator térmico. Os produtos obtidos são o aço, gases hidrocarbonetos, óleos e graxas, e podem ter valor comercial por suas características físico-químicas e equivalência energética comparados com outras fontes combustíveis derivados de petróleo, como o diesel.

Entre os anos de 2013 e 2014 surgiu um novo tipo de destinação contabilizada pelo Relatório de Pneumáticos do IBAMA, esta é a chamada recuperação ou regeneração da borracha. No Estado de São Paulo, é possível encontrar produtos fabricados a partir da regeneração da borracha, pó da borracha, tapetes e capachos além de blocos de borracha regenerada. (BORCOL, 2014b). Segundo Williams (2013), a regeneração ou recuperação envolve processos mecânicos de trituração e agentes químicos que desvulcanizam a borracha; ou ainda processos que utilizam micro-ondas para recuperar a borracha através da quebra das ligações moleculares, garantindo propriedades muito próximas da borracha original nestes últimos.

A Tabela 1 apresenta a forma de destinação, quantidade bruta destinada e o percentual em relação ao total nacional.

Tabela 1 - Tecnologia de destinação e quantidade bruta de pneus inservíveis destinados.

<b>Tecnologia</b>	<b>Destinação (toneladas)</b>	<b>Percentual</b>
<b>Coprocessoamento</b>	267.448,35	54,4%
<b>Granulação</b>	165.574,82	33,68%
<b>Laminação</b>	43.839,44	8,92%
<b>Industrialização do Xisto</b>	14.700,00	2,99%
<b>Pirólise</b>	72,94	0,01%
<b>Regeneração da borracha</b>	17,47	0%
<b>Total</b>	491.653,02	100%

Fonte: IBAMA, 2014.

Outras finalidades para os pneus inservíveis como o uso em muros ou barreiras de contenção, locais de recreação infantil ou reutilização com outras finalidades não são consideradas para fins de contabilização nas metas legais, pois a Resolução CONAMA 416/09 determina que as destinações ambientalmente corretas sejam procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial.



## 2.2. A REDE LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL E CARACTERIZAÇÃO DA REDE DO ESTADO DE SÃO PAULO

As ações para dar a correta destinação aos pneus inservíveis, inclusive os que representavam passivos ambientais, ou seja, as obrigações remanescentes de responsabilidade de uma organização para com o meio ambiente surgiram no Brasil a partir de instrumentos legais e de acordos setoriais que transferiram a responsabilidade de tratamento dos resíduos aos produtores (MILANEZ, BUHRS, 2009). O levantamento e discussão da legislação sobre pneus inservíveis com os cálculos para a meta de fabricantes e importadores e definições das condições dos pneus estão no Apêndice A. Entretanto ressaltam-se dois pontos das leis em vigência são particularmente importantes para este estudo:

- a) O primeiro é o de se evitar a transferência do passivo ambiental para outros locais, ou seja, tratar ou destinar os pneus inservíveis o mais próximo possível da fonte geradora, sugestão da Resolução CONAMA nº 416/09. No Estado do Paraná, já há legislação que impede a recepção de pneus inservíveis advindos de outros Estados da Federação, sendo uma proibição e restringindo o fluxo de outros Estados.
- b) O segundo é a necessidade da coleta em municípios sem ecopontos por meio de planos regionais de coleta e gerenciamento de pneus inservíveis, isto é, mesmo que um município não apresente um ecoponto formalizado, os produtores e importadores devem trabalhar para que seja feito um sistema de coleta regional, conforme Instrução Normativa nº 1 do IBAMA.

Dessa forma, o produtor é responsável pelo produto mesmo após seu uso, devendo providenciar uma destinação correta para este ao final de sua vida útil, como, por exemplo, o reuso, a remanufatura, a reciclagem ou disposição em aterros apropriados. De acordo com Uruburu et al. (2013), quando a responsabilidade é do produtor e não há pagamento de taxas de retorno ou de livre comércio do resíduo, observa-se no gerenciamento dos produtos no fim de vida útil, a formação de organização sem fins lucrativos, financiada pelos produtores e encarregada do processo de logística reversa. No caso brasileiro houve a formação da RECICLANIP, uma organização proposta pelos fabricantes de pneumáticos para coordenar as ações da resolução CONAMA 416/09 e instrução normativa IBAMA nº. 1 de 2010.

Conforme mencionado anteriormente, a rede nacional de logística reversa de pneus inservíveis possui 1571 de pontos de coleta, chamados de eco pontos (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013). A logística reversa se inicia nestes pontos, que englobam revendedores, borracheiros

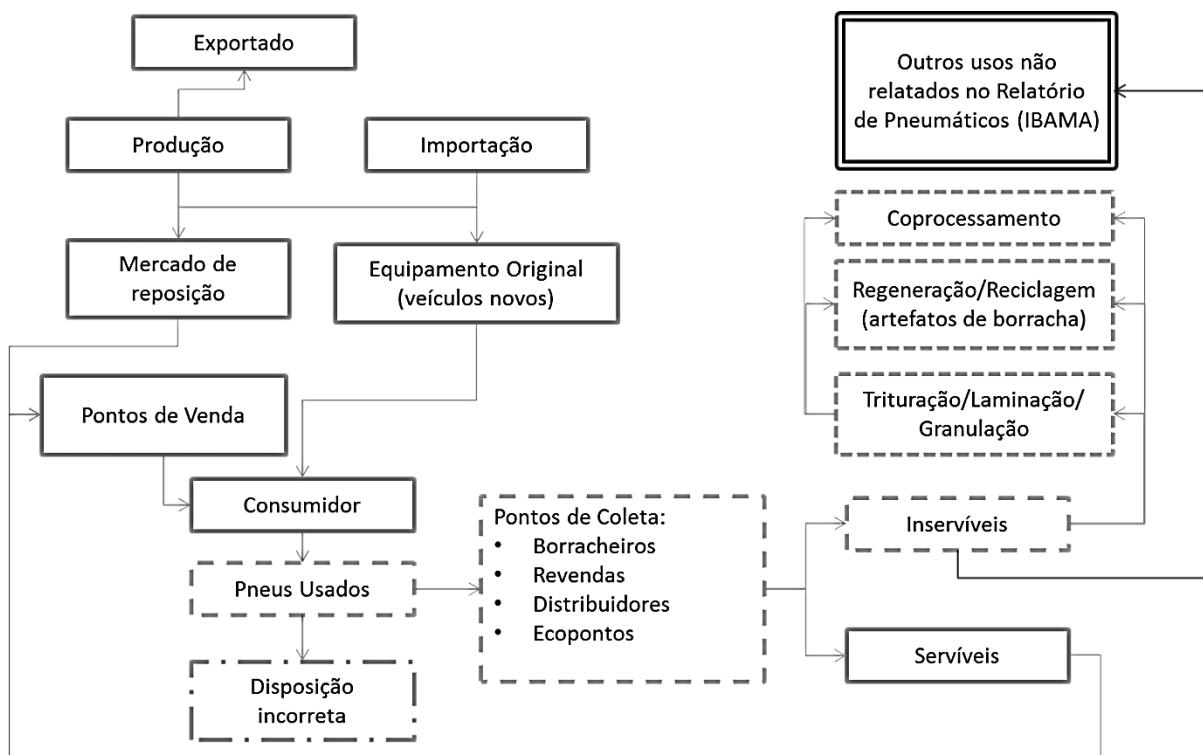
ou locais criados em parceria com o poder público, ou seja, as prefeituras cedem o terreno e mão-de-obra para coleta e armazenamento, enquanto a RECICLANIP administra o recolhimento dos pneus nos ecopontos e cobre custos financeiros do transporte até a destinação e, conforme o caso, do processamento. Os importadores possuem um procedimento parecido ao dos fabricantes. De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IMPORTADORES E DISTRIBUIDORES DE PNEUS (2013), há ecopontos em todos os Estados e parcerias com as recicladoras, as quais são pagas para dar a destinação aos pneus inservíveis. Contudo, há poucas informações disponíveis no site da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IMPORTADORES E DISTRIBUIDORES DE PNEUS com relação à localização destes pontos, e no Relatório de Pneumáticos do IBAMA não há separação dos locais entre importadores e produtores.

Com relação à operação dos ecopontos, administrados em parceria com a RECICLANIP, a cada 2000 pneus de automóveis ou 300 pneus de caminhões ou ônibus, é feito um o pedido para a coleta. O material coletado nos ecopontos é enviado para os pontos de destinação, que consistem em empresas destinadoras que pagam pela obtenção dos pneus, por exemplo, no caso dos recicladores, ou podem ser pagas para dar a destinação, como o caso do coprocessamento em cimenteiras.

As informações sobre quantas toneladas foram destinadas e sobre a forma de destinação são inseridas no sistema do Cadastro Técnico Federal (CTF) junto ao IBAMA para o controle da quantidade tratada em relação à estabelecida na meta daquele ano (LAGARINHOS, 2011; BRASIL, 2009; RECICLANIP, 2013; INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013). Os dados são divulgados no Relatório de Pneumáticos do IBAMA, que é publicado no ano seguinte ao envio destas informações por parte dos fabricantes e importadores.

A Figura 1 apresenta a rede logística de pneus, mostrando os canais diretos e reversos. Esta figura possui como fontes de dados o Relatório de Pneumáticos 2012 e 2013 (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2012; 2013), dados fornecidos pela Reciclanip, e o trabalho de Lagarinhos (2011).

Figura 1 - Rede logística dos pneumáticos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 1, os elementos nas caixas simples contínuas representam a cadeia direta dos pneus, que se inicia na produção ou importação dos pneus. Há uma redução na quantidade de pneus presentes no país conforme estes são exportados, a quantidade remanescente é utilizada para abastecer o mercado de reposição ou irão equipar veículos novos, ou seja, são os chamados de equipamento original. Geralmente os pneus para o mercado de reposição são distribuídos em pontos de vendas menores, como revendedores, lojas varejistas ou para borracheiros. Nota-se que há distinção entre produção e importação, pois há atritos entre os produtores e os importadores no país (MILANEZ, BUHRS, 2009).

Tanto os produtos para a reposição quanto os produtos para veículos novos entram no mercado consumidor e depois de utilizados podem ser dispostos incorretamente ou retornar para os ecopontos, representados que tenham outra função na rede direta, como borracheiros e distribuidores – ou nos ecopontos formados em parcerias com prefeituras ou empresas destinadoras. A partir do uso do pneu inicia-se a cadeia reversa, composta pelas caixas simples descontínuas na Figura 2. Nos ecopontos pode haver a seleção e a reforma dos pneus, originando os pneus servíveis que serão reinseridos no ciclo de consumo e os pneus inservíveis que seguem para as destinações ambientalmente adequadas. O fluxo de pneus pode seguir diretamente para uma única forma de destinação, como na laminação de pneus inteiros, ou passar por um pré-processamento, como a trituração ou granulação para

posteriormente ser enviada para o coprocessamento, a reciclagem ou regeneração da borracha. Uma parte dos pneus, indicada na caixa dupla da Figura 2, acaba em destinações não relatadas no Relatório de Pneumáticos do IBAMA, conforme visto na subseção 2.1. e definição de destinação ambientalmente adequada (Apêndice A).

Neste trabalho, são abordados os atores da LR dos pneus inservíveis que estão destacados nas caixas simples descontínuas na Figura 2. Note que a LR não é integrada à rede logística direta, ou seja, apesar de alguns ecopontos serem distribuidores/revendas, o produto segue para outros locais que não os do produtor original. O sistema é dependente da taxa de pneus gerados advindos dos consumidores e também da capacidade de coleta retorno no fluxo de pneus servíveis.

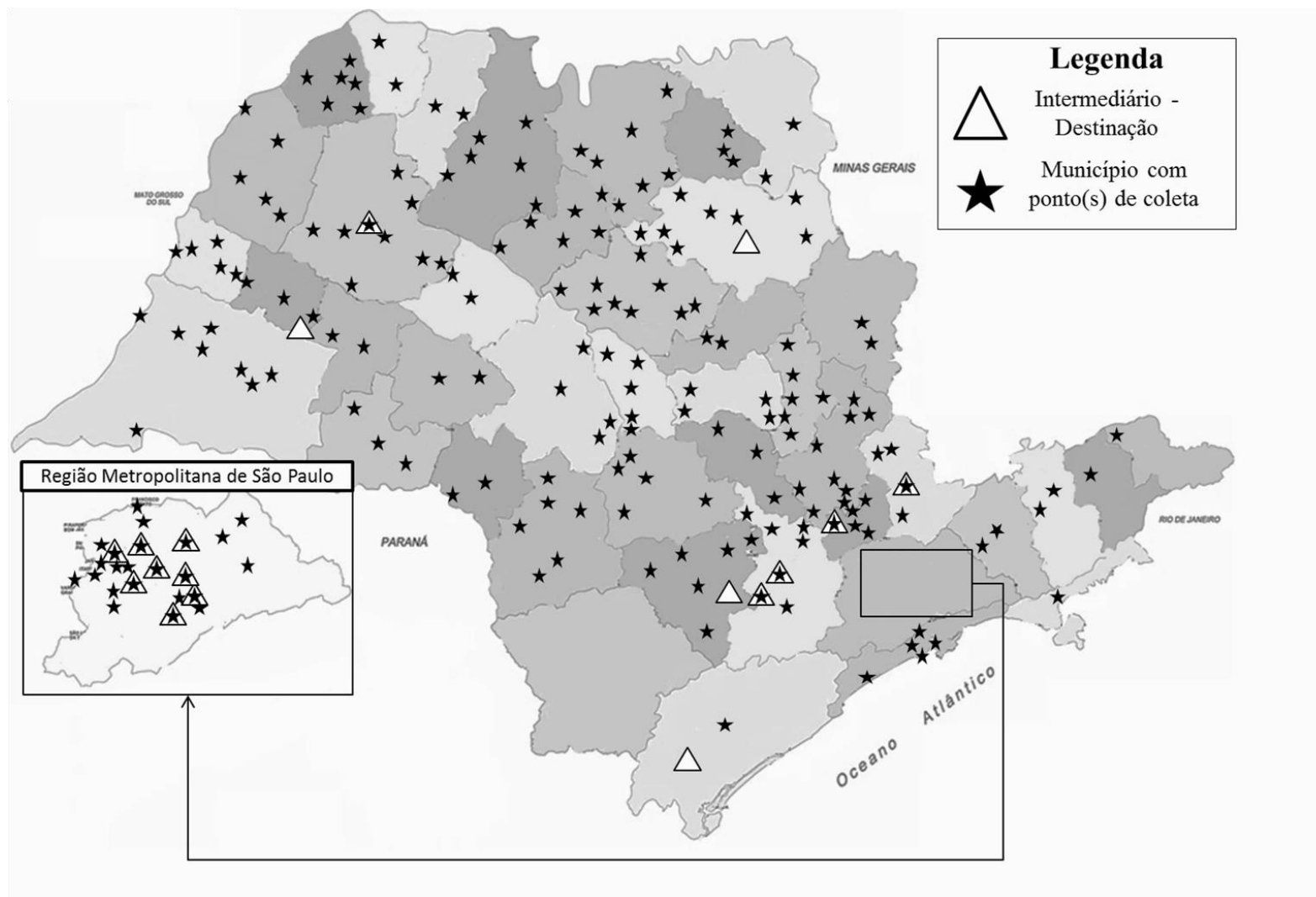
Com base na revisão nas informações acerca da LR no caso dos pneumáticos inservíveis (MILANEZ, BUHRS, 2009; ANDRADE, 2007; LAGARINHOS, 2011; INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013), observou-se os principais aspectos em relação à rede LR:

- a) O principal motivador é o aspecto legal advindo das pressões ambientais;
- b) A logística reversa dos pneus inservíveis é realizada por uma terceira parte. Apesar da participação de ecopontos em varejistas e borracheiros (da logística tradicional), o transporte, o pré-tratamento e destinação são realizados por empresas que não possuem relação direta com o mercado de pneus, bem como dos fabricantes e importadores;
- c) A maior forma de destinação dos pneumáticos inservíveis, 47,77% do total, é a recuperação energética em fornos de cimenteira, a segunda maior forma é a granulação, responsável por 36,71%, portanto há uma predominância das duas formas de destinação sobre as demais. O coprocessamento admite pneus triturados ou não e a granulação precisa da trituração prévia para redução do pneu em pedaços menores;
- d) A coleta dos pneus não é planejada considerando-se o potencial de material gerado nos ecopontos, ou seja, acontece de forma reativa conforme a necessidade estipulada pela meta legal que é baseada na quantidade disponibilizada para o mercado de reposição. Essa característica pode implicar em altos custos de transporte e armazenamento, pois não se antecipa o tratamento para que possa ser decrescido na meta do ano posterior, por exemplo.
- e) Atualmente, a atividade de triagem dos pneus descartados nos ecopontos não é sistematizada. Esta atividade pode gerar benefícios econômicos para rede de logística

reversa, como a venda de pneus em estados de servíveis para o reuso ou a remanufatura.

Quanto à caracterização da rede específica do estudo, os dados utilizados nos modelos de configuração deste estudo foram do Relatório do IBAMA 2013, no qual para o Estado de São Paulo eram presentes 475 ecopontos em 216 municípios, e 17 empresas intermediárias/destinadoras em 15 municípios. A distribuição dos municípios com ecopontos e empresas intermediárias/destinadoras da rede reversa é apresentada na Figura 2.

Figura 2- Mapa do Estado de São Paulo com destaque para os municípios com ecopontos, empresas intermediárias e destinadoras.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do Relatório IBAMA (2013) e no mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Na Figura 2, note que há uma concentração maior de ecopontos no eixo Noroeste-Sudeste, o que está alinhado com a ocupação populacional mais intensa nessas regiões. Alguns municípios possuem diversos ecopontos cadastrados, por exemplo, São Paulo (capital) apresenta 20 pontos e Ribeirão Preto 10 pontos, por exemplo. Com relação às empresas destinadoras e intermediárias, a localização destas concentra-se na região Sudeste do Estado e de acordo com o INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (2013) eram responsáveis pela destinação de aproximadamente 35% do total nacional de pneus inservíveis. O Estado de São Paulo representa assim uma rede com alta quantidade de ecopontos e disponibilidade de destinações, tornando a região interessante para o estudo proposto, com as mesmas considerações elencadas anteriormente para a rede do país.

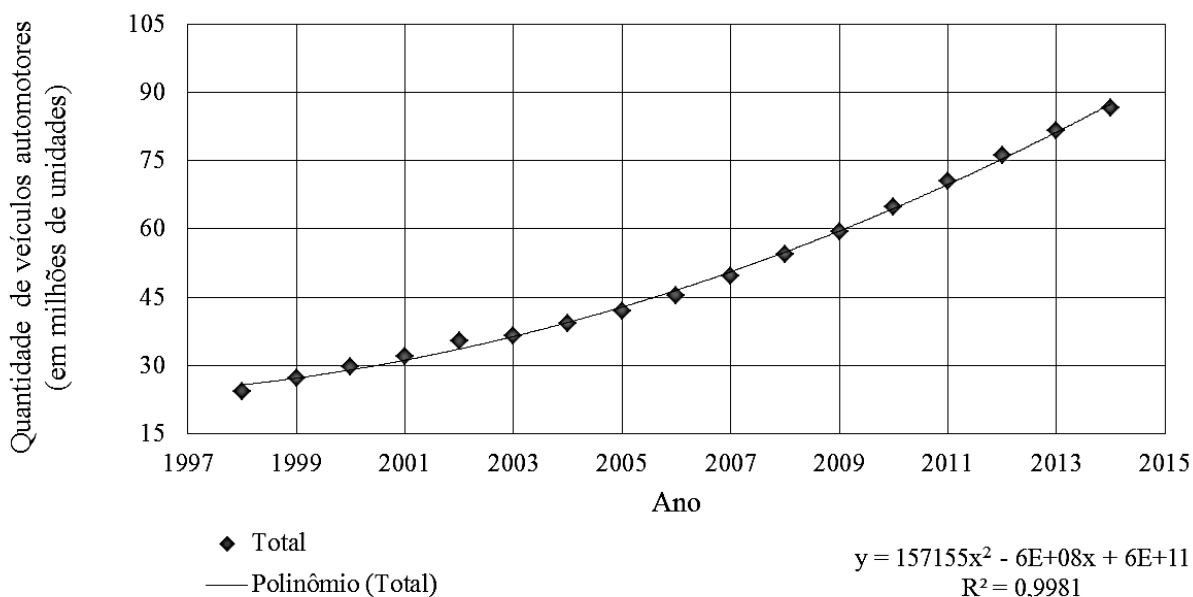
### 2.3. DESAFIOS PARA A DESTINAÇÃO ADEQUADA DOS PNEUS INSERVÍVEIS

A destinação dos pneus ao final da vida útil implica na coleta destes nos pontos de consumo (ecopontos), ou seja, é necessária uma estrutura de rede reversa para viabilizar a correta destinação. Os principais desafios logísticos da LR dos pneus inservíveis estão no transporte e armazenamento. Os pneus inteiros, devido ao seu formato, ocupam um grande volume dificultando o transporte e reduzindo a eficiência com relação à massa transportada, por exemplo, caminhões com capacidade de carga de 20 toneladas conseguem transportar por apenas cerca de 10 toneladas de pneus inservíveis de passeio, ou seja, em torno de 2 mil unidades (RECICLANIP, 2013). Por serem utilizados em veículos automotores e estes estarem dispersos em diferentes regiões, a distribuição geográfica dos pneus inservíveis é ampla, o que dificulta sua coleta e transporte para as instalações de processamento (OLIVEIRA; CASTRO, 2007).

No armazenamento de pneus inservíveis requer especial atenção, pois o pneu, além de ocupar espaço significativo conforme discutido anteriormente, é inflamável e as instalações precisam ser adequadamente planejadas evitar incêndios e prejuízos econômicos, como destruição de bens e do próprio pneu que fornece material aproveitável para indústrias de estofados, calçados e o próprio setor de pneus. Uma das exigências básicas para a abertura dos pontos de coleta (ecopontos) e o armazenamento, segundo resolução CONAMA 416/09, é que estes devem fornecer instalações cobertas.

Tais questões de gerenciamento são mais críticas dado o crescimento da frota de veículos automotores presentes no Brasil, visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Quantidade de veículos no Brasil entre 1998 e 2014 (emplacados ou não).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados de frota total obtidos no DENATRAN (2014)

Este crescimento da frota, que segue uma média dentro do período histórico entre 1998-2014 de 8% ao ano, exigirá a ampliação da coleta e consequentemente da capacidade das destinadoras.

Desta forma, os pneus inservíveis necessitam de atenção no armazenamento e de soluções para a redução do custo do transporte em relação à quantidade a ser enviada entre os locais de coleta e empresas de processamento. Sendo o pneu inservível um substituinte para alguns combustíveis, fornecedor de material para reciclagem como a borracha e o aço, a sua destinação incorreta acarretará não somente impactos diretos no meio ambiente, mas também indiretos pela necessidade de extração de maior quantidade de matéria-prima virgem e combustíveis não renováveis.

Estes desafios operacionais podem ser enfrentados com algumas sugestões na configuração da rede. Como os novos elementos propostos, de Centros de armazenamento e de trituração, que ao mesmo tempo podem prover a triagem do pneu, evitando o transporte de pneus em condições de servíveis ao longo da rede reversa; a consolidação da carga, facilitando o arranjo dos pneus durante o armazenamento e transporte e, por fim, no caso da trituração, aumentar a quantidade transportada em relação às viagens realizadas.

Com base na descrição do problema e na abordagem dada, a revisão bibliográfica foi direcionada primeiramente para trabalhos voltados para a LR de pneus inservíveis que descrevessem os a implementação das redes reversas, os mecanismos de atuação entre o governo e empresas do setor, além de características operacionais como as formas de configuração das redes utilizadas e destinações existentes não somente no Brasil. Esta parte



da revisão teve como objetivo o de verificar a tendência nas abordagens do problema e que possíveis decisões são coerentes com o tipo de rede em específico.

Em seguida, para verificarem-se as questões qualitativas da estrutura das redes de LR e a forma de como estas são em relação à rede direta, buscaram-se os conceitos básicos das redes reversas no geral, os motivadores da LR e opções de retorno comumente empregadas nestas, como reuso, remanufatura, reciclagem e disposição, para o caso específico dos pneus usados. O objetivo desta parte é de permitir melhor entendimento da caracterização da rede de LR dos pneus e dos modelos de configuração de rede logística presentes na literatura.

Por fim, foram explorados os modelos matemáticos de configuração de redes LR no geral e especificamente para o caso dos pneus. O objetivo foi de verificarem-se as lacunas não exploradas pela especificidade da rede estudada, como estoque e ganho de eficiência no transporte, além de características básicas presentes nos modelos, como capacidade do sistema, integração com a rede direta e as consequências de cada uma das características adicionais ao longo dos estudos, inclusive na tendência em utilizar-se objetivos adicionais além dos econômicos. Esta parte foi dividida em quatro subseções: modelos reversos, integrados ou fechados, multi objetivo e LR de pneus.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Quadro 1 apresentam-se os critérios de busca de cada uma das seções da revisão da literatura.

Quadro 1 - Critérios de busca para a revisão bibliográfica.

Seção	Base de dados	Palavras utilizadas	Critérios de classificação
3.1.	ISI Web of Knowledge e SCOPUS	Reverse logistic(s), green supply chain, green logistics, network design	Número de citações.
3.2.	ISI Web of Knowledge e SCOPUS		
3.3.	ISI Web of Knowledge e SCOPUS	Para 3.3.1-3.3.3: Network design, reverse logistics network design, logistics network design, model reverse logistics e model network design. Para a subseção 3.3.4: model reverse logistics tyre (tire) e model logistics tyre (tire)	Número de citações e posteriormente, para o caso dos pneus, artigos publicados a partir de 2005.

A revisão bibliográfica apresenta-se nas subseções 3.1 até 3.3., ao fim com um quadro dos artigos que contém modelos de configuração de rede logística.

#### 3.1. CONCEITOS TEÓRICOS BÁSICOS DE CONFIGURAÇÃO DE REDE DE LR

Uma rede logística pode ser formada por fábricas, armazéns, distribuidores e outros agentes. Estes são situados em nós de uma rede e entre si podem ocorrer ou não os fluxos de material. No trabalho de Contreras e Fernandez (2012) a configuração de rede geral é abordada pela combinação de dois problemas clássicos: os “Problemas de Localização”, que consistem no processo de localizar facilidades, por exemplo, depósitos, lojas, áreas de transbordo, em locais candidatos presentes nos nós da rede logística; e os problemas de “Configuração de Rede”, que determinam como os nós estão ligados entre si, permitindo assim obter a alocação dos fluxos entre as facilidades instaladas.

Considerando o caso reverso, Fleischmann et al. (2000) relatam que a tarefa central da Configuração de Redes é a determinação do número e localização dos pontos de recuperação dos produtos, e não somente estes, mas também das possíveis facilidades dos níveis

intermediários da rede. As decisões envolvidas na configuração da rede dependem de diversos elementos como:

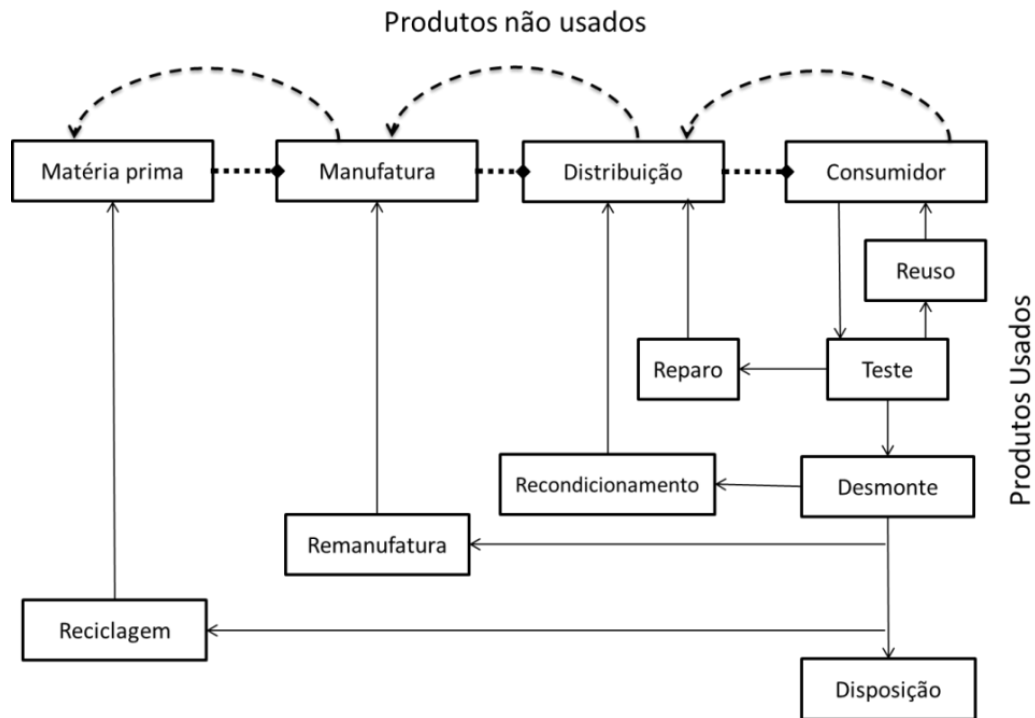
- a) **Centralização** – quanto mais centralizada é uma rede, menos instalações serão presentes nesta. Diz respeito à quantidade de agentes da rede em cada um dos níveis, isto é, se determinado nível tem apenas poucos agentes, estes possivelmente atendem mais facilidades e também têm suas saídas para múltiplos locais;
- b) **Número de níveis** – refere-se ao tipo de operação de um determinado agente em um dos níveis. Quanto maior a integração vertical, menor será a quantidade de níveis ou camadas, pois mais etapas serão cumpridas por um mesmo agente da rede. Em contrapartida, uma rede com múltiplos níveis terá poucas etapas, ou apenas uma, sendo realizadas por uma instalação.
- c) **Conexão com outras redes** – trata-se do grau de integração entre a cadeia reversa e a cadeia pré-existente (do próprio produto ou de outro produto). Uma cadeia aberta tem os fluxos de entrada e saída independentes, em uma estrutura de apenas uma via. Enquanto as cadeias de *closed loop* ou ciclo fechado possuem vias de fluxos direto e reverso dependentes, nos quais os produtos retornam para a cadeia direta após sua utilização.
- d) **Grau de cooperação** - o quanto cada agente contribui na rede, de forma a cooperar com as demais partes. Esta questão está relacionada com o caráter comercial da rede de LR, na qual os agentes acabam tendo um relacionamento estreito com o objetivo de aumentar a eficiência da rede logística.

