

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PPGEP-S**

JORGE MICHAEL BURGOS MENESES

**LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS: MODELO DE
OTIMIZAÇÃO PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS E TÁTICAS**

SOROCABA

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CAMPUS SOROCABA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PPGEP-S**

JORGE MICHAEL BURGOS MENESES

**LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS: MODELO DE
OTIMIZAÇÃO PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS E TÁTICAS**

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, para realização do exame de defesa, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Orientadora: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Co-orientadora: Profa. Dra. Deisemara Ferreira

SOROCABA

2018

Burgos Meneses, Jorge Michael

LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS: MODELO DE
OTIMIZAÇÃO PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS E TÁTICAS / Jorge
Michael Burgos Meneses. -- 2018.

152 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Eli Angela Vitor Toso

Banca examinadora: João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, Fernando
Augusto Silva Marins

Bibliografia

1. Logística Reversa. 2. Pneus Inservíveis. 3. Programação Linear Inteira
Mista. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Jorge Michael Burgos Meneses, realizada em 10/04/2018:

Prof. Dra. Eli Angela Vitor Toso
UFSCar

Prof. Dra. Daisemara Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
UFSCar

Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
UNESP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Fernando Augusto Silva Marins e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dra. Eli Angela Vitor Toso

Dedico o resultado dessa experiência a meus queridos pais

Yadira Esther Meneses e Jorge Luis Burgos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por todas as bênçãos e oportunidades.

À minha orientadora Eli, muito obrigado pela confiança, orientação, apoio, compreensão e paciência.

À minha Co-orientadora Deisemara pelo seu aporte na minha formação profissional.

Aos membros da banca do exame de qualificação e defesa pela revisão cuidadosa e os aportes para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, pela confiança, força e carinho que me fortaleceram para fazer o melhor de mim.

A Dina Miranda pelo amor e companhia.

Às amigadas que surgiram ao longo do mestrado, Aura, Hector, Alfredo, Victor, Andres, Christian, Cindy, Camille, Nayara, Olivia, Erick, Elias, Osvaldo e demais amigos. Todos vocês fizeram amigável e agradável a estadia fora de casa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Sorocaba, em especial à Erica pela colaboração, disposição e boa vontade sempre.

À CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo apoio financeiro sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

Aos meus amigos na Colômbia que sempre torceram por mim. Muito obrigado pela amizade e companhia na distância.

Muito obrigado a todos vocês!

RESUMO

LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS: MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA DECISÕES ESTRATÉGICAS E TÁTICAS – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Sorocaba, 2018.

O acúmulo de pneus inservíveis é um problema de grande preocupação no mundo inteiro, pois estes caracterizam-se por serem resíduos sólidos não biodegradáveis e de baixa compressibilidade, que causam diversos danos ao meio ambiente e à saúde pública. No Brasil, existem leis que estabelecem metas para a destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis, e responsabilizam os produtores e importadores de pneus por esta atividade. A rede reversa de pneus no Brasil é composta por pontos de descarte, chamados ecopontos, centros intermediários, onde são realizadas atividades de triagem e trituração de pneus, e plantas de processamento, onde são realizadas diferentes atividades de reciclagem ou recuperação de valor. Atualmente, os produtores e importadores de pneus realizam a coleta de pneus inservíveis, mediante a solicitação dos ecopontos ao atingirem uma quantidade estabelecida. Não são consideradas informações críticas para o planejamento da coleta como: a capacidade de estoque dos ecopontos; a capacidade e disponibilidade dos centros intermediários e plantas de processamento; e previsões da quantidade de pneus descartados. A logística reversa de pneus se caracteriza por envolver altos custos de transporte, uma vez que a forma dos pneus dificulta a compactação da carga e há uma grande dispersão geográfica dos pontos de coleta. Neste sentido, a abertura de centros de triagem e trituração podem trazer benefícios econômicos ao reduzir o custo de transporte e gerar receitas com a venda do aço retirado dos pneus triturados e a venda de pneus ainda em condições de uso. Nesta pesquisa é proposto um modelo de programação matemática para apoiar as decisões de planejamento da logística reversa de pneus no contexto brasileiro, considerando simultaneamente decisões de nível estratégico (localização e dimensionamento de centros intermediários); e decisões de nível tático (dimensionamento de frota de veículos, fluxo de material entre os pontos, quantidades de pneus a classificar, triturar, estocar, comercializar no mercado secundário e destinar, em cada período de tempo). Para os experimentos computacionais, foram consideradas 40 instâncias baseadas em dados reais do Estado de São Paulo (Brasil). Os resultados mostram que o modelo proposto representa adequadamente a rede reversa e fornece boas soluções para as decisões estratégicas e táticas envolvidas no planejamento da rede. Vários métodos heurísticos foram desenvolvidos como alternativas de solução para os casos em que os métodos exatos não são eficientes. As heurísticas propostas são capazes de encontrar soluções de boa qualidade com baixo tempo computacional. Finalmente, uma análise de sensibilidade é realizada, a fim de mostrar o impacto da variação de parâmetros como o preço de venda de pneus reusáveis no mercado secundário, custos de transporte e custos de destinação.