Segundo Fleischmann et al. (2000), a tarefa de planejamento da coleta e recuperação dos produtos é difícil, pois há diversas considerações a serem feitas com relação à logística direta. A maior consideração acerca dos fluxos nas redes de LR situa-se na entrada da rede reversa. Enquanto na LD existe menor incerteza com relação à quantidade e qualidade do material de entrada dos fornecedores, na LR, a dispersão geográfica dos produtos usados e os diferentes modos de uso destes tornam as taxas de retorno e a qualidade dos produtos como incertos. Entretanto, os autores citam que a diferença tende a diminuir conforme há a formalização comercial dos sistemas de recuperação e a consolidação da rede de LR, o que pode ser visto como aumento no grau de cooperação entre os agentes da rede.

Com relação à operação, de acordo com Srivastava (2007), uma rede de logística reversa envolve as seguintes atividades básicas: coleta, inspeção, seleção, e um possível pré-processamento para as etapas de reuso, remanufatura, reciclagem ou quando as alternativas

foram esgotadas, a disposição. Os fluxos das atividades básicas da LR são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama dos fluxos básicos das atividades de LR.



Fonte: Adaptado de Srivastava (2008).

No diagrama da Figura 3, os fluxos pontilhados representam a cadeia logística direta, desde a matéria-prima até o consumidor. As atividades com fluxos tracejados representam o retorno ao longo da cadeia original, de produtos não usados. Já nos fluxos contínuos, os produtos são aqueles que foram consumidos e tornaram-se usados. O retorno na cadeia direta ocorre geralmente por questões comerciais e econômicas, como remanejamento de estoque, retornos por defeitos ou manutenção de equipamentos, o que é chamada de LR de pós-venda. Já quando o retorno ocorre após o uso, a LR é chamada de pós-consumo, ocorrendo por questões legais e econômicas.

Na LR de pós-consumo, de acordo com Saavedra et al.(2013), as principais características das formas de destinação para os produtos retornados são:

- a) **Reuso** – não há qualquer reparo ou restauração no produto retornado após o uso. Deste modo, o produto usado é obtido por outro consumidor após o primeiro ciclo.
- b) **Reparo** – há desmonte parcial e os componentes danificados são substituídos e o produto volta a sua função original.
- c) **Recondicionamento** – nesta atividade há o desmonte do produto, mas as peças usadas são recuperadas, sem substituição, e a função original do produto é obtida.

- d) **Remanufatura** – compreende a recuperação das partes ou do produto todo, de modo que a qualidade e a garantia sejam as mesmas de produtos novos. O produto geralmente é desmanchado neste tipo de retorno.
- e) **Reciclagem** – é o reuso de materiais presentes nos produtos. Neste caso, as funcionalidades e características do produto original são perdidas.

A configuração de redes de logística será influenciada pelas interações possíveis do produto retornado, por exemplo, o reuso possivelmente exigirá pouca ou nenhuma atividade o que pode representar apenas o transporte para outro mercado, enquanto a reciclagem poderá se estender para unidades de coleta, processamento para reciclar o material presente no produto e finalmente para as empresas que irão utilizar a matéria obtida, o que aumentaria a quantidade de níveis na rede ou exigiria a centralização de atividades em um mesmo nível. A próxima seção apresenta trabalhos qualitativos que apresentam características da LR dos pneus.

### 3.2. OS MOTIVADORES PARA A LOGÍSTICA REVERSA

Na motivação para a LR, há diferença parcial da apresentada nos sistemas logísticos tradicionais, pois pode ser de ordem legal, além da tradicional econômica e comercial (LAMBERT, RIOPEL, ABDUL-KADER, 2011). O motivador econômico surge quando há interesse na reciclagem ou no retorno do produto para recapturar seu valor e consequentemente gerar lucro para a empresa. O motivador legal, com origem em pressões ambientais, surge para dar responsabilidades aos produtores ou metas de tratamento para o resíduo do produto por meio de instrumentos legais, por exemplo, o caso da Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil. Por fim, o motivador comercial envolve contratos para retorno de produtos em estoque, com defeito ou aqueles que necessitam de serviços de assistência técnica por parte da empresa responsável.

O aspecto legal é considerado como motivador principal em sistemas de LR no geral (AKSEN, ARAS, KARAARSLAN, 2009) e promove instrumentos específicos de transferência de responsabilidade para o produtor. Contudo, nem sempre o motivador legal é o preferível em sistemas de LR (LAMBERT, RIOPEL, ABDUL-KADER, 2011), por exemplo, se um produto puder ter valor recuperado haverá o motivador econômico, e geralmente o próprio fabricante tem envolvimento no processo de LR e a rede logística criada poderá se desenvolver rapidamente. Caso contrário, isto é, se representar apenas uma obrigação e

consequentemente um custo, geralmente o processo de LR é dado para terceiras partes (ALUMUR et al., 2012).

Os trabalhos na literatura que abordam a LR de pneus usados geralmente discutem motivadores, políticas e boas práticas ambientais para as redes reversas, contudo, os pneus inservíveis ganham atenção somente de uma parcela reduzida destes estudos, como no caso das possíveis destinações e usos da borracha como um resíduo reciclável (ADHIKARI, MAITI, 2000; CLAUZADE et al., 2010).

Nos motivadores para a LR específica de pneus, o principal é o legal, como consequência disto, de acordo com Souza, D'Agosto (2013), dentre as formas de gerenciamento de pneus inservíveis em países como Alemanha, Austrália, Brasil, Canada, Espanha, EUA, França, Grécia, Itália, Japão, Portugal e Reino Unido, tem-se a responsabilidade do produtor/importador (46%), seguida do livre comércio ou mercado no qual os atores atuam livremente para prover a destinação, mas sem qualquer interferência do governo (38%) e pela responsabilidade do governo (16%).

Sendo a rede reversa de responsabilidade do setor privado, este pode torná-la participante do sistema e integra-la a rede direta, quando há interesse econômico como na remanufatura. Por exemplo, Lebreton e Tuma (2006) concluem que a recuperação dos pneus de carga apresenta maior interesse sobre os pneus de passeio, principalmente devido aos custos da aquisição de um pneu novo de carga, em até 50% do preço do produto novo, e da economia de recursos que pode chegar a 75% em relação ao produto novo.

Quanto ao caso dos pneus usados sem interesse para a reforma, no estado de inservíveis ou não, Clauzade et al. (2010) abordam as possíveis destinações dos pneus, chamados de inservíveis, portanto o pneu é visto como um resíduo. É realizada uma análise de ciclo de vida (ACV) em nove métodos de destinação, dos quais quatro são destrutivos e cinco não destrutivos; e concluem que os alguns métodos não destrutivos são preferíveis em relação aos destrutivos, como a utilização em piso sintético.

Com relação às políticas de gerenciamento das redes reversas de pneus, Ferrão, Ribeiro e Silva (2008) discutem a interação entre instituições privadas, governamentais e acadêmicas na busca por um sistema de gerenciamento integrado para os pneus inservíveis, uma vez que existem, além dos aspectos legais e políticos, questões técnicas e consequências ambientais das decisões tomadas. Segundo os autores, este tipo de sistema integrado permitiria as três funções da responsabilidade estendida do produtor: a redução do resíduo gerado, o encorajamento de práticas de *eco-design* e o suporte para as operações de reciclagem e gerenciamento dos resíduos. Portanto, as motivações que impulsionam a

composição da LR também dão as formas da estruturação destas, ou seja, se serão redes abertas ou fechadas.

O gerenciamento integrado da LR pode ser uma forma de redução de custos na rede logística, por exemplo, Souza e D'Agosto (2013) realizaram um estudo de custos na LR de pneus de carga em uma empresa de transportes na cidade do Rio de Janeiro – RJ e concluíram que cerca de  $2/3$  do custo total do sistema era relativo ao transporte, deste modo, evitar a geração de um resíduo ou prolongar sua vida útil pode ser uma forma de reduzir custos à longo prazo com o transporte desnecessário deste.

No contexto político do Brasil, Milanez e Buhrs (2009) fizeram uma análise qualitativa do impacto da Resolução do CONAMA nº 416/09 através de análise documental e entrevistas com agentes das partes públicas e privadas. Os autores ressaltaram as dificuldades de entendimento entre as partes envolvidas na gestão da LR, inclusive com atritos visíveis entre os importadores e os fabricantes de pneus.

Quanto às atividades da rede logística, Lagarinhos (2011) apresenta uma caracterização da rede de logística reversa dos pneus inservíveis no Brasil, discutindo a legislação e a operacionalização da rede. As principais contribuições do trabalho estão quanto ao levantamento da similaridade da legislação internacional e como esta inspirou a legislação nacional; o modo de operação dos ecopontos, que não apresenta homogeneidade e, desta maneira, não há procedimento padrão para a seleção entre pneus servíveis e inservíveis; e finalmente da apresentação de dados coletados em campo sobre custos operacionais e de transporte. Esta mesma constatação foi levantada por Viana (2009), que utilizou o *framework* proposto no trabalho de De Brito e Dekker (2003) e verificou que o sistema de LR no Estado não seguia a sugestão de centralização dos produtos coletados em um ponto para inspeção, seleção e ordenação para indicar o tipo de destinação mais adequada a cada caso.

O trabalho de Viana (2009) considera a hipótese de que os pneus inservíveis gerados no Piauí exigem a expansão do atual sistema de logística reversa naquele Estado. De acordo com o autor, o transporte dos pneus inservíveis entre os locais como revendedores e borracheiros e os ecopontos é dependente do sistema público de coleta de pneus, em alguns casos. E conclui que há dois grupos de consumidores: transportadoras de cargas e pessoas, que geralmente reformam os pneus até quatro vezes, e usuários de pneus de passeio, que não reformam ou realizam apenas uma reforma em seus pneus.

Deste modo, os modelos de configuração de rede devem considerar os aspectos qualitativos da formação da estrutura da rede de LR para conseguir apoiar as decisões estratégicas voltadas aos interesses dos gestores das redes, como, no caso dos pneus, uma rede

aberta com a necessidade do cumprimento da meta legal, respeitando as capacidades das instalações e ao mesmo tempo em que deve minimizar os custos financeiros totais.

### 3.3. MODELOS DE CONFIGURAÇÃO DE REDE DE LR

Nesta subseção apresenta-se a revisão dos trabalhos, divididos em trabalhos com modelos de um único objetivo que tratam das estruturas reversas apenas, e em seguida os modelos que tratam de modelos com a logística direta e reversa integradas. Depois de verificar as características gerais, são explorados modelos com mais de um objetivo que não apenas o econômico – podendo ser a redução de impactos ambientais como emissão de gás carbônico, por exemplo – e por fim, os modelos que tratam especificamente do caso dos pneus usados – para averiguarem-se as lacunas deixadas e considerações realizadas por outros autores.

Os modelos de configuração de rede para a LR são baseados em modelos de localização e alocação de sistemas logísticos tradicionais. Para o caso geral, de acordo com a divisão proposta por Contreras e Fernandez (2012), em Problemas de Localização têm-se como exemplos, os modelos de p-mediana, p-centros, problema não capacitado de localização de facilidades e problemas de cobertura de localização; e Problemas de Alocação, problemas de rede com carga fixa. A forma combinada destes dois problemas, chamada de *Facility Location Network Design* (FLND), tem como função a localização e alocação dentro de uma rede logística, trata-se de um problema NP-hard, pois contém casos particulares dos exemplos citados anteriormente, estes são conhecidos por sua dificuldade de resolução em instâncias de grande porte.

Para o caso particular da localização de facilidades, Arabani e Farahani (2012) realizam uma revisão das formulações de diferentes tipos de problemas que envolvem a localização das facilidades, separando-os em localização de facilidades estática e dinâmica. Na localização estática os parâmetros sobre os locais candidatos às instalações são conhecidos e podem ser determinados com precisão no horizonte de planejamento. Na localização dinâmica, o horizonte de planejamento passa a ser obrigatório para o modelo, pois haverá decisões não somente de abertura de facilidades, como também da possibilidade de uma facilidade aberta ser posteriormente fechada e o nós que eram atendidos por esta deverão ser designados para outra facilidade. Os autores apresentam estudos com aplicações de algumas



formulações descritas, mas os casos têm o foco no aspecto direto da cadeia logística ou situações de cobertura de serviços.

Além das decisões envolvidas, como localização e alocação, e da integração da cadeia reversa ou não com a cadeia direta, outras características dos modelos são importantes, como a quantidade de itens e de períodos no horizonte de planejamento. A quantidade de tipos produtos pode ser crucial à modelagem da rede, como no estudo de Barros, Dekker e Scholten (1998), no qual nem sempre a areia retornada pode ser destinada ao reuso. Uma areia suja necessitará de um pré-tratamento antes do uso efetivo e mesmo assim não poderá ter a mesma aplicação do que uma areia limpa. No caso do horizonte de planejamento, se o problema for estático haverá uma configuração de rede apenas, mas caso seja dinâmico, as localidades podem ser abertas, expandidas ou mesmo fechadas, conforme discutiram Arabani e Farahani (2012). Estas características são citadas de acordo com a presença nos trabalhos revisados.

### **3.3.1. Modelos reversos**

Demirel e Gökçen (2008) diferenciam os modelos que consideram os fluxos diretos e reversos como modelos integrados, enquanto os com foco apenas na LR são chamados de modelos independentes ou de cadeia aberta. Quando a integração entre as redes logísticas não é possível ou não é desejada, seja por limitações técnicas, que impossibilitam as formas de retorno, ou por falta de interesse financeiro, como no caso da canibalização dos produtos novos pelos remanufaturas, as redes de LR são planejadas de maneira total ou parcialmente independente à rede direta.

Um caso conhecido de configuração de rede independente é do estudo de Barros, Dekker e Scholten (1998), no qual apresentam um modelo para a configuração de rede no contexto da reciclagem da areia de construção civil na Holanda. O modelo é capacitado, considera candidatos para depósitos regionais e facilidades de tratamento para a areia poluída, os custos de instalação e de transporte. As entradas de material na rede reversa são os locais que fornecerão a areia, nas condições limpa, mediana e suja, e os projetos que demandarão esta areia retornada.

Outro exemplo de modelo capacitado é apresentado por Krikke, Kooi e Schuur (1999) para o caso das autopeças. No modelo há uma demanda por produtos em um mercado secundário que deve ser cumprida. Estes produtos advêm do processamento em unidades de recuperação e há taxas de recuperação relativas à qualidade do produto na entrada do sistema.

Quando não é possível recuperar o produto, este segue para as unidades de destinação adequadas, como exemplo, siderúrgicas que farão a reciclagem do metal.

No trabalho de Jayaraman, Patterson e Rolland (2003) é apresentado um modelo independente estático para a LR. Os autores distinguem múltiplos itens que devem ser encaminhados para diferentes tipos de destinação, em apenas um período, como no modelo de Krikke, Kooi e Schuur (1999), porém adicionam mais níveis na rede logística, como locais de origem, coleta, instalação de remanufatura e incluem restrições adicionais de números máximos de facilidades abertas em cada nível. Nota-se que os múltiplos itens são utilizados quando as destinações de um produto retornado não é a mesma do que de outro produto, seja pelo tipo ou qualidade deste.

Alumur et al. (2012) apresentam um modelo independente dinâmico, envolvendo diversas funções especiais, como: capacidades modulares e expansão destas ao longo do tempo, quantidade mínima a ser tratada em cada facilidade, lista reversa de materiais, custos operacionais variáveis (no tempo), demanda finita nos mercados secundários (de produtos remanufaturados) e orientado para a maximização do lucro. Apesar de ser independente este modelo apresenta uma característica de focar nos subprodutos da cadeia reversa e a direta, pois utiliza a lista de materiais para quantificar os componentes que podem ser reutilizados novamente na cadeia direta e além de apresentar a maximização do lucro como objetivo.

Contudo, quando possível, a integração entre as redes reversas e diretas, trata-se de uma estratégia que pode aumentar a taxa de coleta de retorno e permitir a redução de custos de acordo com Das e Chowdhury (2012), pois as instalações da rede direta podem sofrer adaptações para a atuação na LR.

### **3.3.2. Modelos integrados ou de cadeia fechada**

Fleischmann et al. (2001) apresentam um modelo geral que integra as redes diretas e reversas visando a recuperação de produtos em cadeia fechada. No modelo é considerada apenas a localização das instalações, contudo questões como a capacidade das instalações e periodicidade não são tratadas.

Demirel e Gökçen (2008) apresentam um modelo integrado que considera os fluxos direto e reverso, como em Fleischmann (2000), mas há decisões de determinarem-se os fluxos nas instalações da rede direta, a localização das facilidades da rede reversa e as quantidades retornadas de produtos para a remanufatura que dependem da capacidade das instalações.

Quando a capacidade das instalações é considerada, como no estudo de Aghezzaf (2005) que discute capacidades produtivas e de estoque em uma cadeia reversa, têm-se decisões de alocação na rede logística. No estudo, são consideradas possíveis transferências de estoque entre armazéns no intuito de gerenciar melhor as capacidades utilizadas para atender a demanda, e também reduzir o custo de estoque, portanto as capacidades de estoques nos armazéns, que funcionam como unidades de transbordo, não devem ser ultrapassadas.

No estudo de Das e Chowdhury (2012), os autores propõem um modelo que considera uma cadeia fechada com múltiplos produtos, constituídos de diferentes módulos e componentes, são retornados via varejistas. Em seguida, as empresas de recuperação são pagas de acordo com o tipo do produto e os módulos provenientes do desmanche dos produtos são enviados novamente para as plantas produtivas. Nos trabalhos de Demirel e Gökçen (2008) e Mutha e Pokharel (2009) também são discutidos modelos integrados de remanufatura, com características semelhantes às apresentadas por Das e Chowdhury (2012).

No artigo de Salema, Póvoa e Novais (2007) é proposto um modelo de aplicação genérica a partir do modelo apresentado em Fleischmann et al. (2001). O desenvolvimento acrescenta três considerações não tratadas anteriormente: os limites de capacidade na produção e estoque, a produção de múltiplos produtos e a incerteza na demanda e no retorno dos produtos. As características são acrescentadas progressivamente e ao final apresenta-se um modelo geral de LR, capacitado, de múltiplos produtos e baseado em cenários para o tratamento da incerteza. Portanto, há o uso da programação estocástica baseada em cenários, no qual se busca uma solução que possa ser utilizada sobre incerteza a fim de minimizar os riscos do uso de outra solução, como em uma obtida por meio da programação determinística.

### **3.3.3. Modelos multiobjetivo**

Artigos mais recentes têm buscado por formulações com mais de um objetivo. No trabalho de Neto et al. (2008), os autores afirmam que na literatura é comum encontrar separadamente a minimização de custos, maximização de lucros ou minimização dos impactos; contudo pouco tem sido feito na integração destes objetivos e conseqüentemente na análise conjunta. Estes citam a necessidade de explorar as alternativas dadas em um sistema, e dentre as melhores, escolher as mais eficientes em aperfeiçoar as metas econômicas e ambientais.

No caso de Achillas et al. (2012) é proposto um modelo multiobjetivo linear para a minimização do custo total da LR, da emissões de gases e do consumo de combustível fóssil.

O modelo indica a quantidade de resíduo de equipamento eletroeletrônico que será transportado de um ponto de coleta até um centro de tratamento, utilizando algum dos tipos de containers específicos disponíveis que possuem impactos no meio ambiente diferenciados também.

O trabalho de Amin e Zhang (2013) trata das mesmas questões de Salema, Póvoa e Novais (2007), apresentando inicialmente um MILP de minimização de custos, incluindo múltiplas plantas produtivas, centros de coleta, mercados e tipos de produto, e considerando uma cadeia de ciclo fechado. Em seguida, os autores desenvolvem um modelo multiobjetivo com a inclusão de fatores ambientais ponderados, como plantas produtivas que utilizam material reciclável como sendo ambientalmente preferíveis, além de tratar, em um terceiro modelo, da incerteza na demanda e no retorno por meio da programação estocástica baseada em cenários.

Por apresentarem condições intrínsecas dos impactos ambientais das atividades, desenvolver tais coeficientes não é uma atividade trivial, mas que pode ser facilitada com o auxílio de metodologias neste sentido. No intuito de integrar os impactos no meio ambiente e na economia, Kanaan et al. (2012) apresentam um modelo de rede aberta, que considera uma função objetivo que apresenta tanto custos financeiros quanto de redução de impactos ambientais relativos à emissão de gases do efeito estufa (GEE), no caso o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A minimização dos custos financeiros se dá na coleta, disposição, transporte e de instalação na LR, enquanto a redução da emissão de carbono é presente nas operações de coleta e transporte. Cada instalação possui uma pegada de carbono própria e a emissão no transporte é proporcional à quantidade transportada, sendo estas tratadas como custos de crédito-carbono, o que permite a inserção das emissões na função de custo.

O impacto da emissão de GEE também é tratado por Wang, Lai e Shi (2011). No modelo integrado proposto os autores consideram dois objetivos, o primeiro é da minimização do custo total, composto por: custos de instalação, custo de investimento para proteção do meio ambiente, custo de transporte e custo de manuseio. Já o segundo objetivo é composto das quantidades emitidas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em toda a cadeia, desde o transporte até as instalações.

No trabalho de Krikke (2011), o modelo apresentado traz como objetivo a redução da emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na cadeia fechada de máquinas copadoras. Esta emissão aparece na função objetivo em três elementos: no processamento de produtos novos/recuperação dos produtos usados, no transporte e nas instalações. O autor considera as duas primeiras formas de emissão como proporcionais a quantidade de produto no processo,

contudo para o caso do transporte, a emissão é uma média dos modais utilizados, enquanto no processamento há diferença entre produzir um produto novo ou recuperar o produto por meio da remanufatura. Neste trabalho, o modelo apresenta um único objetivo voltado para a minimização das emissões de CO<sub>2</sub>.

No caso de não haver modais, a emissão no transporte apresenta resultados similares ao custo financeiro do transporte. De acordo com Elhedli e Merrick (2012), que inseriram apenas a pegada de carbono no transporte, durante os testes de dominância das parcelas da função objetivo, estes verificam que o comportamento de custos da emissão de CO<sub>2</sub> predominantes foi semelhante ao resultado da dos custos variáveis predominantes, que contemplam custos de operação e de transporte. Esta relação também foi observada por Diabat, A.; et al (2013), pois ao estimarem o preço do crédito carbono como alto, na configuração de rede proposta houve abertura mais facilidades com capacidades menores que evitam o transporte por longas distâncias.

No trabalho de Aksen, Aras e Karaarslan (2009) é proposto um modelo que não inclui o impacto ambiental, mas sim a taxa mínima de coleta desejada por órgãos governamentais. De acordo com os autores, a maximização do lucro de uma empresa pode gerar níveis de recolhimento de produtos usados menor do que o desejado por órgãos ambientais do governo. O modelo decide, além da localização dos centros de retorno dos produtos e alocação entre as zonas de coleta e centros, a unidade de subsídio a ser dado para a companhia por cada produto recolhido e o incentivo dado ao cliente para a entrega do produto usado à companhia. Este incentivo ao cliente poderia ser visto como equidade entre as esferas econômica e social na rede de LR.

### **3.3.4. Modelos para a logística reversa de pneus**

Nesta subseção apresenta-se uma descrição dos trabalhos com modelos voltados para produtos pneumáticos e um modelo de remanufatura de pneus de caminhão. Os três principais estudos com modelos ou abordagens quantitativas de configuração de redes logísticas voltados para os produtos pneumáticos são o de Lagarinhos (2011), Sasikumar, Kannan e Haq (2010) e De Figueiredo e Mayerle (2008).

Lagarinhos (2011) trata do uso de um algoritmo genético para determinar as quantidades enviadas da geração de pneus inservíveis entre ecopontos e as destinações possíveis. O autor emprega de estudos de cenários com relação à localização dos agentes na rede, e utiliza dados operacionais reais coletados durante visitas técnicas. Contudo, o modelo

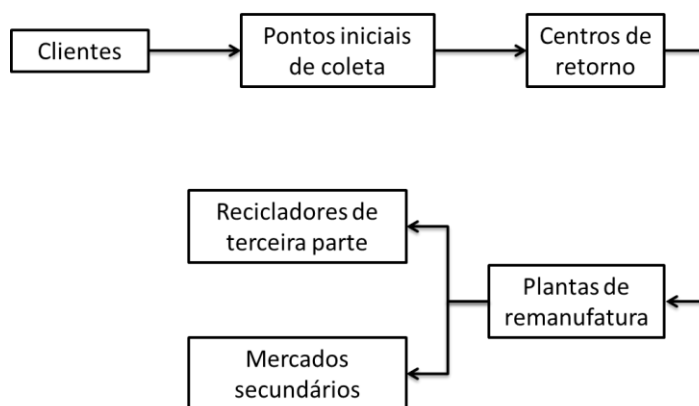
apresenta uma reconfiguração da rede logística, sem decisões como expansão do sistema atual ou a instalação de outros tipos de agentes na rede logística de pneus inservíveis.

No estudo de De Figueiredo e Mayerle (2008), os autores apresentam um modelo de programação inteira mista não linear em dois estágios. O modelo representa a situação na qual existem recicladores que atuam sobre uma determinada região, esta é formada por sub-regiões com quantidades disponíveis de material para a coleta e envio para reciclagem. Os recicladores situam-se, portanto, em centros regionais e a partir de requisições legais, como a meta de destinação, por exemplo, devem fornecer um incentivo para que os agentes coletores efetuem o transporte de cada sub-região para o centro de cada região.

A questão principal no modelo de De Figueiredo e Mayerle (2008) é determinar a quantidade oferecida como incentivo para que os coletores façam suas atividades, respeitando a coleta estipulada pela meta. Para tanto é dada especial atenção acerca das motivações dos agentes que realizam a coleta e estas são representadas por uma expressão de escolha do coletor por uma recicladora de determinada região, que poderá pagar um incentivo maior do que outra recicladora. A decisão, de acordo com os autores, envolve: o preço a ser pago por produto coletado a ser reciclado, o número de centros de coleta instalados e a localização destes.

Já o modelo de configuração de rede apresentado no trabalho de Sasikumar, Kannas e Haq (2010) tem como objetivo a maximização do lucro de uma rede de LR múltiplos níveis de remanufatura de pneus de caminhões. As decisões correspondem ao número de facilidades abertas, a localização e a alocação dos fluxos de produtos. Os tipos de instalação presentes nesta rede estão representados na Figura 4.

Figura 4 - Caso de remanufatura de pneus de caminhão.



Fonte: Adaptado do trabalho de Sasikumar, Kannas e Haq (2010).

O sistema tratado pelos autores tem diversas características as quais estão presentes no caso da LR de pneus inservíveis no Brasil. Alguns exemplos são os clientes geram poucos pneus usados, portanto utilizam-se os pontos iniciais e o custo de transporte não é considerado neste primeiro nível, pois pressupões que a distância entre o cliente e os pontos iniciais de coleta é pequena; não se considera ainda a parcela que vai para disposição final, pois legalmente não é permitido o envio de pneus para aterros. Os centros de retorno têm a função de agregarem o volume dos pontos menores antes de encaminhá-los para a planta produtiva de remanufatura. O modelo de Sasikumar, Kannas e Haq (2010) é voltado para uma rede de remanufatura que funciona com a motivação econômica visando o lucro.

A partir da revisão, nota-se que há poucos modelos que tratam da logística reversa de pneus, tornando-se mais crítico no caso dos pneus inservíveis. As principais lacunas para este estudo estão na proposta de um modelo de programação matemática que permita representar os principais passos para a recuperação do material ou do poder energético específico ao caso dos pneus inservíveis, como, por exemplo, ao apresentar níveis de pré-tratamento para a trituração e conseqüentemente no ganho de eficiência no transporte; do uso de centros regionais, que além de consolidarem a carga de pontos menores, serviriam para seleção dos pneus entre servíveis e inservíveis, e finalmente da diferenciação dos tipos de destinação existentes no país.

Entretanto, o modelo de Sasikumar, Kannas e Haq (2010) pode servir de base para outros produtos que tenham cadeias reversas similares aos dos pneus inservíveis, com possibilidade de pré-processamento e diferentes tipos de destinações a serem escolhidas. De maneira específica, com o uso de objetivos que contenham critérios ambientais e uma meta governamental, que o modelo possa contribuir para o apoio na gestão da rede reversa de pneus inservíveis no país.

### **3.3.5. Síntese das características dos modelos, tendências e lacunas**

As principais características dos problemas de configuração de rede logística observadas na revisão da literatura foram:

- a) **Tipo da cadeia reversa tratada** – neste caso considerou-se o tratamento das cadeias abertas (CA) com facilidades usadas na LR diferentes da LD, e cadeia fechada (CF), na qual há facilidades diferentes das originais, mas parte do material volta para a

cadeia direta ou todas as facilidades são compartilhadas entre os fluxos direto e reverso;

- b) Objetivo** – indica se o modelo é mono ou multi objetivo. Na maioria dos trabalhos, sobretudo os publicados até a metade da década passada, predomina o uso de um único objetivo (U), como em Fleischmann (2001). Outros trabalhos usam modelos multiobjetivo (MO), caso do trabalho de Neto et al. (2008);
- c) Características dos parâmetros** – determinístico ou estocástico. Os parâmetros do problema podem ser conhecidos, caracterizando um problema determinístico ou podem ter probabilidades associadas a sua ocorrência, consistindo em problemas estocásticos. Alguns trabalhos como de Amin e Zhang (2013) e Neto et al. (2008) tentam tratar as incertezas com análise de cenários e a probabilidade de um destes ter maior ocorrência do que os demais.
- d) Número de camadas/níveis** – mono ou multi camadas. Um modelo de configuração de rede logística tem pelo menos uma camada/nível, entre o ponto de origem e destino, e caso surjam centros, empresas de desmanche e outras no caminho, maior será a quantidade de níveis. Com o aumento das camadas da rede espera-se também o aumento no número de variáveis associadas aos agentes da rede e da quantidade de arcos de fluxos percorridos na rede;
- e) Número de itens** – mono ou multi itens. Múltiplos produtos ou itens geralmente exigem destinações diferentes, conforme o tipo e a qualidade destes. Como o caso de Jayaraman, Patterson e Rolland (2003) que trata do retorno de produtos perigosos, aptos para reciclagem, remanufatura ou retorno por defeito, e uma facilidade pode lidar com apenas alguns dos tipos de produtos existentes.
- f) Número de períodos** – com relação ao número de períodos os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. O horizonte de planejamento dos problemas de configuração de rede pode ser considerado como um único período e uma solução estática ou pode ser dividido em períodos menores e planejado em um horizonte de tempo, com uma solução dinâmica, o que depende das características do sistema modelado. A maioria dos modelos estudados é estática, pois se tratam de soluções que buscam a localização de instalações ainda não existentes, mas em poucos casos há uma discussão acerca de como essa configuração estática afetará a qualidade da solução caso esta seja implementada em um caso real ou o porquê da escolha.



A partir das características listadas, no Quadro 2 apresentam-se os trabalhos revisados para o desenvolvimento deste estudo.

Quadro 2 - Trabalhos quantitativos revisados de rede logística reversa.

<b>Autor</b>	<b>Tipo da cadeia reversa tratada</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Número de níveis</b>	<b>Número de itens</b>	<b>Número de períodos</b>	<b>Aplicação</b>
<b>Este trabalho</b>	Aberta	Único	Determinístico	Multi	Único	Dinâmico	Rede reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo, Brasil.
<b>Achillas et al. (2012)</b>	Aberta	Multi	Determinístico	Multi	Unico	Estático	Rede reversa de eletrônicos em região da Grécia
<b>Aghezzaf (2005)</b>	Não há	Único	Estocástico	Mono	Unico	Dinâmico	Não há
<b>Aksen, Aras e Karaarslan (2009)</b>	Aberta	Único	Determinístico	Mono	Unico	Estático	Não há
<b>Alumur et al. (2012)</b>	Aberta	Único	Determinístico	Multi	Multi	Dinâmico	Rede reversa de maquinas de lavar na Alemanha
<b>Amin e Zhang (2013)</b>	Fechada	Multi	Determinístico	Multi	Multi	Estático	Rede reversa de máquinas copiadoras
<b>Arabani e Farahani (2012)</b>	Não há	Na	Determinístico	Mono	Unico	Dinâmico	Não há
<b>Barros, Dekker e Scholten (1998)</b>	Aberta	Único	Determinístico	Multi	Multi	Estático	Reciclagem da areia na Holanda
<b>Contreras e Fernandez (2012)</b>	Não há	Não há	Determinístico	Mono	Unico	Estático	Não há
<b>Das e Chowdhury (2012)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Mono	Multi	Estático	Não há
<b>De Figueiredo e Mayerle (2008)</b>	Aberta	Multi	Estocástico	Mono	Unico	Estático	Determinar taxa para favorecer o retorno dos pneus inservíveis
<b>Demirel e Gokçen (2008)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Mono	Multi	Estático	Não há
<b>Diabat et al. (2013)</b>	Fechada	Multi	Determinístico	Multi	Multi	Estático	Não há
<b>Elhedli e Merrick (2012)</b>	Não há	Único	Determinístico	Multi	Unico	Estático	Não há
<b>Fleischmann (2001)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Multi	Unico	Estático	Rede de fotocopiadoras e

<b>Autor</b>	<b>Tipo da cadeia reversa tratada</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Número de níveis</b>	<b>Número de itens</b>	<b>Número de períodos</b>	<b>Aplicação</b>
							de papel na Europa
<b>Jayaraman, Patterson e Rolland (2003)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Mono	Multi	Estático	Não há
<b>Kannan, et al. (2012)</b>	Aberta	Multi	Determinístico	Multi	Único	Estático	Não há
<b>Krikke, Kooi e Schuur (1999)</b>	Aberta	Único	Determinístico	Multi	Multi	Estático	Rede reversa de automóveis
<b>Krikke (2011)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Multi	Multi	Estático	Rede de fotocopiadoras de uma empresa
<b>Lagarinhos (2011)</b>	Aberta	Unico	Determinístico	Mono	Único	Estático	Reconfiguração da rede de pneus inservíveis no Brasil
<b>Mutha e Pokharel (2009)</b>	Fechada	Único	Determinístico	Mono	Multi	Dinâmico	Não há
<b>Neto et al. (2008)</b>	Fechada	Multi	Estocástico	Mono	Único	Estático	Rede de papel e celulose da Europa
<b>Salema, Póvoa e Novais (2007)</b>	Fechada	Único	Estocástico	Multi	Multi	Estático	Rede de uma companhia ibérica
<b>Sasikumar, Kannas e Haq (2010)</b>	Aberta	Único	Determinístico	Multi	Único	Dinâmico	Rede reversa de pneus de caminhão
<b>Wang, Lai e Shi (2011)</b>	Não há	Multi	Determinístico	Mono	Multi	Estático	Rede direta de uma companhia chinesa

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 2, é possível notar que a partir da metade da década passada, alguns trabalhos começaram a discutir sobre possíveis objetivos que não apenas os econômicos de minimização de custos ou maximização de lucro. A busca pela sustentabilidade ambiental dos sistemas produtivos é possivelmente um dos maiores motivadores dessa tendência, uma vez que a busca pelo ótimo financeiro não representa equidade para com o meio ambiente, por exemplo, em Neto et al. (2008), as instalações com menor impacto ambiental são as que custam mais para serem implementadas no curto prazo, contudo os benefícios em longo prazo podem tornar tais decisões cruciais para a cadeia logística.

Ao construírem os coeficientes da função de impacto ambiental de seu modelo de logística reversa no setor de papel e celulose, Neto et al. (2008) declaram três passos importantes: estimar o valor do impacto por alguma unidade padrão, como exemplo, toneladas de CO<sub>2</sub> emitido; normalizar os impactos com base em um nível de referência, como exemplo, o valor do maior impacto apresentado; ponderar os impactos conforme exigências legais ou restrições ambientais. E esses preceitos são relevantes para que a equidade econômica versus meio ambiente possa ser avaliada de uma maneira correta, promovendo insights sobre a rede logística e comportamentos esperados quando se tem diretrizes econômicas predominantes ou diretrizes ambientais, ou mesmo quando estas podem coexistir e indicar melhores configurações de localidades e fluxos dentro da rede logística.

A programação estocástica também apresenta uma maior tendência nos trabalhos nos últimos anos. Em uma rede logística, especialmente na reversa, conforme discutido por Salema, Póvoa e Novais (2007), as incertezas surgem quando não é possível prever a demanda por produtos na entrada, isto é, na coleta. A demanda pode ser entendida na logística reversa como a quantidade disponível para o retorno, e também a qualidade necessária de algum dos produtos, pois pode haver interesse econômico em algum de seus componentes.

Entretanto, nenhuma tendência é constatada nas demais características do como: se o modelo é capacitado, integrado ou não, e nas quantidades de níveis e produtos, uma vez que tais características são intrínsecas de cada tipo de problema ou situação real que pode ser abstraída por meio de um modelo de programação matemática.

Ainda, como lacuna observa-se que poucos trabalhos tratam dos pneumáticos em conjunto com uma rede reversa que considera os tipos de destinação e etapas intermediárias que modificam os fluxos da rede como a triagem dos pneus em servíveis e inservíveis, e a trituração dos pneus como modificador da quantidade transportada e conseqüentemente ganho de eficiência.

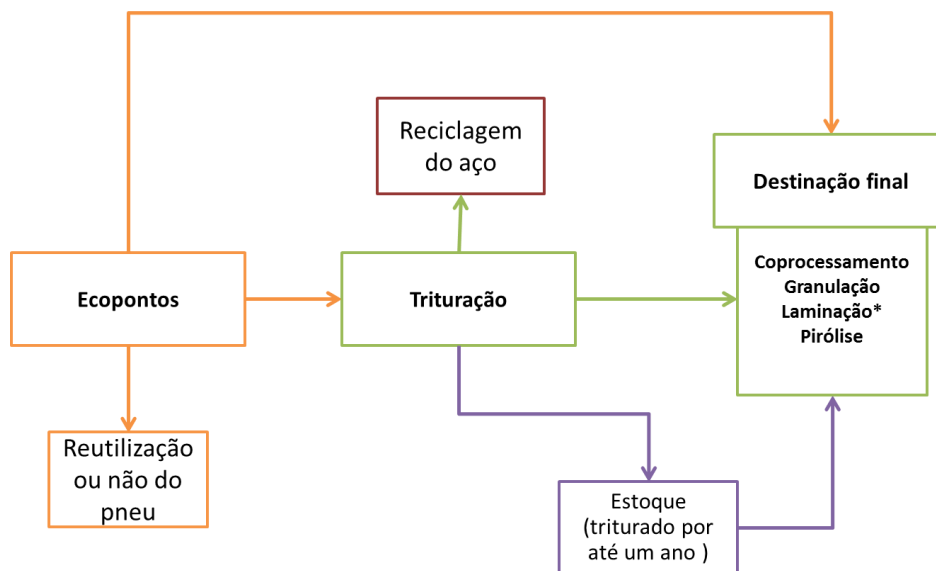
Por fim, a extensão do modelo da emissão de dióxido de carbono, por meio do crédito de carbono na função objetivo, trata de percepções sobre o comportamento ambiental da rede frente a um critério ambiental conhecido e que ainda é pouco explorada na literatura.

Este estudo apresenta assim um modelo inteiro-linear misto de múltiplos períodos que, apesar de considerar a triagem dos pneus e conseqüentemente a disponibilidade destes no mercado secundário, é de cadeia aberta. São apresentadas considerações que agregam as decisões já existentes hoje na rede e também de possibilidades de melhoria da rede. Como dito anteriormente, o modelo apresenta custos, rendas e diferenciação de processos e destinações. Por fim, além do desenvolvimento inicial a lacuna do critério ambiental será estudada por meio do crédito de carbono.

#### 4. ABORDAGEM PROPOSTA PARA O PROBLEMA

A rede atual conta com ecopontos que funcionam como locais de coleta e armazenamento temporário dos pneus nos municípios. Nos ecopontos, pode ou não haver um processo de triagem dos pneus, portanto, pneus servíveis podem ser destinados como inservíveis dependendo do caso. A partir dos ecopontos, os pneus usados seguem para as empresas de destinação. Algumas destas empresas podem efetuar o processo de trituração, configurando uma etapa intermediária antes da efetiva destinação. Enquanto outras empresas podem destinar o pneu usado inteiro, como no coprocessamento em fornos de cimenteiras. Na Figura 5 apresenta-se a estrutura da rede atual.

Figura 5 - - Rede logística atual.



\*A laminação só é possível com pneus inteiros.

Fonte: Elaborado pelo autor.

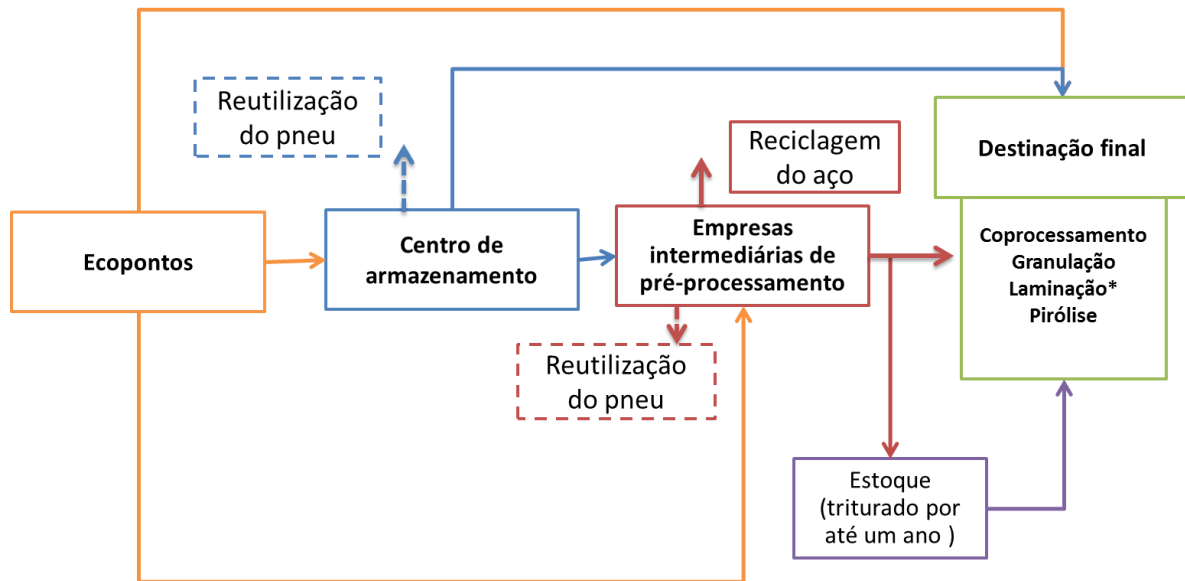
Portanto, na rede atual há três níveis, os ecopontos, as empresas intermediárias que realizam um pré-processamento (trituração) e empresas de destinação final; e, em cada nível, há um custo diferente de manuseio ou processamento dos pneus. Embora o transporte de pneus usados para serem destinados em outros Estados ocorra de acordo com a legislação vigente, o ideal seria a destinação dos pneus inservíveis o mais próximo possível da fonte geradora, o que evitaria transferência de passivo ambiental para outros Estados.

A proposta deste trabalho consiste no estudo de instalações intermediárias que atuariam na coleta regional, triagem e tratamento próximo à fonte geradora, neste caso evitar o envio para fora do Estado de São Paulo. Os níveis adicionais são (a) nível composto pelos

chamados Centros de Armazenamento com a função de consolidar a carga dos ecopontos e realizar a triagem padronizada dos pneus usados em servíveis e inservíveis; e (b) um nível com as chamadas Empresas Intermediárias de pré-processamento, que além da triagem, podem triturar o pneu e separar a fração de aço presente nestes.

A Figura 6 apresenta o sistema proposto e modelado.

Figura 6 - Rede logística conceitual proposta para modelagem.



\* A laminação só é possível com pneus inteiros.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que o sistema proposto contém a rede atual, portanto trata-se da adição de um nível a mais, os centros (C), e de mais candidatos para as empresas intermediárias (K).

#### 4.1. CONSIDERAÇÕES PARA A MODELAGEM

Para o desenvolvimento de um modelo que apoie as decisões envolvidas no problema são considerados os seguintes conjuntos de nós:

- a) **Ecopontos (P)**– pontos de origem de pneus usados, que consistem em locais onde os consumidores descartam os produtos.
- b) **Centros de Armazenamento (C)** – locais propostos com função de consolidar e realizar a triagem os pneus advindos dos ecopontos.
- c) **Empresas intermediárias de pré-processamento (K)** – empresas que realizam a atividade de trituração do pneu inservível estocam o pneu triturado e encaminham o produto resultante para empresas de destinação final. O pneu inservível quando triturado pode ser armazenado para cumprimento da meta por até um ano. No modelo,

a instalação de empresas intermediárias pode ocorrer em locais onde se situam empresas de destinação ou em locais candidatos para a instalação de novas empresas.

- d) Empresas de destinação final (F)** – empresas que realizam os processos finais que contabilizam como destinações. No modelo, são considerados quatro tipos de destinação, praticadas no Estado de São Paulo: coprocessamento, granulação, laminação, e a pirólise.

Com relação às decisões de fluxos da rede, no início da rede, estão os ecopontos (*P*) que recebem pneus usados gerados pela comunidade que devem ser destinados. O material dos ecopontos pode ser enviado para os centros de armazenamento (*C*), para as empresas intermediárias de pré-processamento (*K*) ou para as empresas de destinação final (*F*).

Nos centros de armazenamento (*C*), os pneus usados são triados e separados em servíveis, com condição de reutilização ou reforma, e inservíveis, que devem obrigatoriamente seguir para as destinações existentes. Após a triagem, a fração de pneus servíveis é disponibilizada para o mercado secundário. A fração de pneus inservíveis segue para as empresas intermediárias (*K*) ou para as empresas de destinação final.

O fluxo de entrada nas empresas intermediárias de pré-processamento é triado e o que for considerado inservível é triturado. No processo de trituração, uma fração de aço é separada e segue para o mercado secundário. A fração dos pneus triturados restante, composta basicamente pela borracha, é enviada para as empresas de destinação final (*F*), exceto para a tecnologia de laminação – que exige produtos inteiros para o processamento. Pode ocorrer a triagem, e a fração de pneus servíveis passam pelo mesmo processo do apresentado nos centros de armazenamento (*C*), sendo disponibilizados para o mercado secundário. Se houver necessidade, a borracha triturada pode ser estocada nas empresas intermediárias (*K*), mas devem obrigatoriamente seguir para as empresas de destinação (*F*), pois é uma forma de destinação temporária.

A quantidade de entrada nas empresas de destinação final (*F*) vem dos ecopontos (*P*), centros de armazenamento (*C*) e empresas intermediárias de pré-processamento (*K*), e é considerada como a efetivamente destinada para cumprimento da meta anual.

Quanto às decisões de abertura, considera-se que os ecopontos (*P*) não têm decisões de abertura, sendo fixos e com uma geração proporcional à frota do respectivo município que se encontram. As empresas de destinação final (*F*) também são fixas e com capacidades de processamento definidas. Para os centros de armazenamento (*C*) e empresas intermediárias



(K) considera-se que todos são candidatos e podem ser instalados em diferentes níveis de capacidade.

Em relação aos custos consideraram-se três tipos de custos:

- e) **Variáveis** – relacionado ao manuseio ou processamento dos pneus e dependem da quantidade presente nos fluxos;
- f) **Transporte** – relacionado ao transporte de material entre os níveis da rede e dependem da quantidade transportada e da distância percorrida;
- g) **Fixos** – relacionado à instalação de facilidades na rede e dependem do tipo de instalação e sua capacidade;

Nos custos unitários ou variáveis, para os ecopontos considerou-se um custo unitário de manuseio associado ao despacho do material para outras entidades da rede. Nos centros (C) considerou-se um custo associado à triagem e manuseio dos pneus usados.

Nas empresas intermediárias (K), considerou-se além do custo de triagem, um custo de trituração. E caso haja estoque, há um custo por quantidade estocada. Há ainda um custo unitário do processamento dado nas empresas de destinação final (F), este custo é diferenciado entre os diferentes métodos de destinação e se o pneu está inteiro ou triturado.

No custo de transporte, há custos associados ao transporte dos pneus inteiros, um custo reduzido caso os pneus sejam triados, pois o rearranjo dos pneus pode significar ganhos na quantidade transportada; e custos reduzidos para o transporte dos pneus triturados. No último caso, os custos de transporte são sensivelmente menores, pois quando triturado é possível transportar uma massa maior se comparado ao pneu inteiro. De acordo com Lagarinhos (2011) um caminhão consegue carregar, em média, 27 toneladas de pneus triturados, em contrapartida, em média, apenas 10 toneladas de pneus inteiros.

Há custos fixo da instalação dos centros de armazenamento (C) e empresas intermediárias de pré-processamento (K). Tais custos dependem da capacidade a ser instalada.

Considerou-se a geração de renda em alguns agentes da rede reversa. Há uma renda unitária referente à venda de pneus em condição de reuso ou reforma; uma renda unitária para a separação do aço que pode ser vendida para empresas siderúrgicas; e uma renda nas destinadoras, relativa à venda dos subprodutos reciclados – como solados de borracha, pó da borracha, por exemplo – e da economia com a substituição da borracha como combustível – caso do carvão nos fornos de cimenteiras.

Nesta rede logística, a quantidade a ser destinada é estabelecida através da meta legal. Esta meta é baseada na quantidade de pneus produzidos e importados disponíveis no mercado de reposição nacional, conforme cálculos apresentado no Apêndice A. Quando não é possível

dar destinação a alguma quantidade de pneus inservíveis, no modelo, incide-se uma penalização representada por um custo financeiro do passivo ambiental daquele ano, por exemplo, uma multa do órgão ambiental. Neste sistema, considera-se que a meta jamais ultrapassa a quantidade disponível para a destinação, isto se deve a:

- h) A meta é dada por um cálculo que considera a fração do produto perdida ao longo do uso do pneu e, portanto, além de não passível de destinação, adequa a quantidade a ser destinada.
- i) O mercado de reposição é voltado para atender à frota existente no país em um determinado ano, portanto, se houver excedente produtivo, as empresas podem exportar os pneus ou utilizá-los em carros novos, o que permite o controle da quantidade disponível no mercado de reposição. Deste modo, a geração de pneus usados tende a ser proporcional à frota de veículos em uso.

A partir das considerações do sistema proposto, apresenta-se o modelo de configuração de rede reversa de pneus inservíveis que deve ter:

- j) **Conservação do fluxo de entrada e saída** – o modelo deve obedecer aos fluxos de entrada e saída nos centros de armazenamento e a perda de massa nos centros e intermediários, ocasionada pela triagem de pneus servíveis, separação do aço e a possibilidade de estoque;
- k) **Capacidades** - Respeitar as capacidades de cada facilidade, caso estejam presentes na rede logística e haver carga somente se uma instalação esteja aberta;
- l) **Localização de Facilidades** - instalar apenas uma facilidade de cada categoria por local, isto é, pode-se ter um intermediário em conjunto a uma destinação, mas não é possível abrir dois intermediários no mesmo local ou dois centros, por exemplo;
- m) **Único produto** - Tratar todos os pneus em forma de unidade de massa, sem distinção entre tipos de pneus;

Uma vez que nos estoques, há a necessidade de tratamento no ano posterior, incorrendo em custos de transporte e de destinação; e que as decisões estratégicas de localização são importantes pelos custos envolvidos na instalação das facilidades, o modelo apresenta horizonte de planejamento em múltiplos períodos discretos.

O custo fixo é crítico, pois o investimento inicial em uma empresa de intermediária de pré-processamento é da ordem de milhões de reais. Deste modo, um horizonte de planejamento discreto com um prazo maior que um ano deixara o preço por ano menor, e espera-se que os tipos de instalação mais baratas (centros de armazenamento) e mais caras

(empresas intermediárias) tenham interações diferentes com horizontes de curto e longo prazo.

#### 4.2. MODELO DE CONFIGURAÇÃO DE REDE

Esta subsecção apresenta uma proposta de modelo de programação linear inteira mista para representar o problema de configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo. O modelo possui como características:

- a) **Objetivo** – minimizar os custos totais e a penalização pelo não cumprimento da meta, enquanto maximiza a renda obtida com a triagem e subprodutos dos processos de destinação;
- b) **Multiperíodo** – o horizonte de planejamento é dividido e os parâmetros utilizados proporcionais à estes subperíodos.

Sejam:

##### Índices:

$i, j$  – os agentes (nós) da rede.

$t$  – período de tempo.

$l$  – nível de capacidade.

$m$  – tipos de destinação final ( $m_1$  – coprocessamento;  $m_2$  – granulação,  $m_3$  – laminação,  $m_4$  – pirólise).

##### Conjuntos

$P$  – ecopontos.

$C$  – centros de armazenamento.

$K$  – empresas intermediárias de pré-processamento.

$F$  – agentes denominados de empresas de destinação final.

$H$  – conjunto formado pela união de todos os conjuntos de entidades da rede logística, portanto  $H = (P \cup C \cup K \cup F)$ .

$T$  – conjunto de períodos no horizonte de planejamento.

$L$  – conjunto de níveis de capacidade.

$M$  – conjunto de tecnologias de destinação final.

### Fluxos de saída

$$S_1 - \{(i, j): i \in P \wedge j \in (C \cup K \cup F)\}.$$

$$S_2 - \{(i, j): i \in C \wedge j \in (K \cup F)\}.$$

$$S_3 - \{(i, j): i \in K \wedge j \in F\}.$$

### Fluxos de entrada

$$E_1 - \{(j, i): i \in P \wedge j \in C\}.$$

$$E_2 - \{(j, i): i \in (P \cup C) \wedge j \in K\}.$$

$$E_3 - \{(j, i): i \in (P \cup C \cup K) \wedge j \in F\}.$$

### Parâmetros

$cv_{it} \mid i \in (H - F) \wedge t \in T$  – custo unitário do manuseio/processamento no agente  $i$  no período  $t$ .

$cd_{imt} \mid i \in (H - F) \wedge m \in M \wedge t \in T$  – custo unitário do processamento no tipo de destinação  $m$  no agente  $i$ , no período  $t$ .

$ce_{it} \mid i \in K \wedge t \in T$  – custo unitário de estoque no agente  $i$  para o período  $t$ .

$cf_{il} \mid i \in (C \cup K) \wedge t \in T$  – custo fixo de instalação  $l$  do agente  $i$  no nível, no período  $t$ .

$ct_{ijt} \mid (i, j): (i, j) \in (S_1 \cup S_2 \cup S_3) \wedge t \in T$  – custo unitário de transporte entre os agentes  $i$  e  $j$  no período  $t$ .

$u_{it} \mid i \in K \wedge t \in T$  – renda unitária da venda da fração de aço contida no produto retirado pelo agente  $i$  no período  $t$ .

$w_{it} \mid i \in (C \cup K) \in P \wedge t \in T$  – renda unitária da venda do produto pelo agente  $i$  no período  $t$ .

$fm_{imt} \mid i \in K \wedge m \in M \wedge t \in T$  – renda unitária obtida no agente  $i$  com o tipo de de destinação ( $m$ ), no período  $t$ .

$d_{ij} \mid (i, j): (i, j) \in (S_1 \cup S_2 \cup S_3) \wedge t \in T$  – distância entre os agentes  $i$  e  $j$ .

$g_{it} \mid i \in P \wedge t \in T$  – geração para coleta no agente  $i$  no período  $t$ .

$c_{il} \mid i \in C \wedge t \in T$  – capacidade de instalação no nível  $l$  do agente  $i$  no período  $t$ .

$cf_{ilt} \mid i \in (K \cup F) \wedge t \in T$  – custo fixo de instalação no nível  $l$  do agente  $i$  no período  $t$ .

$ci_{il} \mid i \in K \wedge t \in T \wedge l \in L$  – capacidade de estoque no nível  $l$  do agente  $i$ , no período  $t$ .

$r$  – fração média de pneus servíveis presente no pneu usado coletado dos ecopontos.

$a$  – fração média de aço separado no processo de trituração.

$\alpha_t$  – penalização unitária por não cumprimento da meta, no período  $t$ .

$N_t \mid t \in T$  – meta total de produtos a serem destinados no período  $t$ .

### Variáveis

$X_{ijt} \mid \{(i, j): (i, j) \in (E_1 \cup E_2) \wedge t \in T\}$  – quantidade de produto do agente  $i$  transportado para o agente  $j$ , no período  $t$ .

$X_{jit} \mid \{(j, i): (j, i) \in S_1 \wedge t \in T\}$  – quantidade de produto do agente  $j$  para o agente  $i$ , no período  $t$ .

$D_{jimt} \mid \{(j, i): (j, i) \in (E_3) \wedge t \in T\}$  - quantidade de produto do agente  $j$  transportado para ser destinado para o agente  $i$  com o tipo de destinação  $m$ , no período  $t$ .

$W_{it} \mid i \in \{C \cup K\} \wedge t \in T$  - quantidade de produto vendido após a separação no agente  $i$  no período  $t$ .

$I_{it} \mid i \in K \wedge t \in T$  – estoque de produto no agente  $i$  no final do período  $t$ .

$U_{it} \mid i \in K \wedge t \in T$  – quantidade da fração de aço vendida no agente  $i$  no período  $t$ .

$Y_{ilt} \mid i \in (C \cup K) \wedge t \in T$  – binário que há instalação/expansão do agente  $i$  no nível  $l$  no período  $t$  ( $Y_{it} = 1$ ) ou não ( $Y_{it} = 0$ ).

$Z_{ilt} \mid i \in (C \cup K \cup F) \wedge t \in T$  – binário que controla as instalações/expansões.

$\gamma_t \mid t \in T$  – penalização total por não cumprimento da meta no período  $t$ .