Palavras Chaves: Logística Reversa; Pneus Inservíveis; Programação Linear Inteira Mista; Reciclagem de pneus, Planejamento de Redes.

ABSTRACT

REVERSE LOGISTICS OF WASTE TIRES: MODEL OF OPTIMIZATION FOR STRATEGIC AND TACTICAL DECISIONS. – Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Sorocaba, 2018.

The accumulation of waste tires is a problem of great concern worldwide, as these are non-biodegradable and low compressibility solid waste, which cause different damage to the environment and public health. In Brazil, there are laws that establish targets for the environmentally appropriate disposal of waste tires, and make tire producers and importers responsible for this activity. The tire reverse network in Brazil consists of disposal points, called ecopoints, intermediate centers, where take place tire sorting and grinding activities, and processing plants, where take place different recycling or value recovery activities. Currently, the tire producers and importers carry out the collection of waste tires, at the request of the ecopoints when they reach an established quantity. For collection planning are not considered critical information as: the ecopoints inventory capacity; the capacity and availability of intermediate centers and processing plants; and forecasts of the amount of waste tires. Reverse logistics of tires involves high transport costs, since the shape of the tires makes it difficult to compaction of the load and there is a great geographical dispersion of the ecopoints. In this sense, the opening of sorting and grinding centers can bring economic benefits by reducing transport costs and generating revenues from the sale of the steel removed from the crushed tires and the sale of reusable tires. In this research, a mathematical programming model is proposed to support the planning decisions of reverse tire logistics in Brazil, considering both strategic-level decisions (location and dimensioning of intermediate centers); and tactical-level decisions (vehicle fleet sizing, material flow between points, quantities of tires to be sorted, crushed, stocked, marketed on the secondary market and disposed in each period of time). For the computational experiments, 40 instances were considered based on real data from the State of São Paulo (Brazil). The results show that the proposed model adequately represents the reverse network and provides good solutions for the strategic and tactical decisions involved in network planning. Several heuristic methods have been developed as solution alternatives for cases where the exact methods are not efficient. The heuristics are able to find good quality solutions with low computational time. Finally, a sensitivity analysis is performed in order to show the impact of the variation of parameters such as the sale price of reusable tires in the secondary market, transportation costs and disposal costs.

Keywords: Reverse logistic; Waste Tires; Mixed integer linear programming; Tire Recycling, Network Planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução das publicações relacionadas ao tema desta pesquisa nos últimos anos.....	17
Figura 2. Etapas desenvolvidas na pesquisa.....	18
Figura 3. Produção de pneus dos últimos 20 anos.	21
Figura 4. Destinação de Pneus Inservíveis no Brasil no 2015.	22
Figura 5. Rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.....	24
Figura 6. Estrutura geral dos sistemas de rede de logística reversa.	29
Figura 7. Classificação dos problemas de rede reversa segundo as características da rede.....	31
Figura 8. Estrutura do sistema de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.	45
Figura 9. Rede reversa proposta para a modelagem.....	48
Figura 10. Balanço de fluxo de material nos ecopontos.....	52
Figura 11. Balanço de fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários.	52
Figura 12. Balanço de fluxo dos pneus triturados nos centros intermediários.	53
Figura 13. Árvore de cenários para os testes computacionais.....	68
Figura 14. Localização de centros intermediários para a instâncias Δ MD5-A.	69
Figura 15. Síntese dos resultados gerais da instância Δ MD5-A.....	70
Figura 16. Comparação dos resultados do planejamento com e sem abertura de CI.	74
Figura 17. Fluxos e objetivos obtidos na comparação das 3 abordagens.	78
Figura 18. Comparação: fluxo de pneus das instâncias segundo o tipo de distribuição.....	91
Figura 19. Comparação: trituração das instâncias segundo o tipo de distribuição.....	92
Figura 20. Comparação: Custos das instâncias segundo o tipo de distribuição.	93
Figura 21. Fluxo de pneus com e sem consideração de custos de destinação.	94
Figura 22. Capacidade de trituração em instâncias com e sem custos de destinação.....	95
Figura 23. Quantidade de pneus de servíveis comercializados vs seu valor.	97
Figura 24. Relação da renda da rede vs valor dos pneus servíveis no mercado secundário.....	97
Figura 25. Relação dos custos vs valor dos pneus servíveis no mercado secundário.	98
Figura 26. Variações nos custos totais frente a mudanças no transporte.	99
Figura 27. Dados da instância ilustrativa	116
Figura 28. Distribuição espacial dos agentes nas instâncias ilustrativas.....	117
Figura 29. Localização dos Centros Intermediários nas instâncias ilustrativas	120
Figura 30. Fluxos de pneus para a instância ilustrativa com meta de 16.000 t	122
Figura 31. Síntese: Resultados da abordagem monoperíodo para a instância agregada.	125
Figura 32. Síntese: Resultados do modelo Stark (2015) para a instância agregada.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Busca de artigos segundo as palavras chaves.....	32
Tabela 2. Trabalhos de configuração de rede de logística reversa.....	42
Tabela 3. Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo.....	55
Tabela 4. Heurística de decomposição em duas fases.....	57
Tabela 5. Heurísticas do tipo relax-and-fix.....	58
Tabela 6. Heurísticas do tipo fix and optimize.....	60
Tabela 7. Heurísticas do tipo relax-and-fix and fix and optimize propostas.....	60
Tabela 8. Pneus coletados pelos produtores e importadores nos últimos 7 anos.....	62
Tabela 9. Custo de transporte de carga por tonelada.....	63
Tabela 10. Capacidades dos Centros Intermediários.....	63
Tabela 11. Custos de instalação de Centros Intermediários.....	64
Tabela 12. Meta de descarte de pneus nos últimos 7 anos.....	65
Tabela 13. Pneus descartados e meta estabelecida dos grupos de instâncias.....	66
Tabela 14. Resultados dos fluxos da instância Δ MD5-A, detalhados por período.....	72
Tabela 15. Síntese do envio de pneus às empresas de destinação final.....	73
Tabela 16. Decisões abordadas pelos modelos a comparar.....	75
Tabela 17. Resultados do método de decomposição e as heurísticas FO01, FO02 e FO03.....	80
Tabela 18. Resultados das heurísticas RF01, RF02, RF03, RF04 e RF05.....	81
Tabela 19. Número de instâncias resolvidas segundo o gap obtido.....	83
Tabela 20. Resultados dos algoritmos propostos segundo o tempo computacional.....	83
Tabela 21. Resultados da escolha de locais candidatos para a instalação de CI.....	84
Tabela 22. Resultados Instâncias: Quantidade descartada menor que a meta.....	86
Tabela 23. Resultados Instâncias: Quantidade descartada igual que a meta.....	88
Tabela 24. Resultados Instâncias: Quantidade descartada maior que a meta.....	90
Tabela 25. Descarte de pneus nos ecopontos por período (instância ilustrativa).....	117
Tabela 26. Fluxos de pneus dos resultados da instância ilustrativa.....	118
Tabela 27. Custos e rendas dos resultados da instância.....	119
Tabela 28. Resultados das diferentes estratégias para a solução do problema MIP inicial.....	123
Tabela 29. Resultados das diferentes estratégias para a solução do problema MIP.....	123
Tabela 30. Anexos: Capacidades dos centros intermediários.....	130
Tabela 31. Anexos: Capacidades dos Veículos de Carga.....	130
Tabela 32. Anexos: Custos de Instalação dos Centros Intermediários.....	130
Tabela 33. Anexos: Custos de Operação nos Centros Intermediários.....	131
Tabela 34. Anexos: Custos de Destinação de pneus.....	131
Tabela 35. Anexos: Preço de venda do aço e dos pneus reutilizáveis.....	131
Tabela 36. Anexos: Metas de destinação de pneus consideradas.....	132
Tabela 37. Anexos: Porcentagem de aço e dos pneus reutilizáveis.....	132
Tabela 38. Anexos: Capacidade de carga dos veículos.....	133
Tabela 39. Anexos: Localização dos ecopontos do estado de São Paulo (Brasil).....	133
Tabela 40. Anexos: Localização das plantas de processamento.....	142
Tabela 41. Anexos: locais candidatos para abertura de centros Intermediários.....	143
Tabela 42. Anexos: Custo de transporte de carga por tonelada.....	144
Tabela 43. Anexos: Quantidade de pneus descartados consideradas.....	144
Tabela 44. Anexos: Fatores de variação para a distribuição dos pneus nos ecopontos.....	145
Tabela 45. Anexos: Porcentagens da venda de pneus no Brasil no ano 2015.....	150