A função objetivo deve minimizar a diferença entre o custo e a renda totais, enquanto minimiza ainda a penalização por não cumprimento da meta, conforme expressão (1)

$$\text{Minimizar } f(\mathbf{X}) = (\text{custos}) - (\text{renda}) + (\text{penalização}). \quad (1)$$

A expressão 1 pode ser escrita com as componentes de 1.a até 1.e, como:

$$\text{Min } f = (1.a+1.b+1.c) - (1.d) + 1.e.$$

Na expressão (1) a primeira componente trata dos custos totais. Estes são compostos pelos custos unitários de manuseio, de processamento e de estoque; custos de transporte; e custos fixos de instalação. O custo unitário de manuseio nos ecopontos é multiplicado pela quantidade de saída. No caso dos custos de processamento nos centros de armazenamento, empresas intermediárias e empresas de destinação, o fluxo de entrada é utilizado para o cálculo do custo total. Há também o custo total da quantidade estocada nas empresas intermediárias ( $I_i$ ). Os custos são representados na expressão (1.a).

$$\begin{aligned} & \sum_{(i,j):(i,j) \in S_1} \sum_{t \in T} \{cv_{jt} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_1 \cup E_2} \sum_{t \in T} (cv_{jt} \times X_{jit}) \\ & + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{t \in T} (cd_{jmt} \times D_{ijmt}) + \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (ce_{it} \times I_{it}) \end{aligned} \quad (1.a)$$

Nos custos de transporte, a quantidade enviada de produto por um arco  $i, j$  multiplicada pelo custo unitário de transporte ( $ct_{ij}$ ) pela distância percorrida ( $d_{ij}$ ) resulta no custo total no horizonte de planejamento. Os custos de transporte são dados pelos fluxos de saída em cada nível ( $S$ ), e o custo de transporte no conjunto de arcos  $S_1, S_2$  e  $S_3$  é decrescente devida à triagem que ocorre tanto nos centros de armazenamento ( $C$ ) quanto nas empresas intermediárias ( $K$ ), e da trituração nesta última, conforme descrito nas considerações do modelo.

$$\sum_{(i,j):(i,j) \in S_1 \cup S_2 \cup S_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \{ct_{ijt} \times d_{ij} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} \quad (1.b)$$

Os custos fixos totais de instalação no horizonte de planejamento são dos centros de armazenamento ( $C$ ) e das empresas intermediárias de pré-processamento ( $K$ ). Estes são

multiplicados pela variável de instalação ( $Y_{itl}$ ) que indica se uma instalação foi realizada no horizonte de planejamento.

$$\sum_{i \in \{P \cup K\}} \sum_{t \in T} (cf_{itl} \times Y_{itl}) \quad (1.c)$$

A segunda componente da expressão (1) trata da renda total obtida na rede. a soma da renda obtida com o retorno dos pneus servíveis ( $W_i$ ) para o mercado secundário, mais a renda da venda da fração de aço presente nos pneus ( $U_i$ ) e a renda obtida com os subprodutos da destinação, como o pó da borracha ( $m_2$ ), cintas de borracha ( $m_3$ ), óleos combustíveis e graxas ( $m_4$ ), ou da economia obtida com a substituição de matérias-primas, caso do coprocessamento ( $m_1$ ) no qual se substitui parte do coque como combustível do processo.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in \{C \cup K\}} \sum_{t \in T} (w_{it} \times W_{it}) + \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (u_{it} \times U_{it}) \\ & + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (fm_{imt} \times D_{jimt}) \end{aligned} \quad (1.d)$$

A terceira componente da expressão (1) trata da penalização pelo não cumprimento da meta estabelecida para a destinação de pneus. A penalização ( $\alpha_t$ ) incide sobre a diferença na quantidade de pneus que deveriam ser tratados na meta ( $N_t$ ) pelo efetivamente destinado nas empresas de destinação final, portanto  $j$  pertence ao subconjunto  $F$ .

Para o caso dos fluxos entre as empresas intermediárias ( $K$ ) devem-se considerar ainda os valores vendidos da fração de aço ( $U_{it}$ ), pois são considerados para o cumprimento da meta legal. Deve-se associar uma restrição adicional para que a penalização não seja negativa nos períodos  $t$ , na restrição (16) mostrada a seguir, e com isso, insere-se uma variável  $\gamma_t$  que representará a penalização em cada um  $t$ .

$$\sum_{t \in T} \gamma_t \quad (1.e)$$

As restrições do modelo incluem os fluxos e as instalações da rede reversa.

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j):j \in S_1} \sum_{m \in M} (X_{ijt} + D_{ijmt}) \leq g_{it} \quad \forall i \in P, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in E_1} X_{jit} = \sum_{j \in S_2} \sum_{m \in M} (X_{ijt} + D_{ijmt}) + W_{it} \quad \forall i \in C, t \in T \quad (3)$$

$$W_{it} \leq r \times \sum_{j \in E_1} X_{jit} \quad \forall i \in C, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{j \in E_2} X_{jit} + I_{i(t-1)} = \sum_{j \in S_3} \sum_{m \in M} (X_{ijmt} + D_{ijmt}) + \quad \forall i \in K, t \in T \quad (5)$$

$$I_{it} + U_{it} + W_{it} \\ \sum_{j \in S_3} \sum_{m \in M} D_{ijmt} \geq I_{i(t-1)} \quad \forall i \in K, t > 1 \quad (6)$$

$$W_{it} \leq r \times \sum_{j \in P} X_{jit} \quad \forall i \in K, t \in T \quad (7)$$

$$U_{it} = a \times \left( \sum_{j \in E_2} X_{jit} - W_{it} \right) \quad \forall i \in K, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{j \in E_1} X_{jit} \leq \sum_{l \in L} (c_{il} \times Z_{ilt}) \quad \forall i \in C, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j \in E_2} X_{jit} \leq \sum_{l \in L} (c_{il} \times Z_{ilt}) \quad \forall i \in K, t \in T \quad (10)$$

$$I_{it} \leq \sum_{l \in L} (c_{il} \times Z_{ilt}) \quad \forall i \in K, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{j \in E_3} D_{jimt} \leq c_{im} \quad \forall i \in F, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{t \in T} Y_{ilt} \leq 1 \quad \forall i \in C \vee K, t \in T \quad (13)$$

$$Y_{ilt} \geq Z_{ilt} - Z_{il(t-1)} \quad \forall i \in C \vee K, \quad (14)$$

$$Z_{ilt} \geq Z_{il(t-1)} \quad \forall i \in C \vee K, l \in L, t \in T \quad (15)$$

$$\gamma_t \geq \alpha_t \times \left\{ N_t - \left( \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{m \in M} D_{ijmt} + \sum_{i \in K} U_{it} \right) \right\} \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$X_{ijt}, D_{ijmt}, W_{it}, U_{it}, I_{it}, \gamma_t \geq 0 \quad \text{n\~{a}o negatividade} \quad (17)$$

$$Y_{ilt}, Z_{ilt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{C \cup K\}, \quad (18)$$

$$l \in L$$

A função objetivo (1)  composta pelas expressoes de (1.a) ate (1.e).



A restrição (2) trata de limitar, mas não obrigar, a saída de um determinado ecoponto ( $P$ ) como no máximo a geração naquele ecoponto em um período ( $t$ ). Note que não é necessário a destinação, podendo esta ser no máximo a quantidade gerada.

A restrição (3) trata da conservação de fluxo nos centros de armazenamento ( $C$ ) com as entradas advindas dos ecopontos ( $P$ ) sendo igual à saída de material para as empresas intermediárias e destinações finais, mais a quantidade triada de pneus servíveis ( $W_{it}$ ). Esta quantidade de pneus triados é limitada pela restrição (4), representada por uma percentagem ( $r$ ) que pode ser triada em relação ao total de entrada nos centros de armazenamento ( $C$ ). Esta restrição é importante, pois limita a taxa de retorno que implica em renda para o sistema logístico.

Na restrição (5), a conservação nos intermediários é dada como a quantidade de entrada advinda dos ecopontos ( $P$ ) mais o estoque do período anterior ( $I_{i(t-1)}$ ) como igual à saída para as destinações finais ( $F$ ), exceto na tecnologia de destinação ( $m_3$ ), mais a quantidade retornada de pneus servíveis ( $W_{it}$ ), da venda do aço ( $U_{it}$ ) e da quantidade estocada ( $I_{it}$ ).

Para obrigar o tratamento da quantidade estocada ( $I_{it}$ ), a restrição (6) determina que a quantidade de saída no período atual seja no mínimo igual à quantidade estocada no período anterior ( $I_{i(t-1)}$ ) em uma empresa intermediária ( $K$ ). As duas restrições são representadas na Figura 9.

A restrição (7) limita a quantidade de pneus retornados nas empresas intermediárias de pré-processamento ( $K$ ), entretanto, desconsidera a carga advinda dos centros de armazenamento como passíveis de triagem, portanto  $j \in P$ . Já a restrição (8) impõe que a quantidade total de aço ( $U_{it}$ ) separado é igual à percentagem de aço ( $a$ ) contida no pneu multiplicado pela quantidade total de entrada nas empresas intermediárias ( $K$ ).

A restrição (9) impõe que ocorra envio de material para um determinado centro de armazenamento ( $C$ ) caso este esteja aberto ( $Z_{ilt} = 1$ ) em um período ( $t$ ) até o máximo de sua capacidade em um determinado nível ( $c_{il}$ ). De forma análoga são definidas as restrições (10) e (11) para as capacidades das empresas intermediárias de pré-processamento e seus estoques, respectivamente. Como as empresas de destinação final ( $F$ ) estão abertas, apenas a capacidade deve ser respeitada, dada pela restrição (12).

A restrição (13) implica a abertura das instalações em um único nível de capacidade ( $l$ ), por exemplo, caso um centro de armazenamento ( $C$ ) seja instalado em uma condição ( $l = 1$ ), não é permitida a instalação de outro centro em outra condição ( $l = 2$ ), por exemplo.

A restrição (14) obriga que uma instalação tenha seu custo fixo contabilizado caso seja instalada, isto é, quanto  $Z_{ilt} = 1$  e  $Z_{il(t-1)} = 0$  a instalação foi realizada entre os período, e caso  $Z_{ilt} = Z_{il(t-1)}$  tem-se  $Y_{il} = 0$ . Esta restrição aplica-se aos centros de armazenamento ( $C$ ) e as empresas intermediárias de pré-processamento ( $K$ ), e para garantir que após a abertura nenhuma instalação seja fechada, a restrição (15) obriga que se uma instalação foi aberta, ela permanece assim até o último período no horizonte de planejamento, isto é,  $Z_{ilt} \geq Z_{il(t-1)}$ . Esta escolha é devido aos altos custos de instalação das facilidades, sobretudo das empresas intermediárias.

Na restrição (16) é imposta a não negatividade da variável de penalização  $\gamma_t$  em um determinado período ( $t$ ). Esta restrição é necessária para que a penalização não atue como uma falsa renda, isto é, subtraindo valores da função objetivo caso a destinação seja superior à meta.

A restrição (17) garante a não negatividade das variáveis de fluxo ( $X_{ijt}, D_{ijmt}, W_{it}, U_{it}, X_{eit}$ ). Por fim, a restrição (16) trata do caráter binário das variáveis de abertura e condição em cada período ( $Y_{ilt}, Z_{ilt}$ ). Devido ao caráter combinatorio e binário das variáveis de instalação, espera-se que o modelo apresente dificuldade de resolução e os tempos computacionais para alcançarem-se resultados ótimos sejam altos ou mesmo que não se atinja valores ótimos.

## 5. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta os estudos computacionais realizados com o modelo proposto utilizando-se os dados reais do Estado de São Paulo. Os dados foram coletados de trabalhos acadêmicos na área, em sites de associações da indústria de pneumáticos e das entidades da rede reversa e de fontes governamentais.

### 5.1. DESCRIÇÃO DOS DADOS

No conjunto de dados considerados existem fixos 475 ecopontos, dispostos em 216 municípios. Estes municípios foram considerados como potenciais locais para a instalação de centros de armazenamento, portanto são 216 candidatos para centros de armazenamento, 58 locais candidatos como empresas intermediárias e 17 pontos fixos de empresas de destinação final.

Os custos de instalação, operação e transporte, e da renda consistem em valores obtidos na literatura e a unidade de custo definida no trabalho é definida na moeda nacional (Reais – R\$). Os valores de todos os parâmetros utilizados estão no endereço eletrônico indicado no Apêndice B.

- a) **Localização** - obtidas com a coleta das coordenadas no *Google Maps*®, a partir do arquivo do Relatório de Pneumáticos (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013) para ecopontos, empresas intermediárias e empresas de destinação final. Para os centros de armazenamento utilizaram-se os municípios com ecopontos existentes, e os candidatos à instalação de empresas intermediárias de pré-processamento e de destinação final são considerados os mesmos das destinações (até  $k = 17$ ), pois os equipamentos para trituração dos pneus inservíveis podem estar presentes nas empresas de destinação final, como é o caso do coprocessamento. Os demais candidatos à empresas intermediárias localizam-se nos municípios centrais das chamadas Regiões de Governo (SEADE, 2013).
- b) **Distância entre os agentes** - Os valores de distância foram calculados através da Fórmula de Haversine. A Fórmula de Haversine utiliza de relações trigonométricas e do diâmetro da Terra para estimar valores de distâncias diretas entre dois pontos

percorridas na superfície de uma grande esfera, entretanto, não leva em consideração a malha rodoviária ou o relevo no cálculo.

A equação (19) apresentada a seguir (University of Texas Institute for Geophysics – UTIG, 2014).

$$D = \arcsin \left( \sin(lat_1) \times \sin(lat_2) + \cos(lat_1) \times \cos(lat_2) \times \cos(long_2 - long_1) \right) \times R \quad (19)$$

Em que:

$D$  – distância entre os pontos 1 e 2.

$Lat_p$  – latitude do ponto  $p$  em graus.

$Long_p$  – longitude do ponto  $p$  em graus.

$R$  – raio médio da Terra em quilômetros (igual a 6.371 km).

- c) Demanda gerada nos ecopontos** – estimada com base na frota dos municípios com ecopontos, obtida no levantamento do site do DENATRAN (2013). Convertem-se para o percentual relativo à frota total do País, e multiplicou-se pela quantidade total destinada de pneus inservíveis, segundo o Relatório de Pneumáticos 2013 (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013). Caso exista mais de um ecoponto no município, a demanda estimada é dividida igualmente entre estes. Conforme a fórmula (13) é apresentada a seguir.

$$D_p = \frac{\left( \frac{\text{frota municipal no ecoponto } p}{\text{frota país}} \right) \times \text{quantidade destinada}}{\text{número de ecopontos no município}} \quad (20)$$

Em que:

$D_p$ : demanda em toneladas do ecoponto  $p$ .

- d) Custo de operação dos agentes** – estimada com base no custo de operação de um ecoponto. Não existem dados reais associados aos centros de armazenamento, pois não há tais agentes presentes na rede atual, na forma como é a proposta neste estudo. Os parâmetros associados a estes agentes são estimativas baseadas em dados de outros agentes da rede e nos possíveis benefícios da venda de pneus meia-vida ou para reforma. Para as empresas intermediárias e de empresas de destinação final o valor foi retirado do trabalho de Lagarinhos (2011) e Libera et al. (2012), exceto o valor da

pirólise que teve de ser arbitrado próximo ao custo das outras destinações. Os custos de manterem-se estoques foram arbitrados em 25% do valor do custo de processamento nas empresas intermediárias;

- e) **Custo de transporte** – estimado com base nos valores apresentados por Lagarinhos (2011) e Souza e D’Agosto (2013);
- f) **Custos de instalação** - o custo de instalação dos centros foi estimado com base nas despesas de um ecoponto descrito por Lagarinhos (2011), entretanto considerou-se também o preço do aluguel da estrutura e salário de funcionários capacitados para a triagem dos pneus. Os custos de instalação de uma empresa de trituração foram estimados anualmente como um valor de aluguel representando um custo menor para um período apenas, utilizou-se o trabalho de Libera et al. (2012). Neste caso, as instalações possivelmente presentes nas localidades das destinadoras tem custo proporcional à capacidade da destinadora, enquanto as candidatas nos municípios da Região de Governo possuem custo de instalação padrão referentes às capacidades de 3,6 e 7,2 mil toneladas por ano;
- g) **Capacidades dos agentes** – para os centros estimou-se a capacidade com base na operação de um ecoponto. Este tem seu material transportado a cada 2 mil pneus de automóveis ou 300 de caminhões (RECICLANIP, 2013), o que em termos de massa considerando 5 kg e 40 kg por pneu, respectivamente, resulta entre 10 até 12 toneladas por pedido de recolhimento. Consideraram-se três níveis, baixo (900 t), médio (1800 t) e alto (3600 t), o que representaria anualmente 90, 180 e 360 caminhões de pneus que poderiam ser processados.  
Já para as empresas intermediárias a capacidade dos candidatos foi estimada com base no trabalho de Libera et al. (2012) – a capacidade de estoque foi arbitrada em 10% da capacidade total de processamento; e as capacidades das empresas de destinação – e empresas intermediárias nestes locais - no percentual destinado por cada uma das empresas em 2013 (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2013). Os tipos de destinação existentes em cada empresa foram retirados dos sites das empresas;
- h) **Renda gerada** – para o retorno do pneu servível nos centros de armazenamento e empresas intermediárias o valor foi estimado com base no preço de venda de pneus

usados em condição de servíveis que poderiam voltar para o uso. Realizando-se uma consulta em sites de empresas que comercializam o produto, o preço é variável entre 35 até 60 reais por pneu de passeio, podendo chegar até mais de 100 reais no caso da remanufatura. Contudo, fixaram-se em 7,5 reais por pneu ou 1500 reais por tonelada, uma vez que o pneu retornado deve ser limpo ou remanufaturado antes da venda para o usuário final. Para os subprodutos ou substituição do combustível nas empresas destinadoras, os valores foram retirados de Lagarinhos (2011), site de cimenteiras e de empresas recicladoras.

A penalização foi calculada com base no Relatório do IBAMA 2014, que apresenta a quantidade de autos de infração legal dados durante a fiscalização efetuada em 2013, totalizando R\$ 731.700 em 66 autos de infração, ou na média 11 mil reais por auto. Portanto, utilizou-se um valor unitário de penalização de 11 mil reais por tonelada não tratada, deste modo, caso a meta não seja cumprida em 10 mil toneladas, por exemplo, incide-se uma penalização total de 110 mil reais.

## 5.2. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM UM ÚNICO PERÍODO

Para todos os experimentos utilizou-se um computador equipado com Intel® Core™ i7-2600 de 3,4 Ghz, memória de 16 GB, sistema operacional Windows 7 Professional 64 bits. O ambiente utilizado para implementação do modelo foi o GAMS 24.1.3 e o solver CPLEX 12.5.1.

Os experimentos foram conduzidos com critérios de parada: *gap* relativo igual à zero ou tempo limite de 20 horas (experimentos para busca do ótimo) ou 2 horas para cada valor nos testes de variação de parâmetros. Por oferecer suporte ao pré-processamento *multithread*, fixou-se o uso de oito núcleos do processador para a tarefa de otimização.

O resultado em um único período foi obtido utilizando-se somente  $t = 1$ , isto é, considerou-se apenas o planejamento de um período. Na configuração da rede reversa de pneus inservíveis, proposta pelo modelo mono período, houve o tratamento de toda a meta, a abertura de 31 centros de armazenamento (c) e lucro, isto é, a função objetivo foi negativa em aproximadamente 19,8 milhões de reais.

A Tabela 2 apresenta os custos, renda e instalações realizadas, além de informações computacionais sobre a solução ótima.

Tabela 2 - Resultados globais de custos, renda e instalações realizadas na configuração de rede do modelo único período.

<b>Único período</b>	<b>Valor</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-19.854.937
<b>Custo de transporte (R\$)</b>	14.369.880
<b>Custo variável (R\$)</b>	17.697.430
<b>Custo fixo (R\$)</b>	4.200.000
<b>Renda total (R\$)</b>	56.122.300
<b>Reutilização</b>	9.417.000
<b>Aço</b>	0
<b>Coprocessamento</b>	27.300
<b>Granulação</b>	42.978.800
<b>Laminação</b>	3.658.950
<b>Pirólise</b>	40.000
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0
<b>Instalação de centro (c)</b>	29 (l <sub>1</sub> )
	1 (l <sub>2</sub> )
	1 (l <sub>3</sub> )
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	0 (l <sub>1</sub> )
	0 (l <sub>2</sub> )
<b>Tempo de solução (s)</b>	1.687
<b>Gap relativo (%)</b>	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

O maior impacto nos custos foi do custo variável – que engloba manuseio, pré-processamento e processamento dos pneus –, com 48,8% do total, seguido pelo de transporte, com 39,62%. Apesar de em casos na literatura, como Souza e D’Agosto (2013), apontarem para os custos de transporte como responsáveis por até dois terços do total dos custos da logística reversa, a proximidade entre as destinadoras e as regiões com alta demanda (Região Metropolitana de São Paulo) contribuíram para o menor custo de transporte.

O custo de transporte também foi impactado pela proposta dos centros (C), que ao consolidarem a carga dos ecopontos permitem maior eficiência devida à triagem dos pneus e a

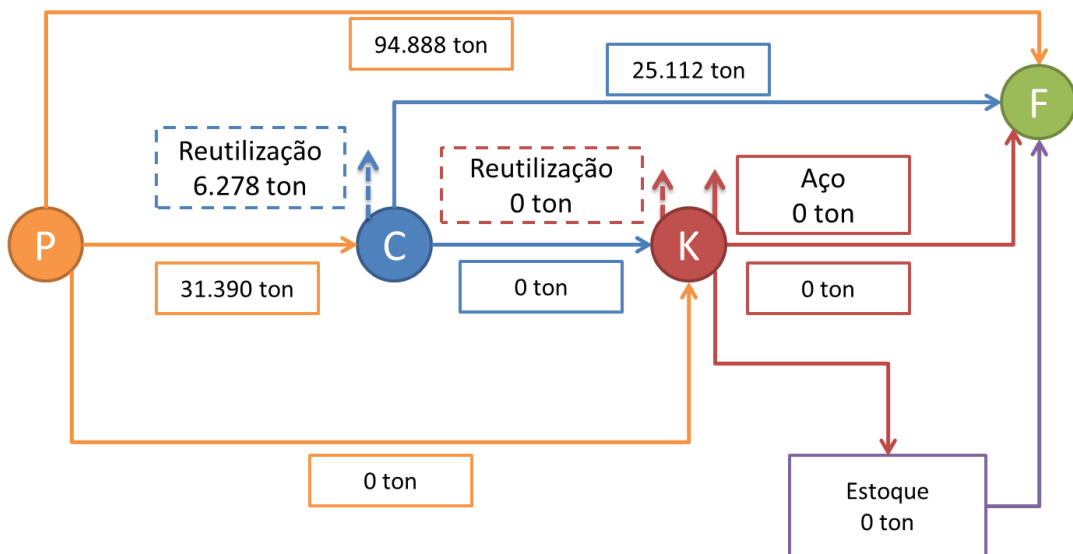
forma como os pneus são acomodados nas caçambas, estimando-se assim uma redução em 10% neste custo, que passa de R\$ 3,5 por t.km de pneus para 3,15. Além do retorno dos pneus servíveis, evitando o transporte destes ao longo da rede reversa.

Note que o custo fixo foi significativamente menor que os demais custos, representando apenas 11,5% do custo total da rede. A instalação de centros (C), ao contrário de empresas intermediárias (K), apresenta um valor menor mesmo para o caso da capacidade de abertura (I3), portanto, em um único período, a instalação de intermediárias não ocorreu devido aos altos custos. Como consequência da não instalação de empresas intermediárias, os estoques foram nulos, pois para ser estocado o material deve ser triturado.

Ainda, somente a renda obtida com o retorno dos pneus, 9,41 milhões de reais, foi suficiente para cobrir os custos de instalação e variáveis dos centros (c). A triagem resultou no retorno de 6,2 mil toneladas de pneus servíveis, representando 80% da quantidade de pneus disponíveis excedente à meta.

Os fluxos totais entre os níveis da rede estão na Figura 7.

Figura 7 - Fluxos brutos entre os níveis da rede proposta com único período.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro nível da rede proposta são os ecopontos, que enviaram a maioria da coleta diretamente para as destinações e cerca de 1/3 para os centros de armazenamento. Os centros (C) tiveram sua capacidade utilizada quase na totalidade – 99,6% de uso –, exceto no centro (c<sub>33</sub>) que apresentou ociosidade de 110 toneladas, ou 12% da sua capacidade (I<sub>1</sub>).

Os fluxos entre os ecopontos (P) e centros (C) tem relação direta com a demanda disponível para coleta e a distância até a destinação final, pois apesar da pouca quantidade em toneladas, os centros contribuíram para a consolidação da carga de 247 ecopontos, com média

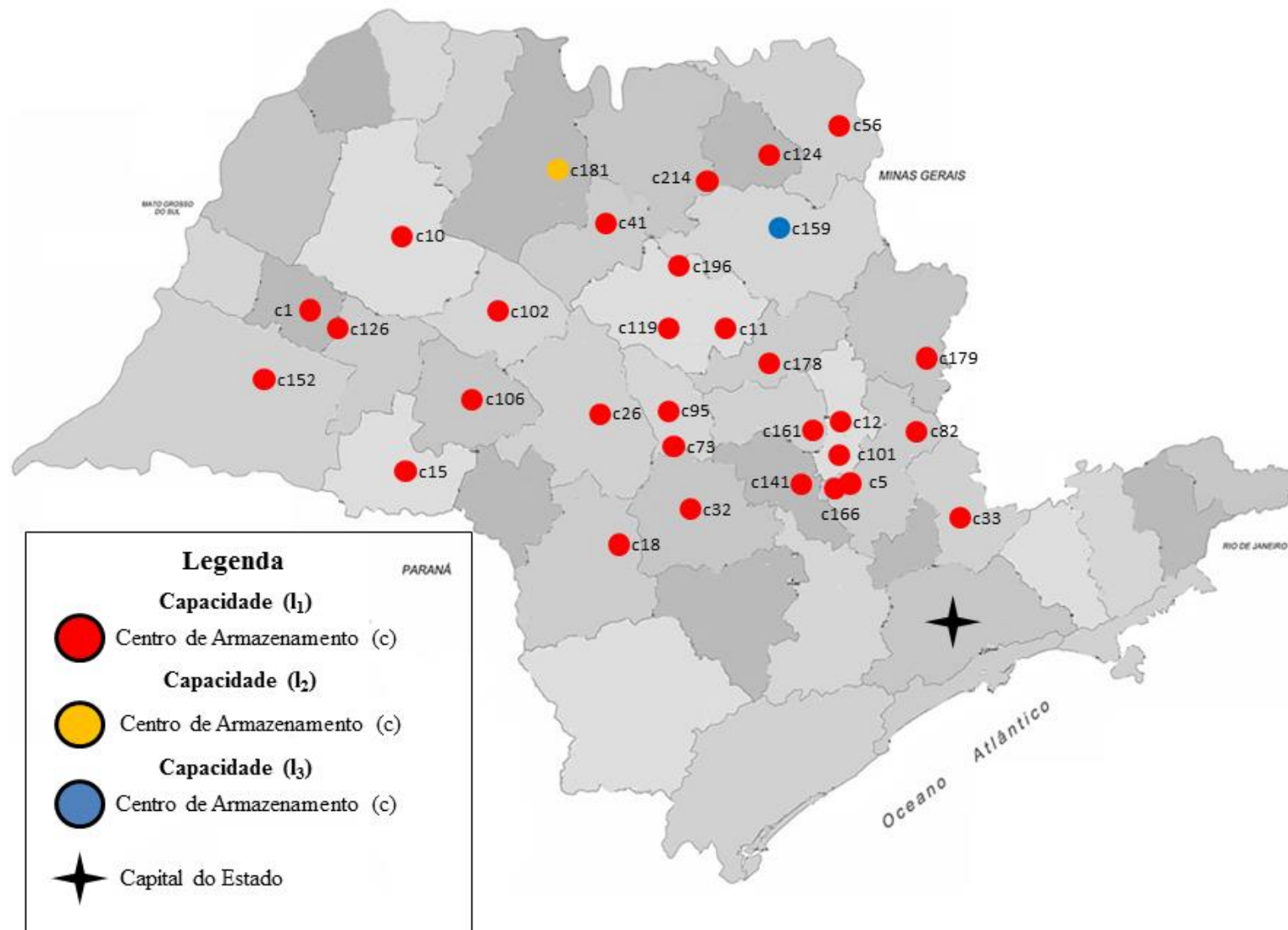


de 7 ecopontos por centro instalado. Portanto, a função de consolidação de carga está ocorrendo como esperado pela proposta de configuração da rede com as facilidades de centros (C).

Além do retorno, que não contribui para o cumprimento da meta, houve um remanescente de pneus em 13 ecopontos (p), totalizando 1.579 toneladas, isto é, não houve coleta nestes ecopontos pelos custos envolvidos. Em conjunto com as 6.278 toneladas retornadas, representa a diferença entre a demanda estimada e a meta, isto é, a triagem ocorreu somente por haver mais pneus usados para a coleta do que a quantidade necessária para o cumprimento da meta.

A rede proposta para o Estado de São Paulo é esquematizado na Figura 8.

Figura 8 - Instalações realizadas na configuração do modelo monoperíodo.



Fonte: Elaborado pelo autor com base no mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Na distribuição apresentada, nota-se que os centros (C) foram distribuídos em regiões com demanda baixa e média, e longe da capital do Estado de São Paulo. Este comportamento pode ter relação com a necessidade do cumprimento da meta, neste caso os ecopontos (P) com alta geração de pneus usados e próximos às empresas de destinação (F) enviam seu material diretamente para as destinações, uma vez que o retorno dos pneus servíveis destes ecopontos acarretaria na necessidade de transporte do material de ecopontos (P) mais distantes, aumentando o custo de transporte e conseqüentemente o custo total da rede.

Em um ano, as destinações mais utilizadas, para o cumprimento da meta de 120.000 toneladas, foram a granulação com 89,5% de participação bruta, em seguida foi utilizada a laminação com 10,1%, a pirólise e o coprocessamento, contribuíram com menos de 1%. Baseada na capacidade estimada total de 169.381 toneladas, com 21,59% coprocessamento, 69,52% para granulação, 8,67% para a laminação e 0,19% para pirólise, a utilização das destinações no caso do coprocessamento não foi próxima do esperado.

Este resultado explica-se pelas maiores rendas das destinações granulação e laminação, e da proximidade destas com as regiões com maior quantidade de pneus disponíveis. Por exemplo, os impactos financeiros no coprocessamento estão sob a forma da substituição do combustível nos fornos de cimento de um sistema produtivo direcionado para outro mercado, o de produtos de cimento, não resultando em subprodutos como pó da borracha, solados ou percintas, que possuem um maior valor por tonelada.

Como discutido, as empresas intermediárias (K) não foram instaladas, devido ao seu alto investimento inicial, apesar dos benefícios da triagem, separação do aço, possibilidade de estoque, e redução nos custos de transporte e destinação, no caso do coprocessamento, granulação e pirólise. O modelo multiperíodo permitirá analisar o comportamento da configuração para o caso do planejamento em longo prazo, assunto da próxima subseção.

### 5.3. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM MÚLTIPLOS PERÍODOS

Para o planejamento multiperíodo foi considerado um horizonte de planejamento de 8 anos, com períodos anuais. Este horizonte foi escolhido por representar dois períodos de governo, o que pode influenciar nos parâmetros como a meta, custos, renda e até questões comerciais de importação de pneumáticos. Considerou-se ainda que a meta e a demanda sofrem acréscimo de 5% sobre o valor original a cada período, assim quando  $t = 2$ , por exemplo, a taxa sobre o valor original é de 10%. Para demais custos e rendas considerou-se a

taxa básica de juros dada pelo Banco Central do Brasil acumulada em 2014, arredondada para 7% ao ano, também com cálculo de acréscimo proporcional ao período de tempo.

Para a análise da configuração proposta utilizam-se os custos e renda gerais, em seguida são discutidas as mudanças nos fluxos ao longo do tempo, exemplificando-se com os resultados médios anuais do horizonte de planejamento. Os dados gerais estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados médios anuais de custos, renda e instalações realizadas na configuração de rede do modelo multiperíodo.

<b>Modelo Multiperíodo</b>	<b>Valor</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-34.321.780
<b>Custo de transporte (R\$)</b>	22.804.425
<b>Custo variável (R\$)</b>	24.651.337
<b>Custo fixo (R\$)</b>	3.833.541
<b>Renda total (R\$)</b>	85.611.125
<b>Reutilização</b>	17.889.625
<b>Aço</b>	3.421.637,5
<b>Coprocessamento</b>	1.831.550
<b>Granulação</b>	57.457.750
<b>Laminação</b>	4.953.825
<b>Pirólise</b>	56.700
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0
<b>Instalação de centro (c)</b>	16 (I <sub>1</sub> )
	0 (I <sub>2</sub> )
	0 (I <sub>3</sub> )
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	17 (I <sub>1</sub> )
	5 (I <sub>2</sub> )
	0 (I <sub>3</sub> )
<b>Tempo (s)</b>	30.989
<b>Gap relativo (%)</b>	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

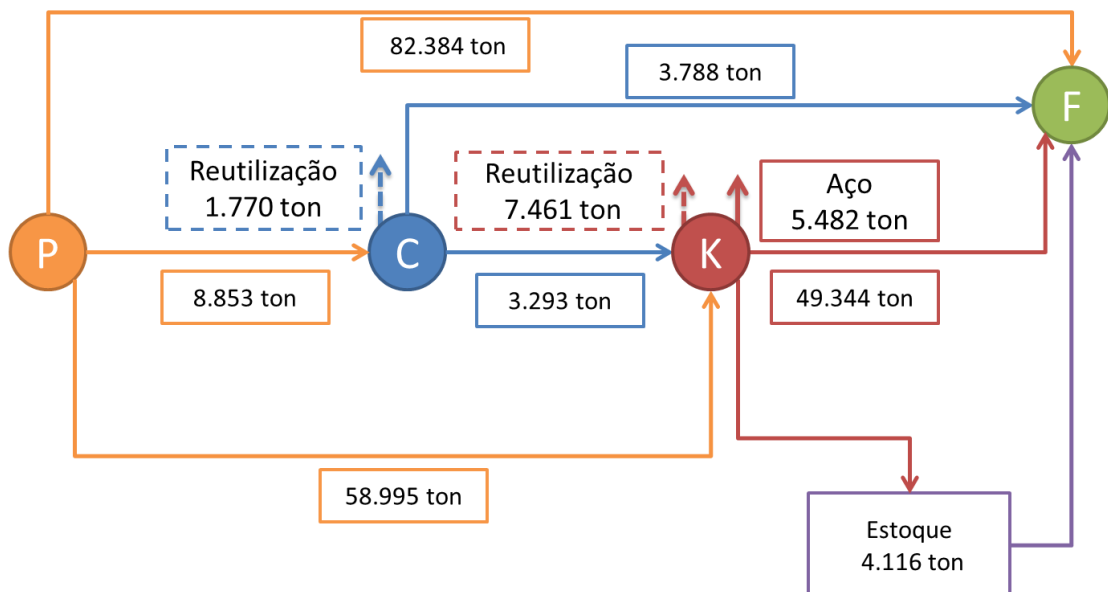
Novamente o maior custo foi o variável, seguido do custo de transporte, ambos contribuíram juntos em 93% do custo total, assim como no modelo com único período. Os custos fixos, com a instalação de centros (c) e empresas intermediárias (k) resultaram na contribuição de apenas 7% do total, mesmo passando de 4,2 milhões para 30 milhões totais. Nota-se que na média anual, o custo fixo passou para 3,83 milhões de reais, explicando a menor participação da instalação nos custos globais da rede.

Este crescimento no custo fixo ocorreu devido à instalação de 22 empresas intermediárias (k), que passaram a operar na configuração da rede reversa. Já no caso dos centros (c), houve redução em 50% na quantidade total em relação à configuração de um ano.

Uma das características da configuração proposta pelo modelo multiperíodo é de que a instalação das facilidades pode ocorrer em qualquer período  $t$ , portanto o custo de instalação será dado no período de abertura e os fluxos para a instalação somente ocorrem caso esta esteja em operação. Na configuração apresentada, todas as facilidades são instaladas no período  $t = 1$ , o que é explicado pelo aumento no custo de cada instalação ao longo do tempo, 7% por período sobre o custo inicial.

O custo de transporte foi impactado não somente pela consolidação dos centros (c), mas também pela instalação de intermediárias (k), que ao triturarem os pneus provocam uma redução em 20% do custo de transporte em relação a tonelada de pneus inteiros. Os fluxos médios de material entre os níveis da configuração proposta são apresentados no esquema da Figura 9.

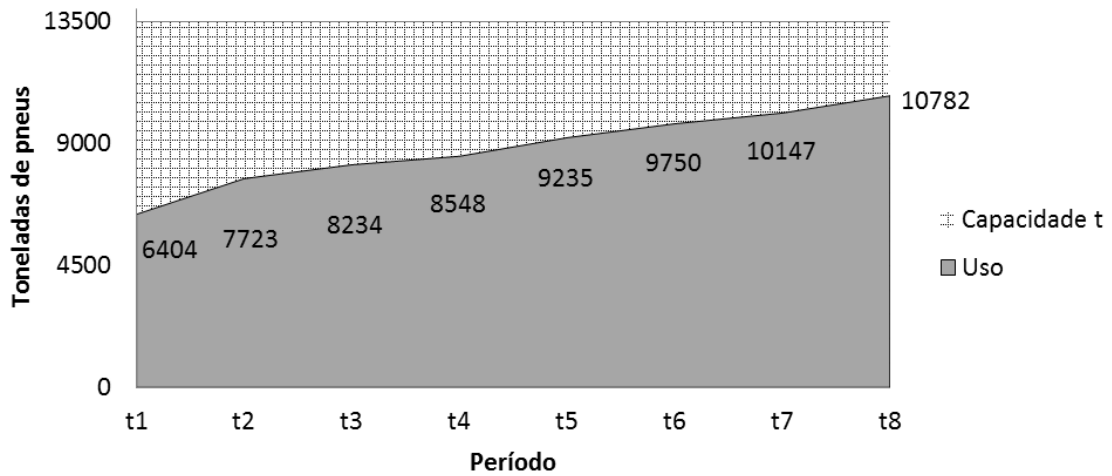
Figura 9 - Fluxos anuais médios entre os níveis da rede proposta com múltiplos períodos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do total de 16 centros (C) abertos, 15 apresentaram ociosidade, com média de 41%. A ociosidade nos centros ocorreu, sobretudo, no início do horizonte de planejamento, quando a capacidade instalada é de 14.400 t e o uso é de apenas 6.404 t, conforme a Tabela 5. Já no fim do horizonte ( $t=8$ ), percebe-se a partir do Gráfico 3, que o uso dos centros (c) passa para 10.781 t e, conseqüentemente, a ociosidade nos centros (C) reduz ao longo do tempo.

Gráfico 3 - Uso da capacidade instalada total dos centros (C) ao longo do horizonte de 8 anos.

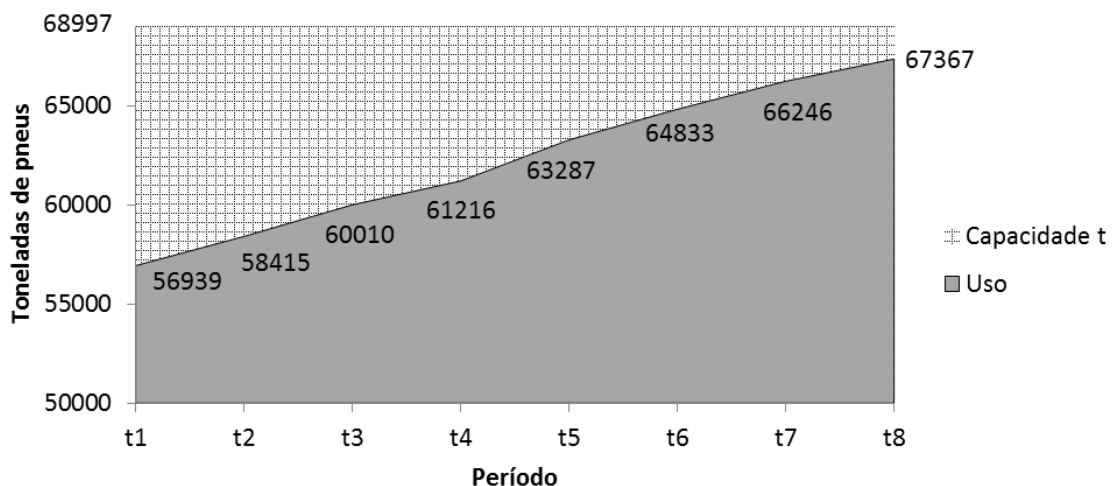


Fonte: Elaborado pelo autor.

A centralização de ecopontos (P) em instalações de centros de armazenamento também permite verificar que a ociosidade foi de 100% em duas instalações no período  $t=1$ , os centros ( $c_{82}$ ) e ( $c_{112}$ ), que só recebem material dos ecopontos (P) a partir do período  $t=2$ . No período inicial, cada centro de armazenamento (C) atende em média 3 ecopontos, já no período final, a média passa para 4 e todos os 16 centros (C) recebem material dos ecopontos.

Nas empresas intermediárias (k), nota-se que o uso é intenso desde o primeiro período ( $t=1$ ), no qual a capacidade instalada total é de 68.997 t. e a utilização é de 54.477 t., passando para 63.146 t. no período final ( $t=8$ ). Este uso refletiu na ociosidade presente em apenas 12 das 22 facilidades abertas, com média de 9% naquelas com ociosidade. Esta mudança ao longo do tempo é vista no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Uso da capacidade instalada total das empresas intermediárias (K) ao longo do horizonte de 8 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

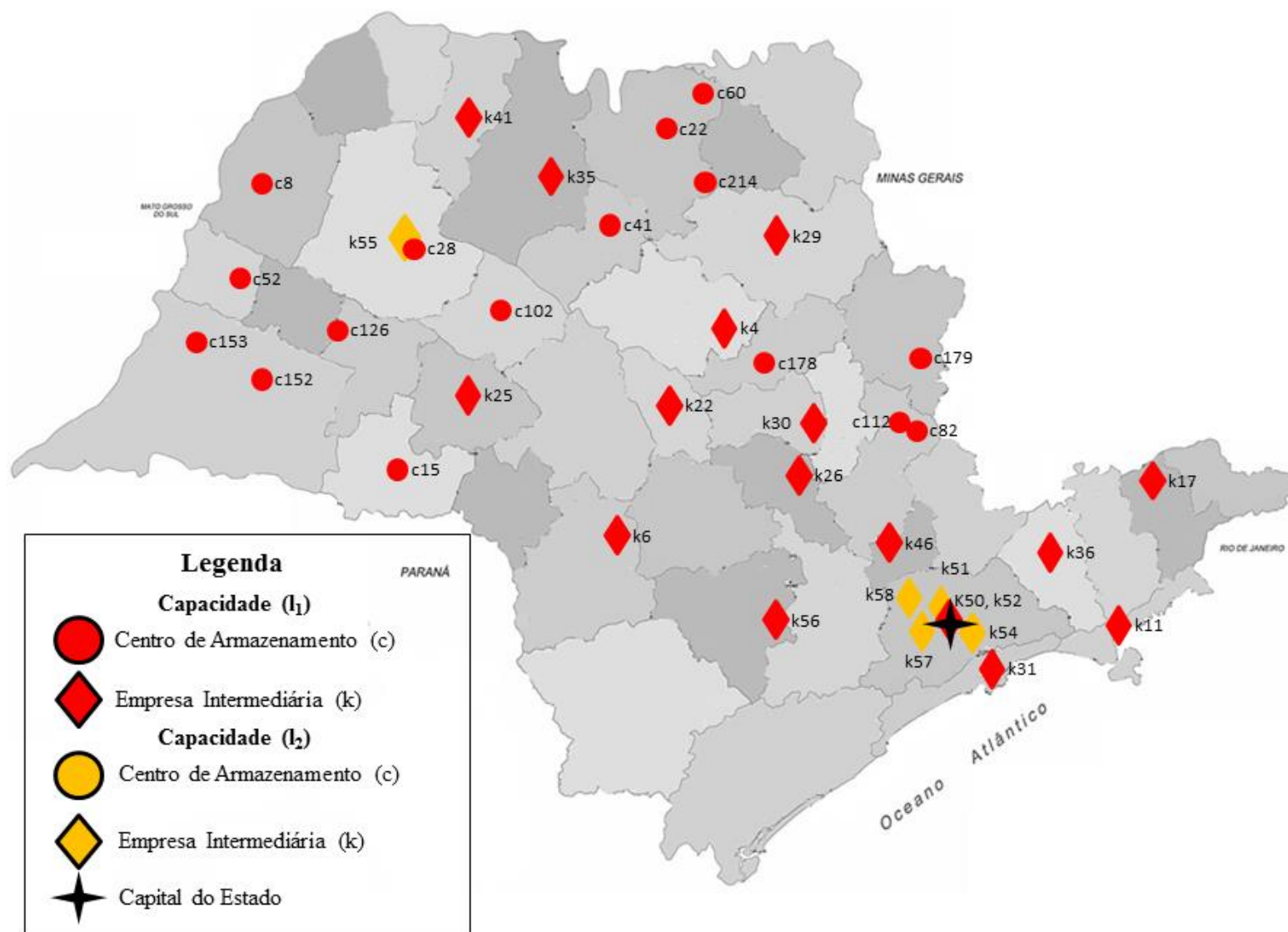
Comparando-se os tipos de instalação, verifica-se que os centros permitem maior ociosidade devido seu baixo custo de instalação, desta maneira, quando instalados em locais com menor demanda, ainda apresentam renda suficiente para compensar o investimento nos 8 anos. Em contrapartida as empresas intermediárias necessitam de uma alta demanda devida seu custo de instalação, refletindo assim a menor ociosidade média neste tipo de instalação.

Quanto à centralização, no período  $t=1$  a média de ecopontos (p) atendidos é de 11 e, ao contrário dos centros (c), este número cai no fim do período. São duas as razões principais:

- a) a primeira é que no período  $t = 7$  há estoque nas empresas intermediárias (K), com isso no período  $t = 8$  parte da destinação é dada diretamente no fluxo (K) para (F), portanto o fluxo de entrada das empresas intermediárias (K) cai no último período;
- b) a segunda é que o retorno aumenta devida a maior renda do retorno no período último período ( $t = 8$ ) em relação ao período anterior ( $t=7$ ). Assim, o retorno é feito em maior quantidade pelos centros de armazenamento (C), pois há maior capacidade instalada, conforme Gráfico 3, e esta é próxima dos ecopontos (P) mais distantes das empresas de destinação final (F), o que também contribui para a redução do custo de transporte.

A Figura 10 apresenta a distribuição geográfica proposta de centros (C) e intermediárias (K) no Estado de São Paulo.

Figura 10 - Instalações realizadas na configuração do modelo multiperíodo.



Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).



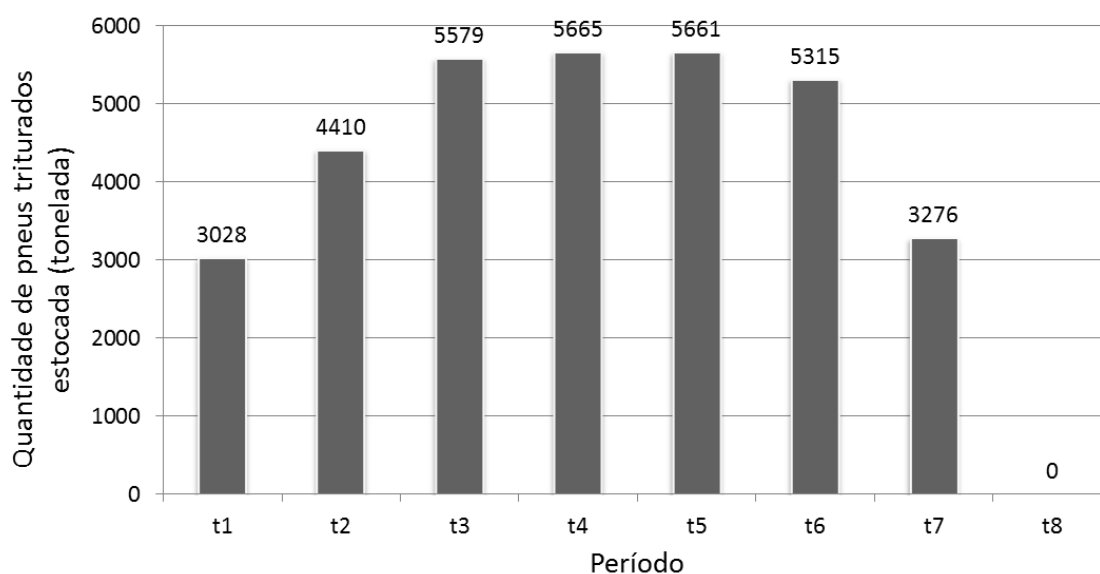
Percebe-se, a partir da Figura 10, que os centros (C) atuam mais em locais distantes das empresas de destinação e próximos de ecopontos (P) com demandas menores, geralmente permitindo maior ociosidade pelo seu baixo custo de instalação e operação em relação às empresas intermediárias (K).

Nas empresas intermediárias (K), a instalação ocorre em locais com maiores demandas, e mais próximas das destinadoras (F), inclusive com 9 destas instaladas nas mesmas coordenadas que as destinadoras (F). Embora essa proximidade reduza os possíveis benefícios relacionados ao transporte do pneu triturado, a maior capacidade instalada em relação aos centros permite o retorno dos pneus servíveis em maior quantidade se comparado ao dos centros (C), conforme observado no retorno médio feito pelas intermediárias (K) na Figura 9.

A separação do aço também é uma das razões pela instalação em áreas de maior demanda, pois esta separação necessita de uma alta quantidade processada uma vez que o aço no pneu representa 10% sua massa total e, portanto, trata-se da taxa máxima que pode ser separada.

Outra característica observada na configuração multiperíodo foi a presença de estoques. No período  $t=1$ , houve estoque de 3 mil toneladas aproximadamente, enquanto no último período, devido à necessidade de tratamento e não contabilizando o estoque no período  $t=8$  para o cumprimento da meta, a quantidade estocada foi zero. O Gráfico 5 apresenta a evolução do estoque no horizonte de 8 anos.

Gráfico 5 - Estoques de borracha triturada nas empresas intermediárias (k) no horizonte de 8 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade estocada no período  $t = 7$  contribuiu para o cumprimento da meta no período subsequente, pois a quantidade retornada no último período foi maior que a quantidade excedente da demanda sobre a meta. O estoque contribui para a redução dos custos de transporte e pré-processamento, uma vez que a quantidade estocada em um período anterior tem os custos menores em relação ao período atual, além de permitir a oportunidade de venda dos pneus servíveis à renda com preço maior no período  $t=8$ .

Com relação às destinações, que totalizaram 162 mil toneladas, a mais utilizada foi a granulação com 81,4% do total. Em seguida foi utilizada a laminação com 9,2% e o coprocessamento com 5,2%; a destinação contabilizada com o aço completa 3,8%, enquanto a pirólise foi utilizada por 0,14% do total, contabilizando apenas 1.680 toneladas. Nota-se um aumento sensível na destinação coprocessamento, em relação ao planejamento de um único período, devido ao custo nulo quando a destinação é de pneus triturados – o que ocorreu na configuração proposta com a instalação das empresas intermediárias (K).

As principais diferenças entre a configuração do modelo considerando um único e múltiplos períodos foi a instalação das empresas intermediárias (K), o que possibilitou o estoque e a separação do aço. Nota-se ainda que a instalação dos centros de armazenamento (C), quando há quantidade de pneus usados acima da meta, é interessante do ponto de vista econômico no curto prazo e deste modo são instalações que podem contribuir para a padronização da triagem dos pneus em servíveis e inservíveis em um primeiro momento, e caso haja interesse, no longo prazo modificar tal centro (C) para que se torne uma empresa intermediária (K), por exemplo.

Uma análise da sensibilidade sobre o impacto da variação de demanda próxima a meta é necessária para compreender melhor o comportamento das instalações realizadas e a modificação dos fluxos em cada cenário. Além da demanda, a renda que advém da triagem dos pneus servíveis e dos subprodutos da borracha é importante, pois os preços destes produtos influenciam na escolha pelas destinações. Deste modo, foi realizada uma análise de sensibilidade com cenários de demanda e renda diferentes, e posteriormente uma análise de dominância de custos fixos *versus* variáveis e de transporte.

#### 5.4. TESTES COM VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

Nesta seção são apresentados testes com variação de parâmetros, conforme o plano de experimentos da Tabela 4.

Tabela 4 - Planejamento dos testes e cenários propostos.

<b>Teste</b>	<b>Características</b>
<b>Variação na demanda</b>	Igual a meta
	Aumento de 5%
	Aumento de 10%
	Aumento 15%
<b>Variação na renda total</b>	Diminuição de 20%
	Diminuição de 10%
	Aumento de 10%
	Aumento 20%
<b>Variação nos custos das instalações e de transporte</b>	Aumento de 15%
	Aumento de 30%
<b>Restrição de orçamento</b>	Restrição de 1,2 milhões de reais anuais para a instalação de centros (C)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A demanda é considerada a quantidade disponível de pneus usados nos ecopontos, desta forma, estes testes tem por objetivo obter a configuração da rede reversa proposta sob condições de uma meta próxima à demanda e com diferença, para identificar quais são as mudanças mais significativas e comportamento dos fluxos nestes casos.

O teste com a variação na renda total tem por objetivo observar as configurações propostas em cenários de economia desfavorável ou favorável para as atividades de destinação, pois a renda obtida pela venda de materiais, especialmente oriundos de fontes secundárias, como os subprodutos da borracha, está sujeita aos preços praticados no mercado de matérias virgens e outros fatores como a oferta e procura por este tipo de material.

O teste com a variação nos custos fixos e custos de processamento, ou seja, custos relativos às instalações da rede - comparando-se com a variação nos custos de transporte tem por objetivo a análise do comportamento das instalações realizadas, pois se espera que um custo fixo maior reduza as instalações e aumente custos de transporte, e na variação dos custos de transporte espera-se o efeito inverso.

Por fim uma análise adicional é realizada no modelo de múltiplos períodos, trata-se da adição de uma restrição adicional de orçamento para a instalação dos centros (C), com o objetivo de observar se esta restrição adicional reduziria a ociosidade nestes tipos de

instalação e conseqüentemente fizesse a instalação em outros períodos e não somente no período  $t = 1$ .

Os resultados e discussões dos testes apresentam-se nas próximas subseções. Utilizaram-se as configurações computacionais dos experimentos anteriores, contudo alterou-se o tempo computacional para  $7,2 \cdot 10^3$  segundos (2 horas) em cada cenário. Este tempo foi escolhido por uma razão: o experimento multiperíodo demonstrou que o gap relativo é reduzido para próximo de 1% já nas primeiras horas de teste, portanto, testes com tempos maiores apenas para casos de busca da otimalidade.

#### 5.4.1. Teste com variação na demanda nos ecopontos

A Tabela 5 apresenta os resultados ao longo do horizonte de 8 anos, com custos, rendas, instalações dos quatro cenários estudados, para os quatro cenário de demanda.

Tabela 5 - Resultados globais anuais de custos, rendas e instalações para os cenários de variação de demanda.

<b>Variação na demanda</b>	<b>Igual a meta</b>	<b>+5%</b>	<b>+10%</b>	<b>+15%</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-14.920.023	-30.394.312	-42.473.287	-53.750.003
<b>Custo de transporte (R\$)</b>	25.861.812	22.806.275	23.118.650	23.810.850
<b>Custo variável (R\$)</b>	23.927.250	24.456.875	24.905.025	25.152.512
<b>Custo fixo (R\$)</b>	2.679.427	3.581.978	4.743.437	6.739.322
<b>Renda total (R\$)</b>	67.388.500	81.239.500	95.240.375	109.452.625
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0	0	0	0
<b>Instalação de centro (c)</b>	0 (l <sub>1</sub> )	12 (l <sub>1</sub> )	19 (l <sub>1</sub> )	23 (l <sub>1</sub> )
	0 (l <sub>2</sub> )	0 (l <sub>2</sub> )	0 (l <sub>2</sub> )	0 (l <sub>2</sub> )
	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	14 (l <sub>1</sub> )	18 (l <sub>1</sub> )	16 (l <sub>1</sub> )	16 (l <sub>1</sub> )
	3 (l <sub>2</sub> )	3 (l <sub>2</sub> )	8 (l <sub>2</sub> )	4 (l <sub>2</sub> )
<b>Retorno (ton)</b>	220	7.049	14.099	21.149
<b>Aço (ton)</b>	4.601	5.010	6.404	9.119
<b>Estoque (ton)</b>	0.71	3.256	6.403	8.479

\*Por questões de arredondamento a demanda total ficou levemente superior à meta (<0,1%).

\*\*Tempo computacional atingido.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A função objetivo apresenta o lucro crescente entre as configurações de rede propostas do cenário de menor demanda para o de maior, pois há o aumento na renda com o retorno dos pneus servíveis e queda no custo de transporte. A meta foi cumprida em todos os cenários, com a diferença entre a meta e demanda sendo retornados como pneus servíveis.

Os custos de transporte reduzem com o aumento na demanda, isso pode ser explicado por duas razões, que são: o aumento da disponibilidade de pneus usados nos ecopontos (P) próximos das empresas intermediárias, o que contribui para a redução direta no custo do transporte dos pneus inteiros de locais mais distantes; e uma maior consolidação de carga provida pela abertura de mais centros (C). Deste modo, os resultados mostram queda no fluxo entre ecopontos (P) e empresas de destinação (F), passando tal fluxo a aumentar entre ecopontos (P) e centros (C)/intermediárias (K). Este aumento no fluxo impacta os custos variáveis e também no custo fixo, pois mais facilidades são instaladas ao longo do aumento na demanda dos cenários.

Nota-se que quando a demanda é próxima da meta – segunda coluna – a instalação de centros (c) é inexistente, pois o retorno para utilização não é possível sem que a meta deixe de ser cumprida. Este comportamento muda ao longo dos cenários com acréscimo de 5%, 10% e 15%, chegando em 23 instalações de centros (C) e 169.197 toneladas de pneus servíveis separados.

Quanto às empresas intermediárias (k), nota-se que no último cenário houve queda no número absoluto de instalações, contudo, as instalações que deixaram de ser instaladas estavam localizadas nas mesmas coordenadas das destinadoras, sendo as com capacidades menores. No lugar dessas instalações, foram preferidas as novas candidatas nos municípios das Regiões de Governo com maior capacidade de instalação, isto é, apesar da quantidade absoluta de facilidades ser reduzida, a capacidade total instalada aumentou, como se percebe no aumento da separação do aço nestas instalações presente na Tabela 5.

Entre todos os cenários, nove localidades foram escolhidas em comum, isto é, centros (C) que foram instalados em todos os cenários e, portanto, indicam locais de instalação interessantes em caso de demanda incerta. Na instalação das empresas intermediárias (K) também houve nove locais em comum; estes locais estão presentes na Figura 15, no Apêndice C.

Como se verificou ao longo dos cenários, um aumento de 5% sobre a meta já é suficiente para a instalação de centros (C), mais empresas intermediárias (K) e mudanças significativas nos fluxos entre os níveis da rede logística. Um dos fluxos mais crescente foi o de retorno dos pneus, seguido pela venda do aço separado dos pneus, ambos ligados à renda.

Este resultado é importante do ponto de vista ambiental, pois uma meta superestimada pode levar a destinação antecipada de pneus servíveis como se fossem inservíveis. Do mesmo modo que a baixa disponibilidade de pneus usados para a coleta pode tornar o processo de triagem inviável, mesmo havendo pneus servíveis na quantidade coletada.

Ainda, do ponto de vista econômico, não necessariamente uma alta diferença entre meta e demanda pode ser passível da triagem, pois outras considerações como a saturação do mercado secundário ou os preços dos pneus novos podem afetar o quanto de pneus servíveis realmente poderá ser retornado, inclusive, afetando sua renda conforme sua disponibilidade.

#### 5.4.2. Teste com a variação nas rendas

A renda é um parâmetro dependente de mercados primários, cenário econômico e até mesmo da disponibilidade e acessibilidade de pneus para a coleta, pois uma alta disponibilidade de pneus pode gerar uma grande oferta de subprodutos como o grânulo ou o pó da borracha, reduzindo assim o preço de venda.

A renda obtida pela venda de materiais das empresas intermediárias e destinadoras está sujeita aos preços praticados no mercado de matérias virgens e outros fatores como a oferta e procura por este tipo de material.