SIGLAS

ABIDIP	Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus
ABR	Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ERP	<i>Extended Producer Responsibility</i> (Responsabilidade Estendida ao Produtor)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LR	Logística Reversa
MILP	Programação Linear Inteiro Mista
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
OICA	Organização Internacional de Construtores de Veículos Automóveis
SINPEC	Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos, delimitação do trabalho e justificativas	15
1.2	Etapas e Classificação da Pesquisa	17
1.3	Organização do trabalho	19
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
2.1	O descarte de pneus usados no Brasil	20
2.2	Legislação sobre pneus inservíveis	22
2.3	Logística reversa de pneus inservíveis no Brasil	24
3	REVISÃO DE LITERATURA	27
3.1	Contextualização Teórica	27
3.2	Modelos de configuração de redes de logística reversa	30
3.2.1	Modelos monopéridos para redes reversas	33
3.2.1.1	Modelos monopéridos monoproduto	33
3.2.1.2	Modelos monopéridos multiprodutos	35
3.2.2	Modelos multipéridos para redes reversas	37
3.2.2.1	Modelos multipéridos monoproduto	38
3.2.2.2	Modelos multipéridos multiprodutos	39
3.2.3	Aplicações dos modelos de logística reversa	40
3.3	Conclusões da revisão de literatura	43
4	ABORDAGEM PROPOSTA PARA O PROBLEMA	45
4.1	Considerações para a formulação matemática	46
4.2	Modelo para decisões estratégico-táticas no planejamento da logística reversa de pneus no Brasil	48
5	MÉTODOS DE SOLUÇÃO	56
5.1	Heurística de decomposição em duas fases	56
5.2	<i>Relax and Fix</i>	58
5.3	<i>Fix and Optimize</i>	59
6	TESTES COMPUTACIONAIS	61
6.1	Descrição das instâncias	61
6.2	Resultados detalhados para instância base (Δ MD5-A)	69
6.3	Comparação com o planejamento sem abertura de C.I. (Rede Atual)	73
6.4	Comparação com abordagens da literatura	75
6.4.1	Abordagem Monopérido	75

6.4.2	Comparação com resultados do modelo de Stark (2015).....	77
6.5	Avaliação das abordagens Heurísticas	78
6.6	Análise dos resultados para diferentes cenários	83
6.6.1	Cenário 1: total de pneus descartados menor que a meta	85
6.6.2	Cenário 2: total de pneus descartados igual a meta	87
6.6.3	Cenário 3: total de pneus descartados maior que a meta	89
6.6.4	Análise da variação de distribuição da quantidade descartada	91
6.7	Testes com variação de parâmetros.....	94
6.7.1	Variação no custo de destinação de pneus	94
6.7.2	Variação no valor da venda de pneus no mercado secundário	96
6.7.3	Variação no custo de transporte de pneus	99
7	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	100
7.1	Verificação dos objetivos e respostas a questões da pesquisa.....	100
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	103
	APÊNDICES.....	114
A	Validação com instância ilustrativa	115
B	Testes preliminares para parametrização do Solver.....	123
C	Resultados detalhados da abordagem monopériodo do modelo proposto	125
D	Resultados detalhados do modelo Stark (2015)	127
	ANEXOS	129
I	Dados reais do Estado do São Paulo	130

1 INTRODUÇÃO

O acúmulo de resíduos sólidos descartados inadequadamente é um problema ambiental que, apesar da existência de políticas e normativas voltadas à redução do impacto gerado, não está completamente resolvido. O aumento da população, o crescimento das indústrias e a falta de cultura de reciclagem são só alguns dos motivos que fazem desta situação um problema ambiental de grande magnitude, que precisa de mecanismos e técnicas que atenuem seu impacto, preservando os recursos naturais e mantendo o equilíbrio com o meio ambiente (JABBOUR et al., 2014).

Atualmente, um dos resíduos sólidos de grande preocupação nos países com alta demanda de veículos são os pneus que chegaram ao final de sua vida útil, chamados “Pneus Inservíveis”. Segundo Forrest (2014), anualmente são geradas mais de 1 bilhão de unidades de pneus inservíveis em todo o planeta, sendo cerca de 3,3 milhões de toneladas provenientes dos USA, cerca de 2,5 milhões de toneladas da Europa, e cerca de 510 mil toneladas do Brasil.

Antes da década de 90, o descarte dos pneus inservíveis era feito de forma incorreta, os pneus eram usualmente descartados em depósitos a céu aberto ou em aterros sanitários sem tratamento, jogados nas ruas e rios, ou até mesmo queimados, com consequências negativas para o meio ambiente, como contaminação do solo, da água e do ar (RESCHNER, 2008; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2010; FLORIANI; FURLANETTO; SEHNEM, 2016). Os pneus se caracterizam por serem polímeros não biodegradáveis e de baixa compressibilidade, o que reduz o tempo de vida dos aterros sanitários. E ainda, sua estrutura e formato permitem o acúmulo de água, fazendo com que os mesmos possam se tornar criadouros de insetos que transmitem doenças, como por exemplo, a dengue (CHANG, 1996; LIN; HUANG; SHERN, 2008).

Após a década de 90, houve um aumento na preocupação com os problemas relacionados à deterioração do meio ambiente e com isso os órgãos governamentais propuseram políticas focadas na solução ou minimização destes problemas. Em relação ao descarte de pneus inservíveis, as políticas ambientais proíbem a utilização de aterros sanitários e outras formas de descarte prejudiciais para o meio ambiente (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2010; FORREST, 2014).

Na prática, podem-se observar três modelos para regular a gestão dos pneus inservíveis: (i) Gestão baseada no mecanismo conhecido como responsabilidade estendida do produtor *EPR (Extended Producer Responsibility)*, que responsabiliza os produtores e importadores de pneus pela adequada destinação dos pneus inservíveis, sendo que os responsáveis podem cumprir suas obrigações diretamente ou por intermédio de organizações especializadas na reciclagem/recuperação; (ii) Gestão baseada em um sistema fiscal, onde os produtores ou vendedores de pneus cobram uma taxa de descarte, somados ao custo de um novo pneu, e transferem este valor para os órgãos públicos, desta forma, a gestão dos pneus inservíveis é responsabilidade de organizações de recuperação/reciclagem financiadas ou contratadas pelo Estado a partir dos fundos obtidos; (iii) Gestão baseada em um sistema de mercado livre, onde se pressupõe que os pneus inservíveis são uma fonte de matérias-primas valiosas, cuja gestão é lucrativa para as empresas envolvidas na recuperação/reciclagem de pneus (SIENKIEWICZ et al, 2012).

No caso do Brasil, que se encontra entre os países com maior demanda e produção de veículos (OICA, 2017), somente na década de 90, depois de meio século do começo da indústria de pneus no país e de terem sido produzidos mais de 29 milhões de unidades de pneus (SINPEC, 2011), apareceram as primeiras políticas relacionadas à minimização do impacto ambiental decorrente dos pneus inservíveis. Desde 1999 tem-se adotado responsabilidade estendida do produtor *EPR* como modelo para regular a gestão dos pneus inservíveis (MILANEZ; BUHRS, 2009), e um sistema de rede de logística reversa tem sido utilizado para abordar o problema da coleta e adequada destinação de pneus inservíveis (LAGARINHOS, 2011).