A variação na renda produziu os resultados gerais médios apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações para os cenários de variação de renda.

<b>Variação na renda total</b>	<b>-20%</b>	<b>-10%</b>	<b>+10%</b>	<b>+20%</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-17.257.402	-25.757.949	-42.875.092	-51.522.326
<b>Custo de transporte (R\$)</b>	22.987.863	22.901.738	22.799.900	22.714.413
<b>Custo variável (R\$)</b>	24.712.263	24.768.275	24.735.263	24.587.013
<b>Custo fixo (R\$)</b>	2.999.499	3.174.271	4.183.385	4.685.885
<b>Renda total (R\$)</b>	67.956.875	76.602.250	94.593.625	103.509.625
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0	0	0	0
<b>Instalação de centro (c)</b>	19 (I <sub>1</sub> )	22 (I <sub>1</sub> )	18 (I <sub>1</sub> )	14 (I <sub>1</sub> )
	0 (I <sub>2</sub> )	0 (I <sub>2</sub> )	0 (I <sub>2</sub> )	0 (I <sub>2</sub> )
	0 (I <sub>3</sub> )	0 (I <sub>3</sub> )	0 (I <sub>3</sub> )	0 (I <sub>3</sub> )
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	14 (I <sub>1</sub> )	14 (I <sub>1</sub> )	14 (I <sub>1</sub> )	17 (I <sub>1</sub> )
	4 (I <sub>2</sub> )	5 (I <sub>2</sub> )	8 (I <sub>2</sub> )	8 (I <sub>2</sub> )
<b>Retorno (ton)</b>	10.400	9.232	9.231	9.232
<b>Aço (ton)</b>	4.025	4.341	6.439	6.910
<b>Estoque (ton)</b>	1.751	2.615	4.894	5.370

\*Tempo computacional atingido.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento na renda total ocasiona a diminuição na quantidade de centros (C) instalados, e as empresas intermediárias (K) tornam-se mais atrativas do ponto de vista financeiro, como se pode notar no crescimento da quantidade de aço separado e na diminuição

na quantidade de retorno dos pneus servíveis por parte dos centros (C). Percebe-se que a variação na renda apresenta diferença significativa quanto à variação na demanda, especificamente na instalação das facilidades. Ao longo do aumento na demanda com uma renda fixada observou-se a instalação significativa de centros (C) em números absolutos e de empresas intermediárias (K) em maior capacidade.

A maior atratividade das empresas intermediárias conforme se aumenta a renda refletiu em custos de transporte e variáveis menores, pois tais empresas contribuem para o ganho de eficiência no transporte e também a redução nos custos de destinação nos tipos coprocessamento, granulação e pirólise.

As instalações em comum entre os cenários foram nove centros (C) todos abertos na capacidade ( $I_1$ ), enquanto as empresas intermediárias (K) apresentaram quinze instalações em comum, com uma mudança de capacidade de ( $I_1$ ) para ( $I_2$ ) no aumento do cenário de -10 para o de +10% de renda. Portanto, quando há um excedente na meta e uma renda incerta ao longo da rede, as empresas intermediárias (K) tendem a serem instalações mais adequadas se comparadas aos centros (C). Na Figura 16, do apêndice C, apresentam-se as instalações em comum.

Quando a renda é reduzida, os centros (C) são instalados em maior quantidade, mas nota-se a quantidade retornada permanece a mesma na maioria dos cenários (73.853 t), indicando que a triagem tem alto interesse econômico, independente de qual instalação realiza tal atividade. Outras mudanças estão queda de 36% do custo fixo e a redução da separação do aço em 42%, ambas ocasionadas pelas empresas intermediárias (K) que deixam de ser instaladas.

Portanto, a partir do comportamento da rede nos cenários e da localização em comum ao longo dos cenários algumas observações são reforçadas acerca da discussão do modelo multiperíodo. As empresas intermediárias (K) tem viabilidade financeira quando é utilizado um período de planejamento de longo prazo, como demonstrado no teste de variação de demanda e mais evidente no teste da variação na renda. Mesmo quando a demanda foi igual a meta, no qual, apesar de não haver demanda excedente para a triagem dos pneus, instalaram-se empresas intermediárias (K) próximas da capital do Estado de São Paulo.

Já os centros de armazenamento (C) auxiliam quando há maior disponibilidade de pneus usados para a coleta e quando a renda total é baixa, uma vez que o retorno não contabiliza para o cumprimento da meta legal e a maior parte dos benefícios econômicos dos centros (C) é justamente com essa atividade, contribuindo para a coleta em regiões de

demanda mais baixa e afastada das destinadoras, portanto sem viabilidade financeira para a instalação de empresas intermediárias (K) nestes locais.

Como os testes apontaram o retorno como uma atividade que impactou significativamente na modificação da rede quando se variou a renda total, realizou-se um cenário no qual a renda do retorno dos pneus servíveis era zero. Constatou-se que a configuração foi similar à da demanda igual à meta, ou seja, não foram abertos centros de armazenamento (C).

### 5.4.3. Teste com variação nos custos

A variação nos custos produziu os resultados médios anuais apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações para o teste de dominância dos tipos de custo.

Variação nos custos	Custo fixo e variável		Custo de transporte	
	15%	30%	15%	30%
<b>f.o</b>	-30.118.875	-26.000.087	-33.125.500	-32.135.500
<b>Custo transporte (R\$)</b>	23.231.262	23.315.050	26.882.155	27.776.826
<b>Custo variável (R\$)</b>	28.308.170	31.956.551	24.956.700	25.136.937
<b>Custo fixo (R\$)</b>	3.380.281	3.545.275	4.366.146	4.436.302
<b>Renda total (R\$)</b>	85.038.625	84.817.000	85.824.250	85.862.500
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0	0	0	0
<b>Retorno (t)</b>	9.231	9.231	9.231	9.231
<b>Aço (t)</b>	4.111	3.745	6.140	6.267
<b>Estoque (t)</b>	2650	1794	4345	4384
<b>Instalação de centro (c)</b>	15 (l <sub>1</sub> )	14 (l <sub>1</sub> )	32 (l <sub>1</sub> )	42 (l <sub>1</sub> )
	0 (l <sub>2</sub> )	0 (l <sub>2</sub> )	0 (l <sub>2</sub> )	1 (l <sub>2</sub> )
	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )	0 (l <sub>3</sub> )
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	14 (l <sub>1</sub> )	13 (l <sub>1</sub> )	15 (l <sub>1</sub> )	17 (l <sub>2</sub> )
	4 (l <sub>2</sub> )	4 (l <sub>2</sub> )	7 (l <sub>2</sub> )	6 (l <sub>2</sub> )

\*Tempo computacional atingido.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 7, nota-se que quando os custos relativos às instalações (variáveis e fixos) crescem, há menos instalações. Como exemplo, quando os custos são 30% maiores em relação aos custos utilizados originalmente, há a instalação de 17 empresas intermediárias (K). No experimento com múltiplos períodos, houve a abertura de 22 instalações de intermediárias (K).



Com relação aos custos, observa-se que mesmo um número reduzido de instalações os custos fixos e variáveis aumentam significativamente. Com menos instalações, a carga dos ecopontos deve seguir diretamente para as empresas de destinação final (F), o que provoca aumento no custo do transporte.

Observe, em todos os cenários, que apesar da redução na quantidade de instalações, a quantidade de pneus servíveis retornados permaneceu a mesma, ou seja, a capacidade instalada foi suficiente para realizar a triagem dos pneus, mesmo com os custos aumentados.

Com relação ao aço e ao estoque, quando há dominância nos custos de transporte, estes aumentam. Explica-se este comportamento pela quantidade de instalações realizadas no nível de empresas intermediárias (K) e da redução no custo de transporte quando o pneu está triturado, portanto, esta característica das empresas intermediárias (K) ganha mais importância.

Como esperado, os resultados encontrados foram parecidos com os obtidos por Eldhedli e Merrick (2012) em seu trabalho de configuração reversa, isto é: quando os custos das instalações são dominantes, há uma redução no número de instalações e maior custo de transporte, pois o material será enviado para instalações mais distantes. E quando os custos de transporte são dominantes, há maior quantidade de instalações realizadas, com redução no custo de transporte, pois o material é enviado para localidades mais próximas aos pontos de geração.

As instalações em comum nos testes com aumento nos custos das instalações estão na Figura 17, e no transporte estão na Figura 18, ambas no Apêndice C.

#### 5.4.4. Teste com restrição de orçamento para a instalação de centros de armazenamento (C)

Uma característica observada no experimento com múltiplos períodos é a ociosidade dos centros de armazenamento (c), sobretudo no período inicial do horizonte de planejamento. Neste sentido, foi realizado um teste com uma restrição adicional de orçamento que considera um dado orçamento ( $\theta_t$ ) no período t, para custos fixos, conforme a expressão (21):

$$\theta_t \geq Y_{itl} \times cf_{itl} \quad \forall t \in T, i \in C, l \in L \quad (21)$$

Para o teste com esta restrição, utilizou-se um orçamento anual inicial de 1,2 milhões de reais, o que garante a abertura de até 10 centros (c) por ano. A Tabela 8 apresenta o resultado do teste. Como se buscou a otimalidade o tempo limite foi de 20 horas.

Tabela 8 - Resultados médios anuais de custos, rendas e instalações do modelo com restrição de orçamento.

<b>Restrição de orçamento</b>	<b>Valor</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-34.317.029
<b>Custo de transporte (R\$)</b>	22.860.662
<b>Custo variável (R\$)</b>	24.541.587
<b>Custo fixo (R\$)</b>	3.938.193
<b>Renda total (R\$)</b>	85.657.500
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0
<b>Instalação de centros (c)</b>	12 (11)
	0 (12)
	0 (13)
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	17 (11)
	5 (12)
<b>Retorno (t)</b>	9.231
<b>Aço (t)</b>	5.517
<b>Estoque (t)</b>	4.338

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8 percebe-se que a diferença entre as configurações de rede do modelo original e do com restrição de orçamento foram de apenas 38 mil reais, isto é, a solução com restrição deixou de lucrar ao longo dos oito anos e em relação ao valor total de mais de 274 milhões de reais esta diferença, apesar de parecer pequena, trouxe as mudanças nas instalações da rede discutidas anteriormente. Os custos de transporte e fixo aumentara, pois

mais intermediárias (K) foram abertas, entretanto próxima das destinações (F) o que não contribuiu para a eficiência no transporte. O custo variável foi reduzido com o maior pré-processamento destinando parte como aço e o grânulo da borracha para a destinação pela granulação com custo reduzido após a trituração.

Nos centros (C), houve a instalação de 12 facilidades no horizonte de 8 anos. Os centros ( $c_{112}$ ) e ( $c_{126}$ ), anteriormente com ociosidade total no período  $t=1$ , foram abertos no período  $t=2$ . A ociosidade média caiu 2% em relação ao resultado com múltiplos períodos sem restrições, enquanto a ociosidade máxima foi de 66%. Note que os valores gerais foram próximos aos do modelo com múltiplos períodos, contudo, as mudanças entre as configurações propostas estão apresentadas na Figura 19 no Apêndice C.

As facilidades instaladas, comparando-se ao modelo sem restrição, localizam-se em sua maioria no eixo central do Estado de São Paulo, distribuindo-se em locais próximos das localidades em comum apresentadas no cenário com variação de demanda, indicando que com a restrição do orçamento acaba por reestruturar a rede para os locais com concentrações de demanda financeiramente mais interessantes.

Com a redução na instalação dos centros (C), o fluxo entre os ecopontos (P) e estes diminuiu e houve aumento no uso das empresas intermediárias (k) ocasionando maior separação do aço. O fluxo no período inicial foi de 4.621 t contra 6.404 t do modelo sem restrição de orçamento, e no aço a separação 43.860 para 44.140 t. A triagem dos pneus servíveis permaneceu constante, sendo realizada em maior quantidade nas empresas intermediárias (K).

## 6. ABORDAGEM COM CRITÉRIOS DE REDUÇÃO DA EMISSÃO CO<sub>2</sub>.

Durante a revisão da literatura verificou-se que poucos trabalhos consideram critérios ambientais quando propõem modelos para configuração de redes logísticas. Uma das formas usadas para analisar os impactos da logística no meio ambiente é através de indicadores de emissões de gases, por exemplo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

O uso da emissão de dióxido de carbono como critério para verificar e aperfeiçoar o desempenho ambiental advém de pontos como:

- a) É um gás de efeito estufa (GEE), que contribui para a intensificação do aquecimento global. Por esta razão, muitos estudos são conduzidos a fim de mensurar as pegadas de carbono de produtos, processos e instalações, e promover mecanismos de desenvolvimento limpo, como é o caso da compra e venda de créditos de carbono.
- b) O transporte terrestre, por meio de veículos à combustão interna, é um grande emissor de dióxido de carbono em diversas redes logísticas, caso de trabalhos específicos, como de Eldhedli e Merrick (2012).

A emissão de dióxido de carbono na logística reversa de pneus é assunto de relatórios da *Environment Protection Agency* (EPA) e do *Institute of Scrap Recycling Industries* (ISRI), que apontam que a reciclagem é uma forma de reduzir a pegada de carbono devida à substituição de matérias-primas virgens pela borracha e o aço reciclados, e devido à redução da produção de pneus novos que utiliza energia intensivamente no processo de conformação do produto.

O modelo apresentado no Capítulo 4 considera na função objetivo apenas a minimização de custos operacionais e de instalação, além da renda obtida através da venda de pneus para a reutilização e subprodutos das empresas de destinação. Nesta abordagem, propõe-se a inclusão dos créditos de carbono relacionados à pegada de carbono do transporte e dos tipos de processo de destinação e reutilização, que pode ser positiva ou negativa, e interferir no custo total da rede. Desta forma, o modelo sofreu alterações na função objetivo e novos parâmetros são necessários para que a emissão de dióxido de carbono possa ser adicionada e analisada em conjunto com custos e rendas quantificadas de forma financeira.

Em relação à pegada de carbono de transporte, apesar de Krikke (2011) relatar que as emissões são proporcionais à quantidade transportada, no trabalho de Eldhedli e Merrick (2012) é apresentada a emissão em razão da velocidade do veículo e do peso bruto, neste caso quanto maior a velocidade e peso, menor será a emissão por unidade de massa. Portanto, na rede reversa de pneus, caso o pneu esteja inteiro a emissão será maior por unidade de

massa transportada se comparada aos pneus triturados. Então, é válido considerar as emissões no transporte, dadas as características da rede proposta neste estudo, que avalia possíveis vantagens da utilização de centros para consolidação de carga e de empresas intermediárias de trituração. Neste caso, a pegada de transporte tem participação positiva, ou seja, representa emissão de CO<sub>2</sub> na rede logística.

Com relação às destinações e reutilização do pneu por meio do retorno, quando o pó ou pedaços da borracha substituem componentes originais a pegada de carbono é negativa. Por exemplo, em um cimento asfáltico, a pegada de carbono é menor em relação a presente na cadeia do produto original. A pegada de carbono nesta substituição pode chegar a ser oito vezes menor se comparada às matérias-primas originais, justificando o uso dos pneus triturados e granulados como materiais de carga no cimento asfáltico (IERE, 2009).

Para a abordagem proposta neste trabalho, foram consideradas como geradoras de crédito carbono as destinações coprocessamento (como queima para recuperação energética) granulação, laminação e a pirólise. Para obtenção dos calores da pegada de carbono de cada processo foram utilizados documentos da *Environment Protection Agency (EPA)*, *Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI)* publicado pelo *Institute for Environmental Research and Education* (2009) e do trabalho de Corti e Lombardi (2004).

Neste sentido, foram realizadas alterações no modelo com a inclusão dos custos de aquisição de créditos carbono no transporte e na renda com a venda dos créditos de carbono ao destinarem-se os pneus, ao evitarem-se as emissões. A expressão (22) apresenta as novas componentes da função objetivo do modelo multiperíodo das pegadas de carbono.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{(i,j):(i,j) \in S_1 \cup S_2 \cup S_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \{cc_t \times emt_{ij} \times d_{ij} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} \\
 & - \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} (cc_t \times emr_i \times W_{it}) - \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (cc_t \times ema_i \times U_{it}) \quad (22) \\
 & - \sum_{(i,j):(i,j) \in E_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (cc_t \times emp_m \times D_{ijmt})
 \end{aligned}$$

Onde:

$cc_t$  – valor do crédito carbono no período (t) em (R\$/t).

$emt_{ij}$  – pegada de carbono do transporte entre as instalações i e j (t CO<sub>2</sub> / t pneu ou material).

$emr_i$  – pegada de carbono do retorno de pneus servíveis (t CO<sub>2</sub> / t pneu).

$ema_i$  – pegada de carbono da fração do aço de pneus (t CO<sub>2</sub> / t pneu ou material).

$emp_i$  – pegada de carbono da destinação de pneus (t CO<sub>2</sub> / t pneu ou material).

Explicar melhor: possível impacto quando se é instalada facilidade do tipo intermediária.

A expressão (22) foi inserida como uma parcela na função objetivo do modelo multiperíodo original, sujeito às restrições (2) – (15), conforme expressão (23) a seguir.

$$\begin{aligned}
& \sum_{(i,j):(i,j) \in S_1} \sum_{t \in T} \{cv_{jt} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_1 \cup E_2} \sum_{t \in T} (cv_{jt} \times X_{jit}) \\
& + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{t \in T} (cvd_{jmt} \times D_{ijmt}) + \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (ce_{it} \times I_{it}) \\
& + \sum_{(i,j):(i,j) \in S_1 \cup S_2 \cup S_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \{ct_{ijt} \times d_{ij} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} \\
& + \sum_{i \in \{P \cup K\}} \sum_{t \in T} (cf_{it} \times Y_{it}) \\
& - \left\{ \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} (w_{it} \times W_{it}) + \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (u_{it} \times U_{it}) \right. \\
& \left. + \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (fm_{imt} \times D_{ijmt}) \right\} \\
& + \sum_{t \in T} \left[ \alpha_t \times \left\{ N_t - \left( \sum_{(j,i):(j,i) \in E_3} \sum_{m \in M} D_{ijmt} + \sum_{i \in K} U_{it} \right) \right\} \right] \\
& + \sum_{(i,j):(i,j) \in S_1 \cup S_2 \cup S_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \{cc_t \times emt_{ij} \times d_{ij} \times (X_{ijt} + D_{ijmt})\} \\
& - \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} (cc_t \times emr_i \times W_{it}) - \sum_{i \in K} \sum_{t \in T} (cc_t \times ema_i \times U_{it}) \\
& - \sum_{(i,j):(i,j) \in E_3} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} (cc_t \times emp_m \times D_{ijmt}) \tag{23}
\end{aligned}$$

A cotação do preço do crédito de carbono foi retirada do último leilão realizado pela Prefeitura de São Paulo em 2012, constando o valor de 3,3 euros por tonelada equivalente de CO<sub>2</sub>. Contudo este valor é bem menor se comparado com valores de crédito de carbono em anos anteriores, que chegou próximo dos 16 euros. Portanto foram geradas duas configurações de rede, uma com valor baixo e outro alto de crédito carbono. Testes iniciais sugeriram configurações parecidas com as do aumento da renda, ou seja, mais instalações.

Explorou-se então os dois valores de crédito carbono com um impacto na instalação das empresas intermediárias, ou seja, há emissão caso a destinação (F) seja dada a partir de um fluxo nas empresas (K), contudo aço e retorno permaneceram como benéficos à pegada de carbono.

Os resultados da aplicação do modelo geraram as configurações da rede propostas com a consideração da pegada de carbono apresentaram os valores globais de custos e renda relacionados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados gerais médios anuais de custos, rendas e instalações do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo.

<b>Modelo Multi Carbono</b>	<b>Teste com € 3,3 (R\$ 13,2)</b>	<b>Teste com € 16,5 (R\$ 66)</b>
<b>Função objetivo (R\$)</b>	-35.526.986	-40.854.602
<b>Custo transporte (R\$)</b>	23.066.975	23.201.350
<b>Custo variável (R\$)</b>	24.629.187	25.015.362
<b>Custo fixo (R\$)</b>	2.959.635	2.364.791
<b>Renda total (R\$)</b>	84.898.500	84.420.500
<b>Credito Carbono (R\$)</b>	1.284.275	7.015.550
<b>Penalização sofrida (R\$)</b>	0	0
<b>Instalação de centros (c)</b>	17 (I1)	31 (I1)
	0 (I2)	1 (I2)
	0 (I3)	0 (I3)
<b>Instalação de intermediárias (k)</b>	14 (I1)	10 (I1)
	4 (I2)	2 (I2)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se na Tabela 9, a redução na função objetivo, quando o valor do crédito de carbono aumenta, ocasionada por um custo fixo de instalação menor – já que mais centros (C) são instalados - e pela nova parcela chamada de crédito carbono. Isto é, as emissões que foram evitadas pelo processamento nas destinadoras e pelo retorno dos pneus, foi maior que a quantidade emitida pelo transporte. Deste modo, há crédito de carbono para venda na rede reversa.

Comparando-se o resultado do modelo multiperíodo original, sem adição do valor do crédito carbono da rede, verificou-se que na configuração proposta na Seção 5.2, houve um valor total de crédito carbono de -8.751.270 reais, isto é, a função objetivo total no caso é de -283.325.513 reais. No modelo com abordagem do crédito carbono, a função objetivo foi 0,5% melhor para o mesmo valor de € 3,3; já para o valor de € 16,5, a rede proposta pelo modelo original teria função objetivo total de -318.330.593 reais, e a diferença para o modelo com crédito carbono aumenta significativamente para 2,6%. Apesar de parecerem valores

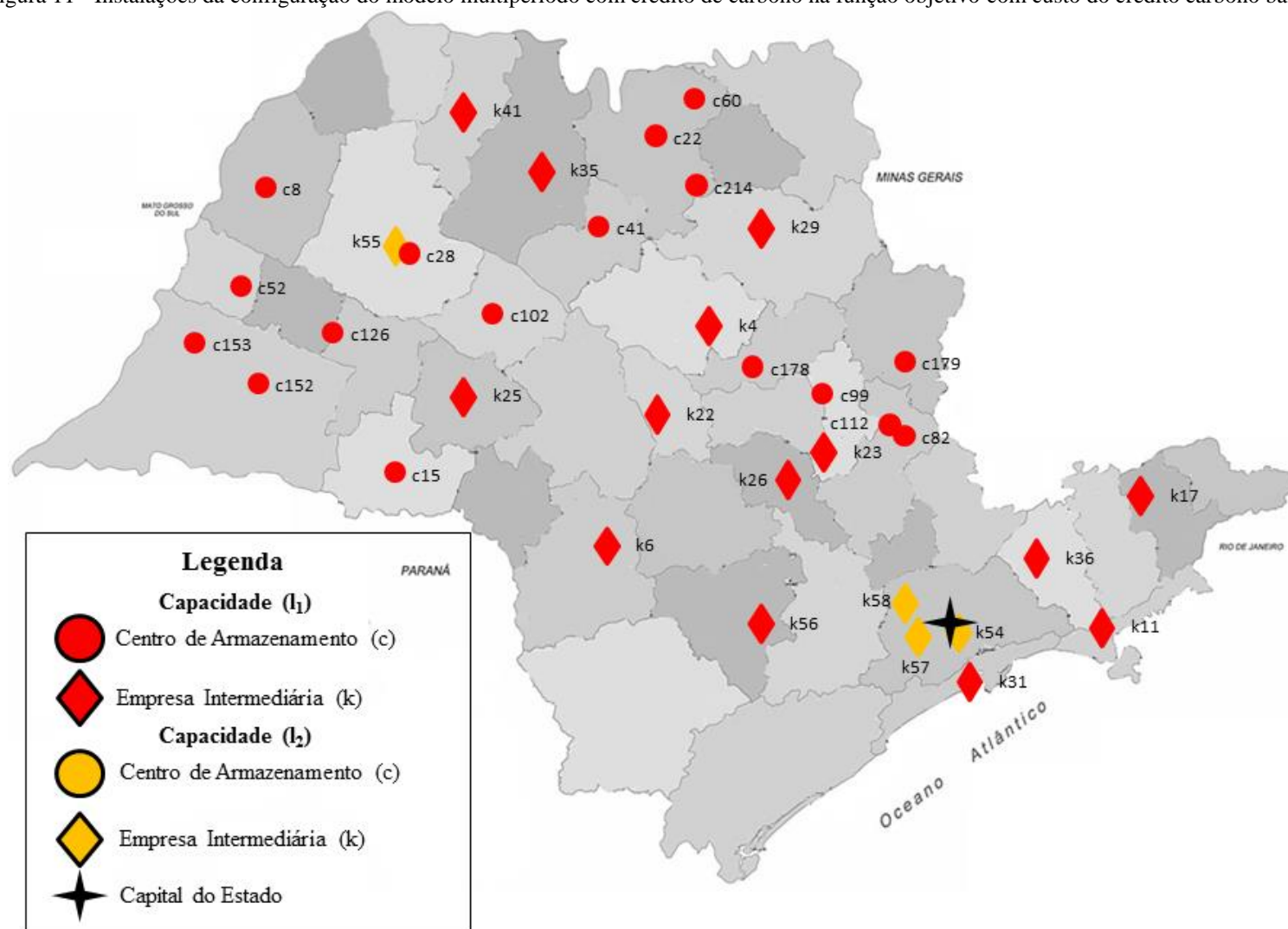
próximos, verificando-se as instalações realizadas em cada experimento, notam-se mudanças significativas na configuração, como a redução no número de empresas intermediárias (K) instaladas e o aumento no custo de transporte, e conseqüentemente nas emissões nessa componente da função.

Ainda na comparação com o modelo sem carbono, a diminuição no número de empresas intermediárias (K) resultou em um custo fixo menor, que chegou a 19 milhões no caso do valor de € 16,5 de crédito carbono; com queda na separação do aço presente no pneu, uma vez que o retorno apresenta os maiores ganhos em termos de redução da pegada de carbono e a separação do aço é obrigatória ao passar-se determinada quantidade pelas empresas intermediárias – o que não ocorre com os pneus servíveis; e por fim a maior necessidade de centros de armazenamento (C) para realizar a atividade de triagem que chegaram até número de 31 instalações, com um dos centros sendo instalado com capacidade no nível médio ( $I_2$ ), inclusive.

As instalações realizadas estão nas Figuras 11 e 12.

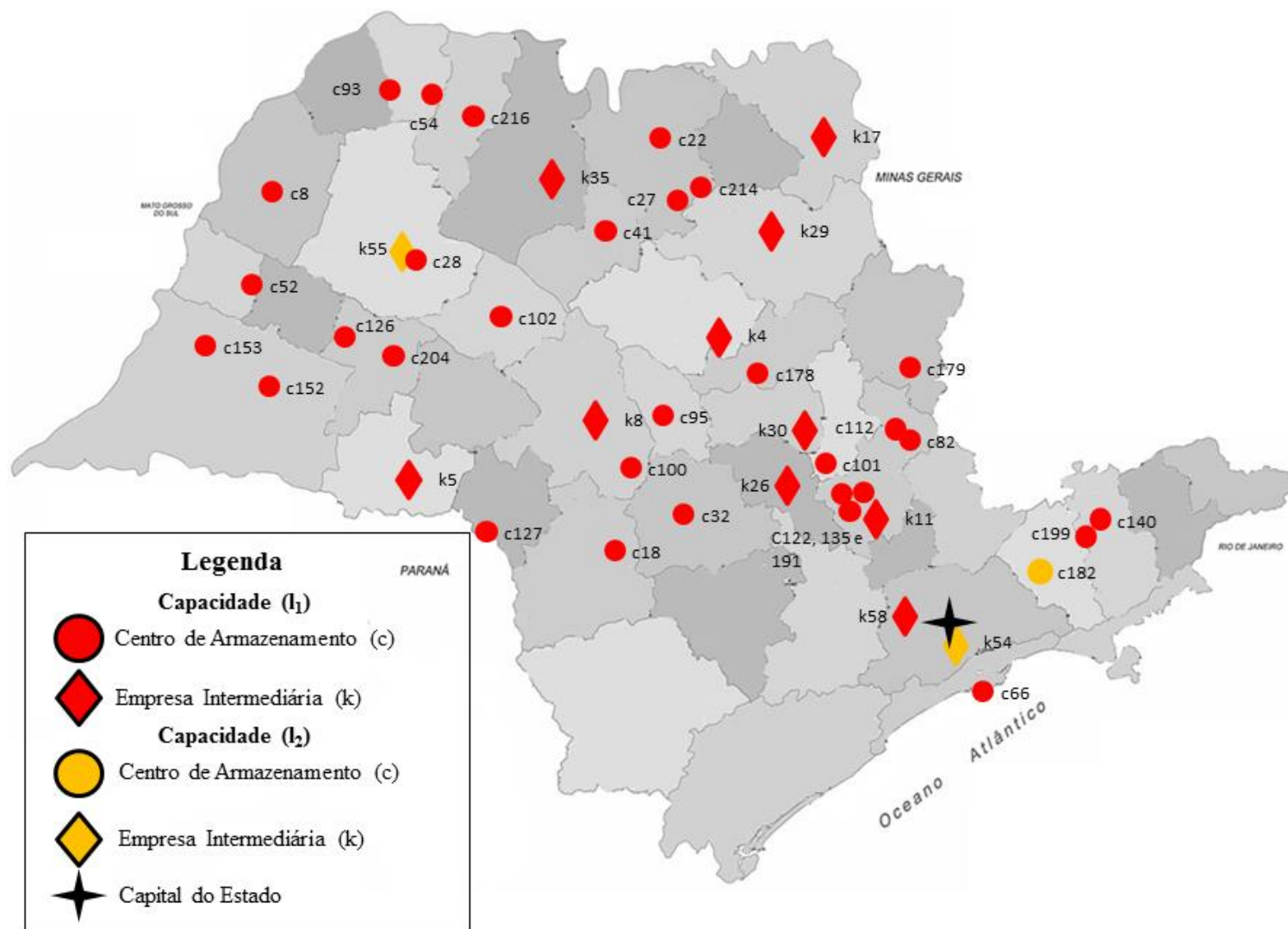


Figura 11 - Instalações da configuração do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo com custo do crédito carbono baixo.



Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Figura 12 - Instalações da configuração do modelo multiperíodo com crédito de carbono na função objetivo com custo do crédito carbono alto.



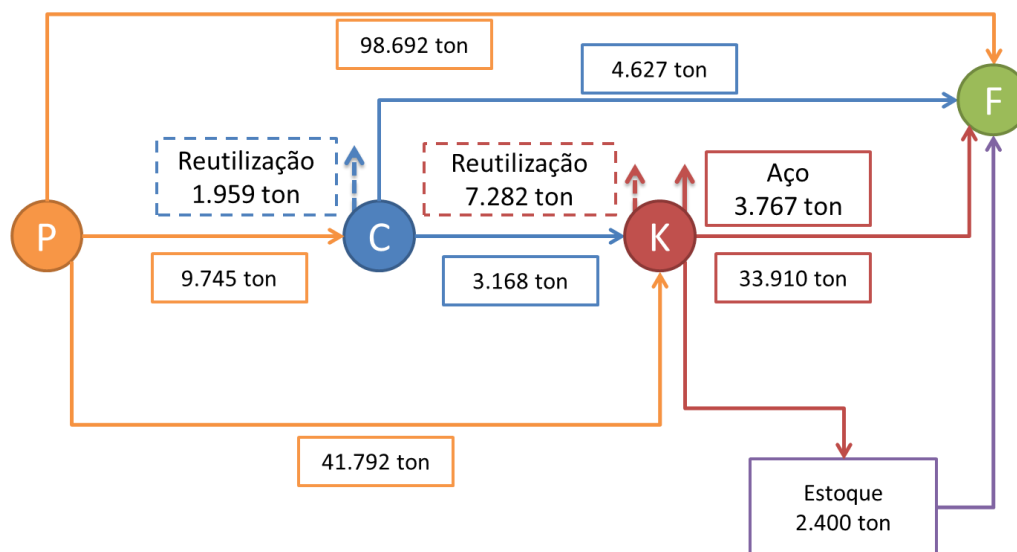
Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Perceba que há descentralização da rede proposta conforme o preço do crédito de carbono aumenta, pois os centros (C) são instalados em locais distantes, como é o caso das instalações na parte superior do mapa e das instalações na região central-sul, onde antes havia uma empresa intermediária, observadas na diferença entre a Figura 11 e Figura 12. Essa descentralização faz com que nas regiões mais densas de demanda – como a próxima da região metropolitana de São Paulo – o fluxo de pneus para retorno seja reduzido, refletindo na não instalação de empresas intermediárias (K) para realizar esse tipo de atividade, como discutido a seguir com relação ao fluxo presente na rede.

A partir dos fluxos nos esquemas das Figuras 13 e 14, percebe-se que a maior quantidade de centros promoveu:

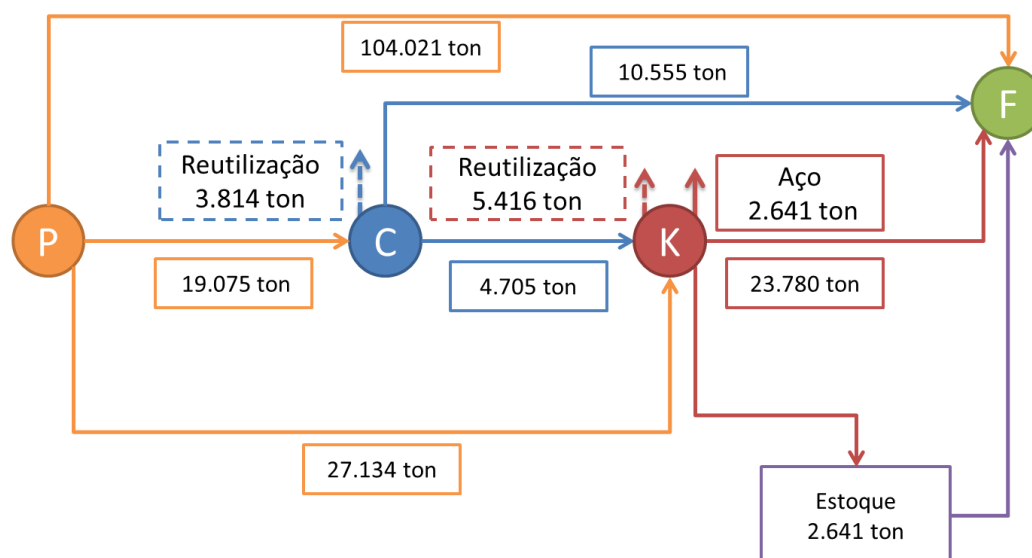
- Menor fluxo entre ecopontos e empresas intermediárias, o que reduziu o aço separado e a capacidade instalada dessa forma de destinação, portanto a quantidade enviada diretamente entre ecopontos e destinadoras foi maior – aumentando o custo de transporte e de processamento.
- Maior contribuição no retorno dos pneus servíveis por parte dos centros, contudo com o valor de 73.852 toneladas igual, ou seja, não houve maior quantidade retornada, e sim, a instalação dos centros para prover uma triagem mais barata em relação às intermediárias e sem a obrigatoriedade de separação de 10% do aço.

Figura 13 - Fluxos brutos médios anuais entre os níveis da rede proposta pelo modelo com crédito de carbono ao custo de € 3,3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Fluxos brutos médios anuais entre os níveis da rede proposta pelo modelo com crédito de carbono a custo de € 16,5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas duas configurações, a quantidade total destinada foi igual, mas as formas de destinação foram diferentes, conforme Tabela 10. Também houve redução na quantidade de aço separado e pneus retornados pelas empresas intermediárias (k).

Tabela 10 - Destinações totais realizadas e emissão de carbono, no horizonte de 8 anos, nos cenários de crédito de carbono baixo e alto.

Atividade	Teste com € 3,3 (R\$ 13,2)	Teste com € 16,5 (R\$ 66)	Diferença (%)
<b>Pegada transporte (TeqCO<sub>2</sub>)</b>	23.324	24.805	5,97
<b>Pegada operações (TeqCO<sub>2</sub>)</b>	-636.039	-697.165	8,76
<b>Crédito carbono total (R\$)</b>	-10.274.200	-56.122.440	81,69
<b>Retorno para reutilização (t)</b>	73.853	73.852	0
<b>Aço (t)</b>	30.139	21.135	-42,60
<b>Coprocessamento (t)</b>	66.885	72.271	7,45
<b>Granulação (t)</b>	923.534	922.404	-0,12
<b>Laminação (t)</b>	105.756	110.505	4,29
<b>Pirólise (t)</b>	1.680	1.680	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com maior número de centros de armazenamento (C), os pneus inteiros foram para as destinações coprocessamento e laminação, pois a quantidade destinada como aço foi reduzida. No caso da laminação ainda há a necessidade dos pneus estarem inteiros para a destinação, portanto também é um fator que aumentou esta forma de destinação. Note que apesar do

aumento da pegada com o transporte, o que não era esperado, as emissões evitadas pelas destinações foram da ordem de 61.126 toneladas no processamento e superou este aumento.

Observa-se que a rede com a pegada de carbono tem o comportamento de utilizar centros de armazenamento (C) para a triagem dos pneus usados, pois a redução da emissão na produção de pneus novos é maior se comparada aos outros elementos da rede. Ainda, se a rede fosse comparada sem o critério ambiental, o desempenho financeiro seria pior que o do modelo original, como pode ser visto na queda da renda total original. A emissão na configuração original foi menor no transporte, com 22.857 toneladas emitidas, mas em contrapartida o desempenho no processamento foi muito pior, com -539.546 toneladas de economia de carbono frente aos desempenhos 17 e 29% maiores das configurações com crédito na função objetivo. Deste modo, as emissões evitadas pelo retorno dos pneus foi maior do que as realizadas no transporte, o que do ponto de vista econômico foi mais interessante e também do ponto de vista ambiental, pois nas cadeias originais dos produtos, como pneus novos e materiais virgens, há a necessidade do transporte do local de produção até o de distribuição e este é reduzido ao utilizar-se fontes alternativas mais próximas das regiões de consumo, observado na rede descentralizada sob altos preços do crédito de carbono.

Portanto, quando o crédito de carbono aumenta, a rede só terá ganhado, pois mesmo com a configuração do modelo com a função objetivo original – Capítulo 4 – já é possível obter bons valores revertidos da redução das pegadas de CO<sub>2</sub>. Este comportamento é consequência da alta redução da pegada com o retorno e a reciclagem do pneu, que podem evitar a emissão entre 4,4 e 0,34 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de pneu servível ou subproduto gerado.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1. CONCLUSÕES

A configuração da logística reversa de pneus, em especial os inservíveis, apresenta-se como um desafio estratégico que envolve decisões que afetam também a logística direta, como é a possibilidade de triagem e retorno dos pneus servíveis para mercados primários. Na rede atual, percebe-se que a heterogeneidade dos ecopontos pode representar uma dificuldade para a triagem dos pneus de forma padronizada e segura; enquanto que a localização das empresas intermediárias concentra-se nos mesmos locais que as destinadoras, o que do ponto de vista do transporte pode representar aumento de custos.

Na rede proposta dois níveis adicionais foram propostos, um deles inexistente e outra que adiciona mais candidatos para empresas intermediárias e, conseqüentemente, permite que seja mais clara a divisão entre a trituração como um passo intermediário e as efetivas destinações presentes na rede. No primeiro nível proposto, a triagem dos pneus gera renda e a padronização pode representar maior qualidade do produto para os consumidores do mercado secundário. Além disso, a retirada dos pneus servíveis do fluxo e a consolidação da carga nos centros podem representar ganhos de eficiência no transporte e com isso reduzir seu custo. As intermediárias, além da triagem, geram benefícios como a separação do aço, que contabiliza para a meta e a reciclagem de material, e no transporte do material que passa para o estado de triturado.

Com relação aos experimentos e testes realizados, verificou-se que rede reversa de pneus inservíveis é uma parte importante da rede reversa dos pneus usados, que contém também os pneus chamados de servíveis.

No modelo com único período notou-se que as questões como estoque e a instalação de empresas intermediárias não foram tratadas devido aos custos em um horizonte de planejamento de curto prazo. A partir do experimento com múltiplos períodos, verificou-se que os estoques podem representar oportunidades de, por exemplo, cumprir a meta em determinado ano e assim, permitir o retorno dos pneus servíveis no fim do horizonte de planejamento sob o ponto de vista de uma economia com custos e rendas crescentes.

Com os testes de variação de parâmetros, ressalta-se que os centros de armazenamento são impactados principalmente pela demanda de pneus, pelo custo de transporte e crédito carbono. Caso a demanda seja próxima da meta não é possível o retorno, portanto os centros

não são instalados, já quando o custo do transporte ou a renda do crédito carbono são altos, a utilização dos centros se faz necessária para prover o retorno dos pneus servíveis dos ecopontos com baixa demanda e mais distantes das empresas de destinação.

As empresas intermediárias são afetadas principalmente pela renda e pelo valor do crédito de carbono, ambos ligados na maior parte ao retorno dos pneus, ocorrendo maior instalação quando a renda total é maior, mas ocorrendo menos instalações quando há crédito carbono em consideração. As empresas intermediárias apresentaram um uso de sua capacidade de forma mais regular do que se comparadas aos centros, e deste modo, reforçam a percepção de que são viáveis em locais com alta demanda por coleta de pneus.

As atividades de triagem e retorno representaram um elemento significativo nas configurações de rede reversa estudadas, especialmente quando a pegada de carbono foi inserida na função objetivo. Este critério ambiental demonstrou que a rede reversa apresenta grande potencial para a participação em ações que envolvam a venda de créditos de carbono, revertendo-os em capital para o reinvestimento na própria rede em equipamentos mais eficientes e projetos ambientais, como formas padronizadas da triagem e remanufatura de pneus.

Por fim, o modelo com múltiplos períodos obteve configurações distintas às demais experiências e extensão, como, por exemplo, com a restrição orçamentária e a de crédito de carbono, apesar de os resultados gerais indicarem valores de custos e rendas próximos. Este fato implica em uma percepção do planejador da rede para localizar instalações que possam lidar com os diferentes cenários econômicos e ambientais, o que resultaria na capacidade da rede de absorver as mudanças externas como a variação de demanda, enquanto propõem localizações específicas para cada objetivo, como maior instalação de centros de armazenamento para prover o retorno levando-se o critério ambiental em consideração, ou ainda, propor a instalação de empresas intermediárias de pré-processamento em aglomerados longe das destinadoras, facilitando o transporte do material coletado e ainda gerando subprodutos já utilizáveis, como o pneu retornado e o aço para as siderúrgicas, por exemplo.

Conclui-se ainda que apesar de todos os resultados indicarem que a rede gera lucro, é preciso ainda investimentos financeiros de terceiros, por exemplo, o caso da RECICLANIP que investiu mais de 200 milhões desde o início das atividades de coleta e destinação dos pneus inservíveis, pois a rede conta com grande número de agentes e o lucro deve ser dividido entre eles.

## 7.2. PERSPECTIVAS PARA FUTURAS PESQUISAS

A logística reversa de pneus ainda apresenta desafios, como demonstrado no último Relatório de Pneumáticos do IBAMA (2014), no qual diversas empresas foram autuadas por fornecer informações desencontradas sobre a destinação dos pneus inservíveis gerando incertezas de o quanto e como foi destinado.

A disponibilidade para a coleta também é um fator que afeta o desempenho ambiental, sobretudo dos importadores de pneus, e, portanto representa mais uma incerteza na rede reversa. Desta maneira, são pontos a serem discutidos futuramente, como: as empresas de destinação e a suas capacidades de processamento em um determinado período de tempo e se há variação, caso das cimenteiras, por exemplo, que dependem de outro mercado para produzir o cimento e conseqüentemente utilizar o pneu inservível nos fornos de cimenteiras.

A incerteza pode ser tratada não somente por meio de cenários, como foi neste estudo na variação de demanda e renda, mas por meio de uma programação estocástica, que requer modificações sensíveis no modelo apresentado neste trabalho.

Neste sentido de outras restrições, como novos critérios direcionadores da rede podem ser estudados para a logística reversa de pneus inservíveis, por exemplo, a quantidade de postos de trabalho gerado em cada tipo de instalação, a movimentação da economia local e até dos possíveis compradores dos subprodutos da borracha, representando um passo para integrar a rede reversa de pneus nas redes diretas destes compradores. E tais objetivos podem inclusive gerar modelos multiobjetivos, com funções separadas para cada um dos critérios utilizados.

A integração da rede reversa e direta, como citada anteriormente, trata-se de uma oportunidade de verificar o retorno nas condições de demanda no mercado secundário pelos produtos e possibilitar acrescentar-se as atividades relacionadas à limpeza do pneu para reuso ou do custo com a remanufatura.

O fluxo de materiais entre os Estados do Brasil podem ser estudados, pois ecopontos no limite da delimitação administrativa podem estar mais próximos de destinações em outros Estados. Ou seja, o modelo pode levar em consideração o contexto nacional, o que poderia auxiliar no planejamento público e nas decisões envolvidas de novas legislações, por exemplo, quando permitir ou não o transporte entre Estados e se essas restrições podem representar custos adicionais e impactos ambientais negativos. Além das questões de fluxos,



as instalações podem sofrer alterações, como: realocação ou abertura de novas instalações de empresas de destinação final.

Por fim, o modelo proposto auxilia nas decisões estratégicas de localização de facilidades e indica os fluxos entre cada agente, contudo, questões como de roteamento de veículos em ecopontos atendidos por uma mesma instalação, a frequência de coleta e até o dimensionamento da frota necessária e as capacidades, podem ser adicionadas por estudos futuros, ou seja, decisões operacionais da rede reversa.

## REFERÊNCIAS

ABDUL-KADER, W.; HAQUE, M. Sustainable tyre remanufacturing: an agent-based simulation modelling approach. **International Journal of Sustainable Engineering**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 330-347, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/7dKeur>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ACHILLAS, C. et al. A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 66, p. 76-84, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912000055>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

ADHIKARI, B.; De, S.; MAITI, S. Reclamation and recycling of waste rubber. **Progress in Polymer Science**, [S.l.], v. 25, n. 7, p. 909-948, Sept. 2000. Disponível em: <<http://goo.gl/F89Rfl>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

AGHEZZAF. Capacity planning and warehouses location in supply chains with uncertain demands. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 56, p. 453-462, 2005. Disponível em: <<http://www.jstor.org/discover/10.2307/4102216>>. Acesso em: 17 maio 2014.

AKSEN, D.; ARAS, N.; KARAARSLAN, A. G. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 119, p. 308-327, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/7YvCtK>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ALUMUR, S.; et al. Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 220, v. 1, p. 67-78, Jul. 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/vlRR8d>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

AMIN, S. H.; ZHANG, G. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network uncertain demand and return. **Applied Mathematical Modelling**, Guildford, v. 37, p. 4165-4176, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/rFQtvQ>>. Acesso em: 10 ago. 2013.

ANDRADE, H. S. **Pneus inservíveis**: alternativas possíveis de reutilização. 2007. 100 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://tcc.bu.ufsc.br/Economia293475>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ANTONIOU, N.; ZABANIOTOU, A. Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery. **Renewable and Sustainable Energy**

**Reviews**, [S.l.], v. 20, n. p. 539-558, Apr. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/joJdDK>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ARABANI, A. B.; FARAHANI, R. Z. Facility location dynamics: an overview of classifications and applications. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 62, n. 1, p. 408-420, Feb. 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/UDIoUa>>. Acesso em: 22 maio 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE IMPORTADORES E DISTRIBUIDORES DE PNEUS. **Projeto Pontos de Coleta de Pneus Inutilizáveis**. Disponível em <<http://abidipa.com/index.php/responsabilidade.html>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO SEGMENTO DE REFORMA DE PNEUS. **Dados do Segmento**. Disponível em: <<http://www.abr.org.br/dados.html>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Quem somos, fabricação**. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=fabricacao>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Política Industrial Automotiva**. 2011. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/PoliticaAutomotiva.pdf>>. Acesso em 01 dez. 2013.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Pneus**. Brasília, 1998. Disponível em: <<http://goo.gl/I1kdmD>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BARROS, A. I.; DEKKER, R.; SCHOLTEN, V. A two-level network for recycling sand: A case study. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 110, p. 199-214, 1998. Disponível em: <<http://goo.gl/tTCOVJ>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

BERTRAND, J. W. M; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, [S.l.], v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002. Disponível em: <<http://goo.gl/fr0FX2>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

BM&FBOVESPA. **Ata do Leilão**. Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/Consulta-Leiloes/leiloes-de-credito-de-carbono-login.aspx?idioma=pt-br>>. Acesso em: 01 dez. 2014.

BRASIL. Banco Central. **Tabela de câmbio**. Disponível em: <[www.bcb.gov.br/?txcambio](http://www.bcb.gov.br/?txcambio)>. Acesso em: 12 ago. 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 23, de 12 de dezembro de 1996**. Dispõe sobre as definições e o tratamento a ser dado aos resíduos perigosos, conforme as normas adotadas pela Convenção da Basileia sobre o controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos perigosos e seu Depósito. Disponível em: <<http://goo.gl/6tRPHN>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999 (Revogada pela Resolução No 416/09)**. Dispõe sobre a destinação final, de forma ambientalmente adequada e segura, aos pneumáticos inservíveis. Disponível em: <<http://goo.gl/aioYI0>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. DOU Nº 188, de 01/10/2009, p. 64-65. Disponível em: <<http://goo.gl/si08P0>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 1, de 18 de março de 2010**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Disponível em: <<http://goo.gl/NRVmlo>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Pneumáticos**. Dados apresentados no Relatório de Pneumático – Resolução CONAMA nº 416/2009 do Cadastro Técnico Federal (Out-Dez/2010). Brasília, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/9LFH6c>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Pneumáticos**. Dados apresentados no Relatório de Pneumático – Resolução CONAMA nº 416/2009 do Cadastro Técnico Federal (Ano 2011). Brasília, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/9LFH6c>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Pneumáticos**. Dados apresentados no Relatório de Pneumático – Resolução CONAMA nº 416/2009 do Cadastro Técnico Federal (Ano 2012). Brasília, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/J4EPbI>>. Acesso em: 28 set. 2013.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<http://goo.gl/1MCTm0>>. Acesso em: 2 fev. 2013.

BORCOL. **Empresa**. Disponível em: <<http://borcol.com.br/empresa.php>>. Acesso em: 17 mai. 2014a.

BORCOL. **Produtos**. Disponível em: <[http://borcol.com.br/prod\\_diversos.php](http://borcol.com.br/prod_diversos.php)>. Acesso em: 17 mai. 2014b.

CLAUZADE, C. et al. Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [S.l.], v. 15, n. 9, p. 883-892, Nov. 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/ugrcKx>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Fichas técnicas**: pneus. Disponível em: <[www.cempre.org.br/ft\\_pneus.php](http://www.cempre.org.br/ft_pneus.php)>. Acesso em: 31 mar. 2013.

CONTRERAS, I.; FERNANDEZ, E. General network design: a unified view combined location and network problems. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 219, p. 680-697, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/BoZAGV>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

CORTI, A.; LOMBARDI, L. End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA. **Energy**, [S.l.], v. 29, n. 12/15, p. 2089-2108, Oct./Dec. 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/O1i3Be>>. Acesso em: 20 set. 2014.

DAS, K.; CHOWDHURY, A. H. Designing reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 209-221, Jan. 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/I6Ren7>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

DE BRITO, M. P.; DEKKER, R. A framework for Reverse Logistics. **ERIM**: Erasmus Research Institute of Management, Roterdã, Apr. 2003. Disponível em: <<http://goo.gl/gB4d0a>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

DE FIGUEIREDO, J. N.; MAYERLE, S. F. Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Vancouver, v. 44, n. 5, p. 731-752, Sept. 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/BCIqJu>>. Acesso em: 14 ago. 2013.

DEMIREL, N. O.; GOKÇEN, H. A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. **The International Journal of Advanced Manufacturing**

**Technology**, London, v. 39, n. 11-12, p. 1197-1206, Dec. 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/8H7Eg2>>. Acesso em: 16 ago. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Frota de veículos (ano 2013)**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 26 mar. 2014.

DIABAT, A.; et al. Strategic Closed-Loop Facility Location Problem with Carbon Market Trading. **IEEE Transactions on Engineering Management**, New York, v. 60, n. 2, p. 398-408, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/xFWzyQ>>. Acesso em: 20 set. 2014.

ELHEDLI, S.; MERRICK, R. Green Supply chain network design to reduce carbon emissions. **Transportation Research - part D**, Oxford, v. 17, p. 370-379, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/W8KtOb>>. Acesso em: 20 set. 2014.

FERRÃO, P.; RIBEIRO, P.; SILVA, P. A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. **Waste Management**, Oxford, v. 28, n. 3, p. 604-614, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/5Fa2cW>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

FLEISCHMANN, M. et al. Quantitative models for reverse logistics: a review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 1-17, Nov. 1997. Disponível em: <<http://goo.gl/5MX88w>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

FLEISCHMANN, M. et al. A characterisation of logistics networks for product recovery. **OMEGA: The International Journal of Management Science**, Elmsford, n. 28, p. 653-666, 2000. Disponível em: <<http://goo.gl/9kFLfm>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

FLEISCHMANN, M. et al. The impact of product recovery on logistics network design. **Production and Operations Management**, Baltimore, v. 10, n. 2, 2001. Disponível em: <<http://goo.gl/CMD17V>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Estado de São Paulo e suas Regionalizações. Disponível em: <<http://produtos.seade.gov.br/produtos/divpolitica/>>. Acesso em: 04 maio 2014.

GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. de F.; BARRIOS, M. T. Panorama da Indústria de Pneus no Brasil: Ciclo de Investimentos, novos competidores e a questão do descarte de pneus inservíveis. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 25, p. 107-130, mar. 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/foFhcx>>. Acesso em: 30 maio 2014.

ICF Consulting. **Life-Cycle greenhouse gas emission factors for scrap tires**. Disponível em: <<http://epa.gov/epawaste/conservation/tools/warm/pdfs/ScrapTires5-9-06.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

INSTITUTE FOR GEOPHYSICS. **Calculate distance, bearing and more between two latitude/longitude points**. Disponível em: <<http://www.ig.utexas.edu/outreach/googleearth/latlong.html>>. Acesso em: 18 abr. 2014.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Sistema de informações ambientais**. Portaria IAP Nº 23, de 27 de fevereiro de 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/mNqqjO>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

JAYARAMAN, V.; PATTERSON, R. A.; ROLLAND, E. The design of reverse distribution networks: Models and solutions procedures. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 150, n. 1, p. 128-149, Oct. 2003. Disponível em: <<http://goo.gl/XXm2wa>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

KANNAN, D. A. et al. A carbon footprint based reverse logistics network design model. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 67, p. 75-79, Oct. 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/BKp7qS>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

KNEMEYER, M. A.; PONZURICK, T. G.; LOGAR, C. M. A qualitative examination of factors affecting reverse logistics systems for end-of-life computers. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Bradford, v. 32, n. 6, p. 455-479, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/09600030210437979>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

KRIKKE, H.; KOOL, E.; SCHUUR, P. Network design in Reverse Logistics: a quantitative model. **Management Report**, [S.l.], 1999. Disponível em: <<http://alexandria.tue.nl/repository/books/520994.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2013.

KRIKKE, H. Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 55, p. 1196-1205, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/4w15s3>>. Acesso em 18 abr. 2014.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus**: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/BIVhpF>>. Acesso em 26 abr. 2013.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem de pneus: discussão do impacto da política brasileira. **ENGEVISTA**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 32-49, jul. 2009. Disponível em: <[http://www.uff.br/engevista/1\\_11Engevista4.pdf](http://www.uff.br/engevista/1_11Engevista4.pdf)>. Acesso em 26 abr. 2013.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008. Disponível em: <<http://producao.usp.br/handle/BDPI/4571>>. Acesso em: 13 nov. 2013.

LAMBERT, S.; RIOPEL, D.; ABDUL-KADER, W. A reverse logistics decisions conceptual framework. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 61, n. 3, p. 561-581, Oct. 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/CVvdSz>>. Acesso em: 26 abr. 2013.

LEBRETON, B.; TUMA, A. A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 104, n. 2, p. 639-652, Dec. 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/GjmWJA>>. Acesso em: 26 abr. 2013.

LOGOZAR, K.; RADONJIC, G.; BASTIC, M. Incorporation of reverse logistic model into in-plant recycling process: a case of aluminium industry. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 49, n. 1, p. 49-67, Nov. 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/jjr4F4>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

MELKOTE, S.; DASKIN, M. S. An Integrated Model of Facility Location and Transportation Network Design, **Transportation Research**, Oxford, v. 35, n. 6, p. 515-538, Jul. 2001. Disponível em: <<http://goo.gl/67zpcO>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

MILANEZ, B.; BUHRS, T. Extended producer responsibility in Brazil: the case of tyre waste. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 17, n. 6, p. 608-615, Apr. 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/agvaRW>>. Acesso em: 25 maio 2013.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 167-184, jan./jun. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v11n1/11.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2013.

MUTHA, A.; POKHAREL, S. Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 56, n. 1, p. 334-346, Feb. 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/dydSNy>>. Acesso em: 15 ago. 2013.



NETO, J. Q. F.; et al. Designing and evaluating sustainable logistics networks. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, n. 111, p. 195-208, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/qqJr4G>>. Acesso em: 10 jun. 2014.

OLIVEIRA, O. J.; CASTRO, R. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu. **Anais...** [S.l.]: 2007. Disponível em: <[www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007\\_tr650481\\_0291.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0291.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2013.

RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; POVOA, A. P. B. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. **OMEGA: The International Journal of Management Science**, Elmsford, n. 48, p. 60-74, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/kr04IE>>. Acesso em: 10 out. 2014.

RECICLANIP. **Borcol produz tapetes de borracha para caminhões a partir de borracha recuperada de pneus**. Disponível em: <[www.reciclanip.org.br](http://www.reciclanip.org.br)>. Acesso em: 16 abr. 2014.

RECICLANIP. **Ciclo do Pneu Inservível**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-ciclo-do-pneu>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

RECICLANIP. **Pontos de Coleta-Evolução**. Disponível em: <[www.reciclanip.com.br/v3/pontos-de-coleta-evolucao](http://www.reciclanip.com.br/v3/pontos-de-coleta-evolucao)>. Acesso em: 30 mar. 2013.

RECICLANIP. **Principais destinações**. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-principais-destinacoes>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

REVERSE LOGISTICS EXECUTIVE COUNCIL. **Glossary**. Disponível em: <<http://www.rlec.org/glossary.html>>. Acesso em: 31 mar. 2013.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. **Going backwards: reverse logistics trends and practices**. Pittsburgh: Reverse Logistics Executive Council, 1999. Disponível em: <<http://www.rlec.org/reverse.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

SAAVEDRA, Y. M. B. et al. Remanufacturing in Brazil: case studies on the automotive sector. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, n. 53, p. 267-276, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/gPIRKC>>. Acesso em: 14 set. 2013.

SALEMA, M. I. G.; POVOA, A. P. B.; NOVAIS, A. Q. An optimization model for the design of capacited multi-product reverse logistics network with uncertainty. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, n. 179, p. 1063-1077, 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/co9V9s>>. Acesso em: 17 jun. 2014.

SARKIS, J. A strategic decision framework for green supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, n. 11, p. 397-409, 2003. Disponível em: <<http://goo.gl/UjpU7j>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

SARKIS, J.; ZHU, Q.; LAI, K. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 130, n. 1, p. 1-15, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/LIynTE>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

SASIKUMAR, P.; KANNAN, G.; HAQ, N. A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 49, n. 9-12, p. 1223-1234, 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-009-2470-4.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. **O Programa**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/municípioverdeazul/o-projeto/>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. **Resolução nº 24 de 30 de março de 2010**. Estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo impacto ambiental, para fins do disposto no artigo 19, do Decreto Estadual nº 54.645, de 05 de agosto de 2009, que regulamenta a Lei Estadual nº 12.300, de 16 de março de 2006, e dá providências correlatas. Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/resolucoes-sma/resolucao-sma-24-2010/>> Acesso em: 16 out. 2013.

SÃO PAULO. Secretaria de Meio Ambiente. **Resolução nº 9 de 4 de fevereiro de 2013**. Planos de Ação Ambientais, para o exercício de 2013, no âmbito do Programa Município VerdeAzul. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/resolucoes-sma/resolucao-sma-09-2013/>>. Acesso em: 16 out. 2013.

SHIVASTAVA, S. K. Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 53-80, Mar. 2007. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x/pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

SHIVASTAVA, S. K. Network design for reverse logistics. **OMEGA: The International Journal of Management Science**, Elmsford, v. 36, n. 4, p. 535-548, Aug. 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/WEa19G>>. Acesso em: 8 maio 2013.

SOUZA, C. D.; D'AGOSTO, M. A. Análise dos custos logísticos aplicada à cadeia logística reversa do pneu inservível. **Transportes**, [S.l.], v. 21, p. 38-47, 2013. Disponível em: <<http://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/649/480>>. Acesso em: 23 maio 2014.

THE INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH AND EDUCATION. **Carbon Footprint of USA Rubber Tire Recycling 2007**. Nov. 2009. Disponível em: <<http://www.cmtirerecyclingequipment.com/Public/14864/FinalRubberTireRecyclingCarbonFootprint.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Introduction to warm and tires**. Disponível em: <<http://epa.gov/epawaste/conserva/tools/warm/pdfs/Tires.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

URUBURU, A. et al. The new challenges of end-of-life tyres management systems: A Spanish case study. **Waste Management**, Oxford, v. 33, n. 3, p. 679-688, Mar. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/EZDFCa>>. Acesso em: 08 maio 2013.

VIANA, L. O. **A Logística Reversa e o tratamento de Pneus Inservíveis no Estado do Piauí**. 2008. 159 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2009. Disponível em: <<http://uol01.unifor.br/oul/conteudosite/F1066345342/Dissertacao.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ZHANG, Y. M.; HUANG, G. H.; He, L. An inexact reverse logistics for municipal solid waste management systems. **Journal of Environmental Management**, London, v. 92, n. 3, p. 522-530, Mar. 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/32yQY7>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

WILLIAMS, P. T. Pyrolysis of waste tyres: a review. **Waste management**, Oxford, v. 33, n. 8, p. 1714-1728, Aug. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/n4RvaM>>. Acesso em: 05 out. 2013

WANG, F.; LAI, X.; SHI, N. A multi-objective optimization for green supply chain network design. **Decision Support Systems**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 262-269, May 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/1tN8s7>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

## **APENDICE A – Levantamento e breve revisão da legislação vigente sobre o tema dos pneus inservíveis no Brasil e cálculos da meta legal.**

A resolução mais atual com respeito ao assunto é a CONAMA 416/09, que revoga as resoluções 258/1999 e 301/2002. A Resolução 258/99 foi a primeira a determinar que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficariam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis, e a Resolução 301/02 alterou o texto da 258/99 acrescentando considerações nos artigos desta, como as proibições legais da importação de pneus usados e da necessidade de tratamento do passivo ambiental, além dos critérios a serem observados na meta de coleta e tratamento, como:

- a) A partir de Jan/2002, para cada 4 (quatro) pneus produzidos ou importados, novos ou reformados, inclusive os que equipam veículos importados, dever-se-ia dar destinação a 1 (um) pneu inservível;
- b) A partir de Jan/2003, para cada 2 (dois) pneus produzidos ou importados, novos ou reformados, inclusive os que equipam veículos importados, dever-se-ia dar destinação a 1 (um) pneu inservível;
- c) A partir de Jan/2004, para cada pneu produzido ou importado novos, inclusive os que equipam veículos importados, dever-se-ia dar destinação a 1 (um) pneu inservível, e para cada 4 (quatro) pneus reformados importados, dever-se-ia dar destinação a 5 (cinco) pneus inservíveis;
- d) A partir de Jan/2005, para cada 4 (quatro) pneus produzidos ou importados novos, inclusive os que equipam veículos importados, dever-se-ia dar destinação a 5 (um) pneu inservível, e para cada 3 (três) pneus reformados importados, dever-se-ia dar destinação a 4 (cinco) pneus inservíveis;

O cálculo empreendido pelas Resoluções anteriores visava justamente o crescimento na taxa de destinação mediante o incremento anual na meta a ser tratada. A partir de 2005, a meta tornou-se maior que a produção e importação, como meio de responsabilizar as empresas pela coleta de pneus inservíveis que representavam passivo ambiental, pois estavam no meio ambiente ou armazenado em locais inadequados.

Para evitar a importação de pneus usados (reformados ou não), a resolução CONAMA nº 23, de 12 de dezembro de 1996, e a nº 235, de 7 de janeiro de 1998 dispõem sobre a proibição de pneus usados importados e o art. 70 do Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho

2008, e impõe multa por unidade de pneu usado ou reformado importado. Até 2008 os pneus eram importados mediante liminares da Justiça (LAGARINHOS, 2011).

A Resolução CONAMA 416/09 trouxe uma conciliação destas resoluções revogadas com relação à necessidade da destinação ambientalmente adequada e alterou o método de cálculo de destinação para produtores e importadores dada por redações anteriores. A partir desta, a meta a ser tratada passou a ser igual à quantidade disponível no mercado de reposição do ano anterior, com redação a ser dada pela Instrução Normativa do IBAMA nº 1/2010.

De acordo com o Art. 2º, dos incisos I até o III, da Resolução CONAMA nº 416/09, o pneu é classificado de acordo com a sua condição e etapa no ciclo de vida conforme com, como:

- a) **Pneu novo** - *“pneu, de qualquer origem, que não sofreu qualquer uso, nem foi submetido a qualquer tipo de reforma e não apresenta sinais de envelhecimento nem deteriorações”*;
- b) **Pneu usado** – *“pneu que foi submetido a qualquer tipo de uso e/ou desgaste [...] englobando os pneus reformados e os inservíveis”*. No caso dos pneus reformados há o processo de reutilização da carcaça do pneu usado para aumentar sua vida útil. Já os pneus *inservíveis* apresentam danos irreparáveis em sua estrutura não permitindo a rodagem ou a reforma.

A resolução CONAMA 416/09 determina a necessidade do tratamento ambientalmente adequado dos pneus inservíveis. A destinação ambientalmente adequada consiste de *“procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida(s) pelos órgãos ambientais competentes, observando a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos;”* (Art. 2º, inc VI da Resolução CONAMA 416/09).

É importante ressaltar que pela Resolução a destinação implica a descaracterização do pneu de sua forma inicial, desta maneira, as reformas de pneus usados não configuram para a meta, assim como outros usos possíveis para os pneus usados como obras de drenagem ou emprego como barreiras físicas, por exemplo, em autódromos. Contudo, segundo a Resolução, caso o pneu usado apresente condições de reforma esta deve ser preferível em relação à destinação final.

Quanto à operacionalização e demais disposições sobre a LR de pneus inservíveis, a CONAMA 416/09 necessitou da publicação da Instrução Normativa do IBAMA nº 1/2010. Nesta instrução há diretrizes básicas a serem consideradas na rede de logística reversa nacional, assim como fórmulas para o cálculo das metas a serem atingidas quanto à destinação ambientalmente adequada para fabricantes e importadores.

O cálculo das metas de destinação para fabricantes e importadores (nomenclatura e parâmetros conforme a Instrução Normativa IBAMA nº 1/2010) é dado pelos art. 4 e art. 5, respectivamente. Para os fabricantes tem-se:

- a) **Cálculo para fabricantes** – para os fabricantes considera-se a quantidade produzida e são subtraídas as parcelas exportadas e utilizadas pelas montadoras de veículos. O valor é então multiplicado por 0,70, isto é, estima-se que o pneu inservível tenha em média 70% da massa de um pneu novo.

$$\text{Meta} = [(\text{peso } a - \text{peso } b - \text{peso } d) \cdot 0,70]$$

*a* – total de pneus fabricados.

*b* – total de pneus exportados.

*d* – total de pneus enviados às montadoras para equipar novos veículos.

*0.70* – peso depois do uso, assumindo uma perda mássica de 30%.

- b) **Cálculo para importadores** - para os importadores considera-se a quantidade importada e subtrai-se a parcela utilizada pelas montadoras de veículos. O valor é então multiplicado por 0,70, com a mesma consideração do cálculo para fabricantes.

$$\text{Meta} = [(\text{peso } a - \text{peso } b) \cdot 0,70]$$

*a* – total de pneus importados.

*b* – total de pneus enviados às montadoras para equipar novos veículos.

*0.70* – peso depois do uso, assumindo uma perda mássica de 30%.

Para o cumprimento da meta, os fabricantes e importadores devem estruturar um Plano de Gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação de Pneus inservíveis (PGP) que deverá contemplar no mínimo: estratégias de coleta e documentos relacionados; indicação dos ecopontos e armazenamento; descrição das destinações utilizadas; os programas de educação ambiental a serem desenvolvidos entre os agentes envolvidos com especial atenção ao consumidor; definição da forma de monitoramento do gerenciamento dos pneus inservíveis; e, as licenças ambientais correlatas aos ecopontos, instalações de armazenamento e de processamento. A instrução normativa determina que em cidades com mais de 100 mil habitantes deve haver pelo menos um ponto de coleta de pneus, e nos municípios com menos

de 100 mil habitantes, a coleta deve ser feita por sistemas locais ou regionais, conforme indicado no PGP.

O art. 33 da Lei nº 12.305 de 2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) determina os produtos para os quais a logística reversa deve ser estruturada e implantada. Os pneus estão listados dentre os produtos com logística reversa obrigatória, ou seja, do ponto de vista legal, a PNRS fortaleceu as Resoluções do CONAMA previamente existentes.

Tais leis e resoluções representam restrições que devem ser impostas em redes de logísticas reversas de pneumáticos, sendo fatores limitantes e de discussão para a melhoria do sistema atual. Para o Estado de São Paulo, não há legislação mais restritiva do que a Federal. Contudo há dois pontos no aspecto histórico e legal do Estado de São Paulo. O primeiro é que no ano de 2010, duas resoluções da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SMA) foram publicadas no Estado de São Paulo, a SMA nº 24/2010 que tratava de produtos com a necessidade de responsabilidade de pós-consumo, como lâmpadas fluorescentes, baterias automotivas, produtos eletrônicos, pneus, entre outros, com o princípio da PNRS publicada meses depois. E a Resolução SMA nº 131/2010, que estipulava prazos máximos para que todos os municípios (e não somente aqueles com mais de 100.000 habitantes) tivessem pelo menos um ponto de coleta até Agosto de 2014. Entretanto, em 2011 a Resolução SMA nº 11/2011 revogou ambas as resoluções anteriores e instituiu uma comissão para o estudo mais aprofundado sobre tema.

Os Estados podem criar leis específicas que restrinjam o fluxo de pneus inservíveis, como é o caso do Paraná e a Resolução SEMA nº 57 de 25 de novembro de 2008, no qual pneus usados são proibidos de serem trazidos a partir de outros Estados da Federação e/ou de outros países, ou seja, somente pneus novos são permitidos, conforme Portaria nº 23 de 27 de fevereiro de 2009 (IAP, 2013).

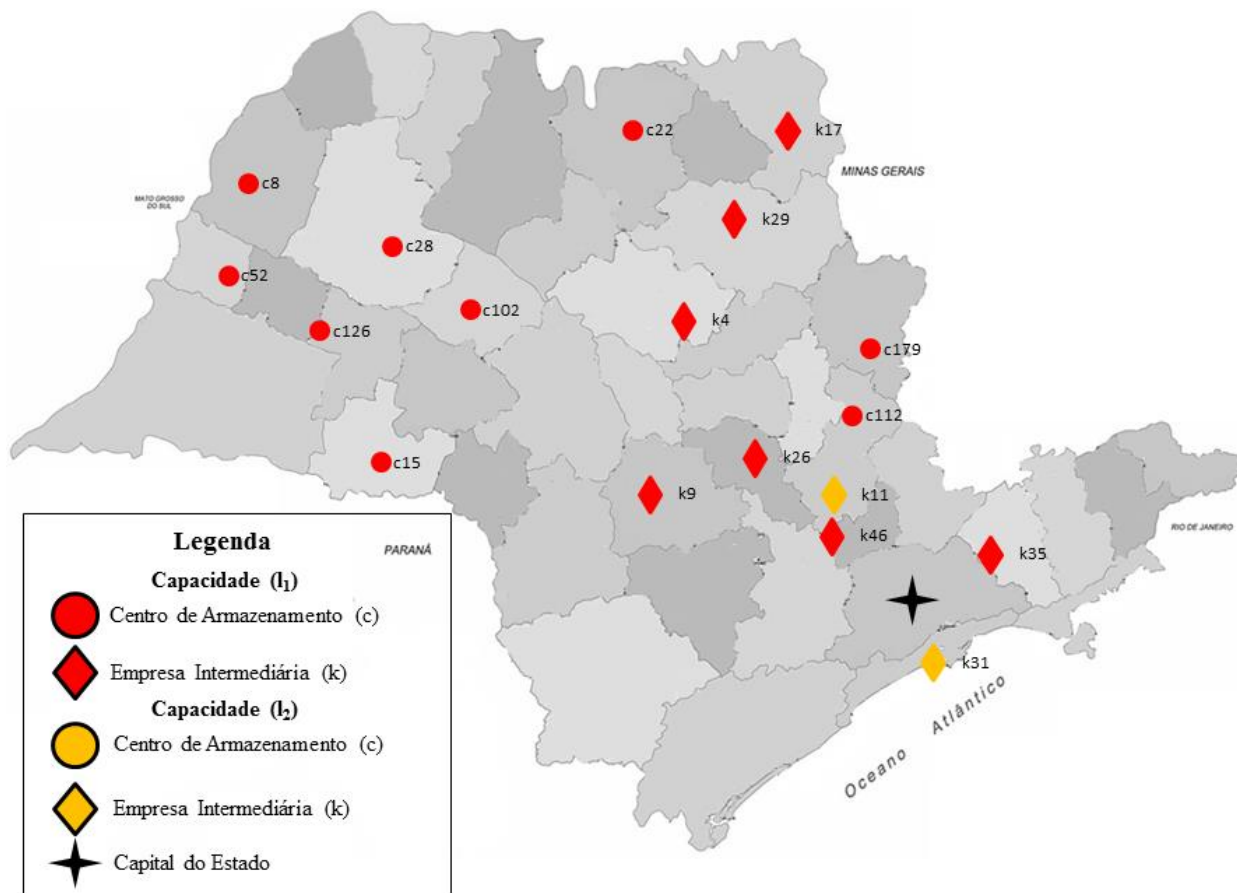
**APÊNDICE B - Dados da rede de LR de pneus inservíveis no Estado de São Paulo.**

As informações encontram-se no site: <https://sites.google.com/site/engfsstark>.



## APÊNDICE C – Mapas com localidades em comum nos testes de variação de parâmetros

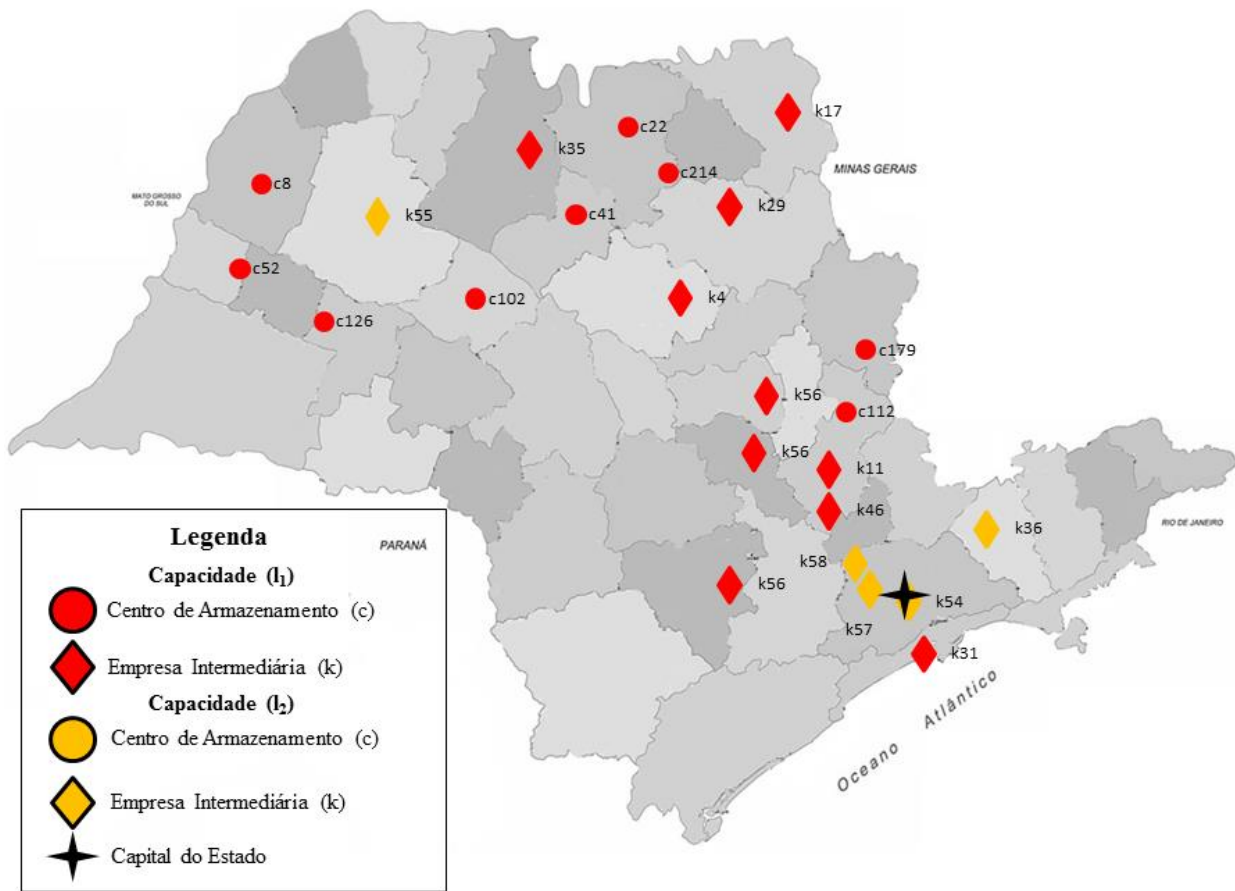
Figura 15 - Instalações em comum\* entre os cenários do teste com variação na demanda.



\*Centros de armazenamento (C) não foram instalados no cenário 1 – demanda igual à meta.

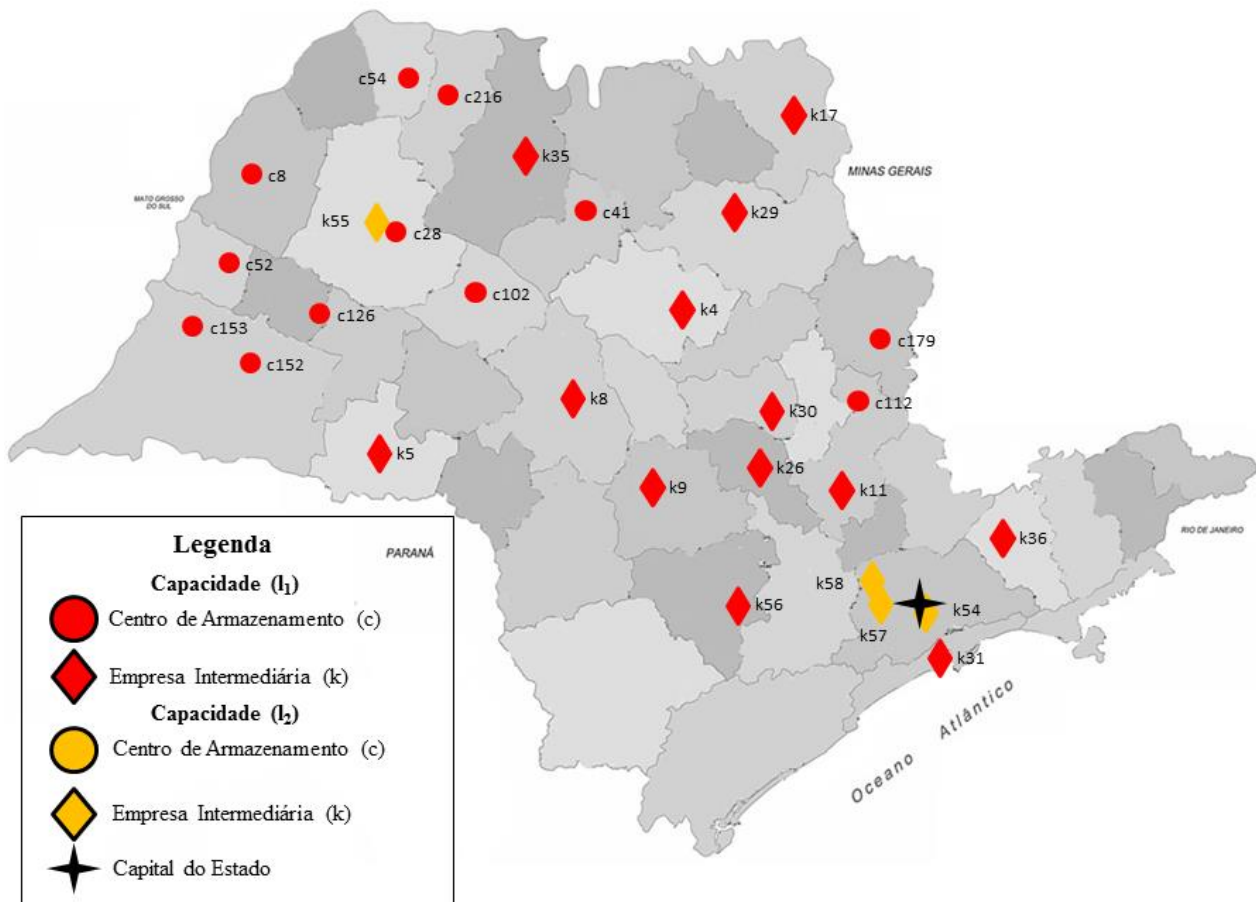
Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Figura 16 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nas rendas.



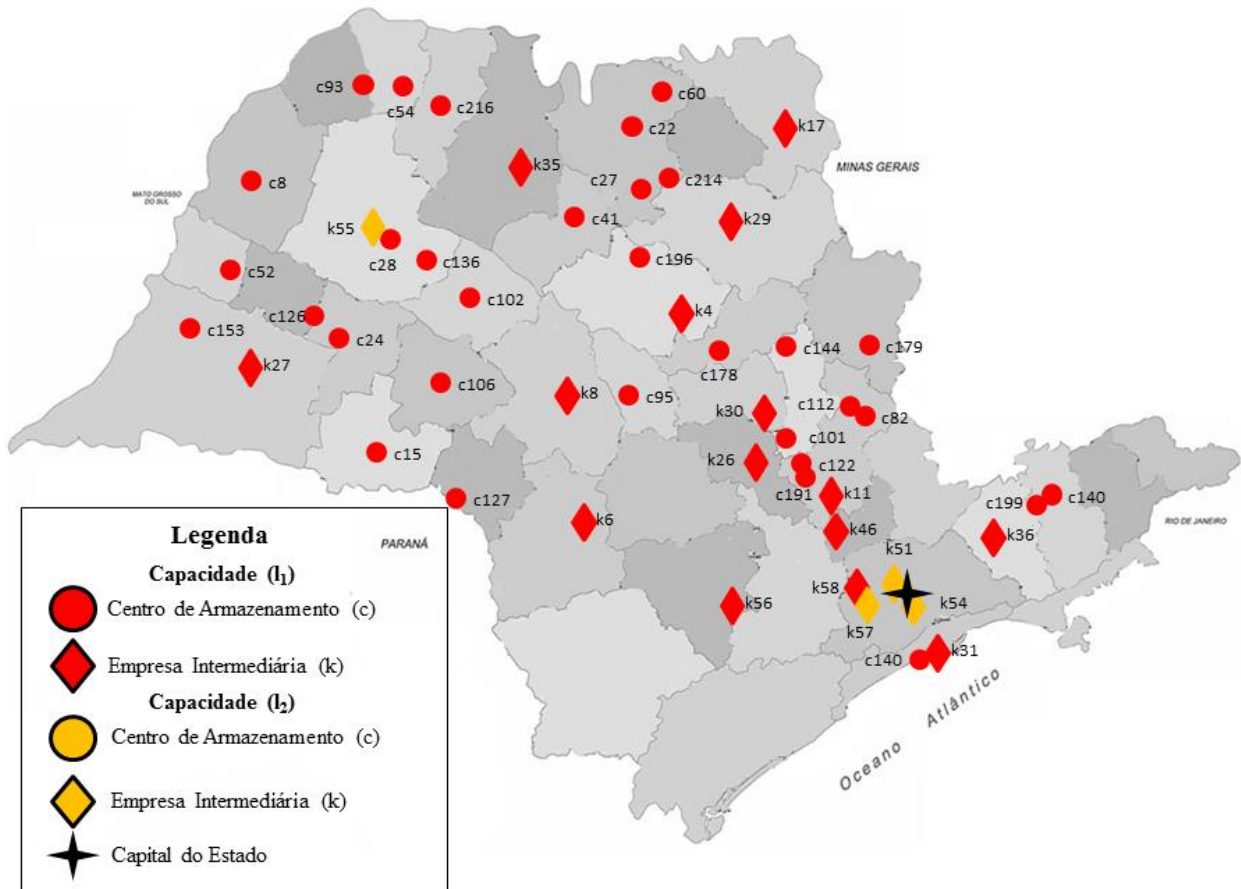
Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Figura 17 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nos custos das instalações.



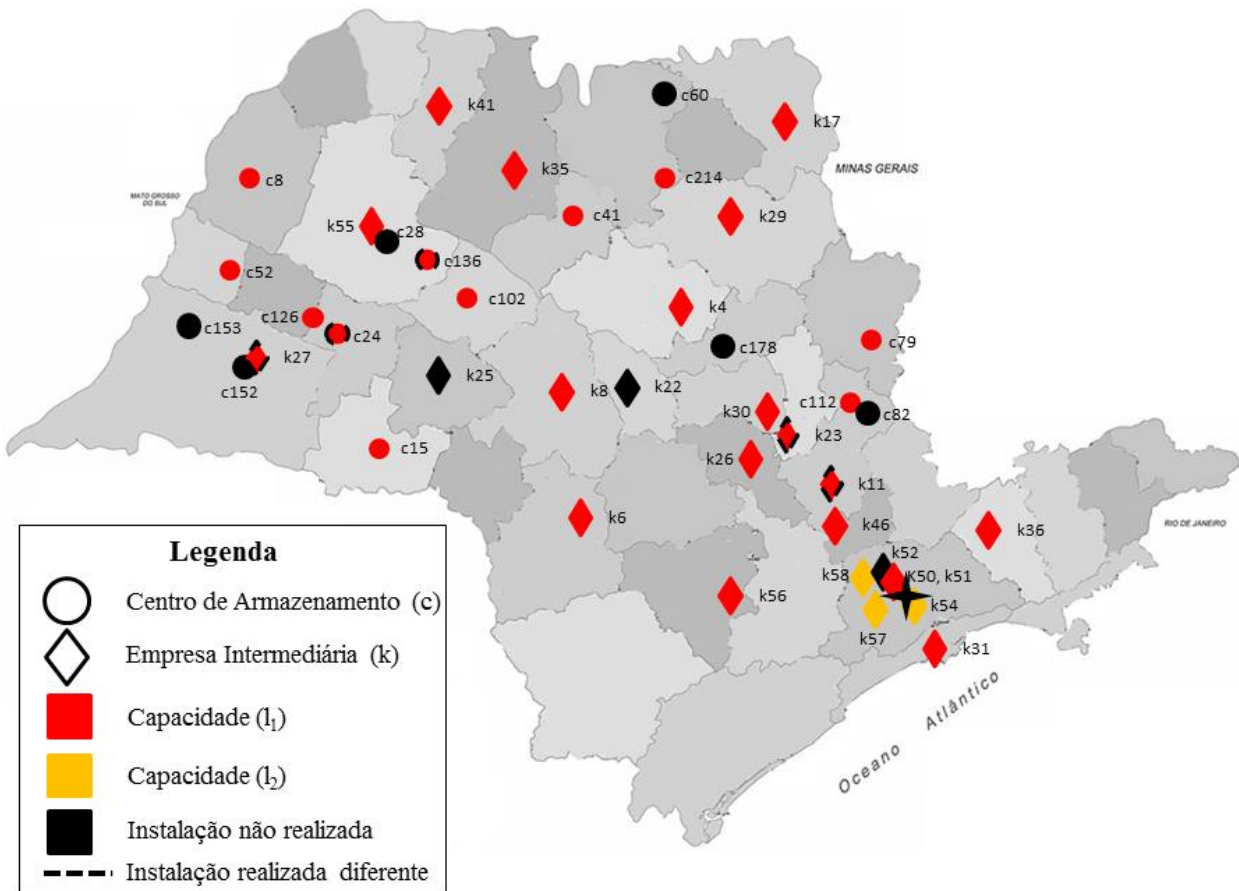
Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Figura 18 - Instalações em comum entre os cenários do teste com variação nos custos de transporte.



Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).

Figura 19 - Instalações na configuração do modelo com restrição de orçamento e diferenças entre o modelo com múltiplos períodos original.



Fonte: Elaborado pelo autor com a base do mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2002).