A logística reversa de pneus inservíveis no Brasil começa quando os pneus são descartados em pontos de coleta chamados ecopontos. Daí são levados para plantas de processamento, onde são realizadas diferentes atividades de reciclagem ou recuperação de valor. Em alguns casos, entre os ecopontos e as plantas de processamento, há centros intermediários, onde são realizadas atividades de triagem e trituração de pneus que diminuem os custos de transporte, uma vez que transportar pneus triturados é mais econômico do que transportar pneus inteiros, e gera receitas para a rede vendendo o aço retirado antes do processo de trituração e os pneus reusáveis separados no processo de triagem.

O planejamento da coleta de pneus nesta rede, é feito apenas mediante a solicitação dos ecopontos quando estes alcançam uma quantidade mínima estabelecida. Não são levados em conta aspectos como a capacidade de estoque dos ecopontos, previsões da quantidade de pneus descartados, e a capacidade e disponibilidade das plantas de processamento e os centros intermediários, que são importantes para a eficiência das operações na rede reversa. Um dos principais desafios da logística reversa de pneus é o planejamento da coleta, uma vez que os custos de transporte de pneus inservíveis podem representar até 67% dos custos totais destes sistemas (SOUZA; D'AGOSTO, 2013). Os altos custos se devem ao formato dos pneus, que prejudica a compactação da carga (LAGARINHOS, 2011), e à grande dispersão geográfica dos pontos de coleta (OLIVEIRA; CASTRO, 2007).

Levando em conta o planejamento utilizado para coleta dos pneus inservíveis e os elevados custos de transporte, nesta dissertação pretende-se abordar o problema do planejamento da logística reversa de pneus no Brasil, considerando como questão central de pesquisa:

- A inclusão de novos centros para triagem, trituração e armazenagem, como uma camada intermediária na rede reversa, pode melhorar o desempenho da rede em termos de custos logísticos?

Outros questionamentos surgem como desdobramentos desta questão central:

- Em quais locais e com qual capacidade os centros intermediários devem ser abertos?
- Qual ecoponto deve enviar material para qual centro? Qual centro deve enviar material para qual destinação? Estas decisões podem variar de um período para outro? Ou seja, quais as implicações em se considerar uma abordagem multiperíodo no planejamento da logística reversa de pneus ao invés de uma abordagem monopерíodo?
- A possibilidade de estocar material nos diferentes pontos da rede impacta o desempenho em termos de custos logísticos?
- A inclusão de decisões de processamento e transporte influenciam as decisões de localização de centros intermediários?
- Quais são os parâmetros que impactam significativamente a configuração da rede física e o planejamento da logística reversa de pneus no Brasil?

A hipótese básica desta pesquisa é que a abertura de instalações de pré-processamento em certos locais estratégicos da rede reversa pode reduzir os custos totais de transporte, por permitir melhor compactação da carga, além de viabilizar a separação e comercialização dos pneus ainda em condição de uso.

1.1 Objetivos, delimitação do trabalho e justificativas

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo de programação linear inteira mista (MILP) que, considerando hipóteses simplificadoras, represente as principais características do problema de planejamento da logística reversa de pneus inservíveis no contexto brasileiro. Ou seja, considerando as imposições regulatórias da PNRS e IBAMA

Os objetivos específicos incluem:

- Incorporar características no modelo de MILP de forma que estes possam apoiar, simultaneamente, decisões estratégicas de localização e dimensionamento de centros intermediários e decisões táticas relacionadas ao transporte de pneus, como o número de viagens necessárias e número de veículos utilizados, e relacionadas ao processamento dos pneus, como a quantidade de pneus a classificar, triturar, estocar, destinar e comercializar em cada um dos períodos do horizonte de planejamento considerado.
- Propor métodos baseados em heurísticas de programação matemática para resolver o problema, considerando as características da estrutura do processo decisório.
- Analisar o desempenho do modelo para apoiar as decisões de planejamento da rede, de forma a obter insights sobre o problema prático, como a compreensão de quais são os parâmetros que mais influenciam o processo de decisão.

As principais delimitações para desenvolvimento desta pesquisa estão relacionadas com o escopo e agentes da rede conforme é detalhado a seguir:

- A pesquisa foca em sistemas de rede de logística reversa de produtos descartados pelos consumidores finais (pós-consumo), não considera a logística reversa de produtos defeituosos ou devolvidos por garantias (pós-venda).

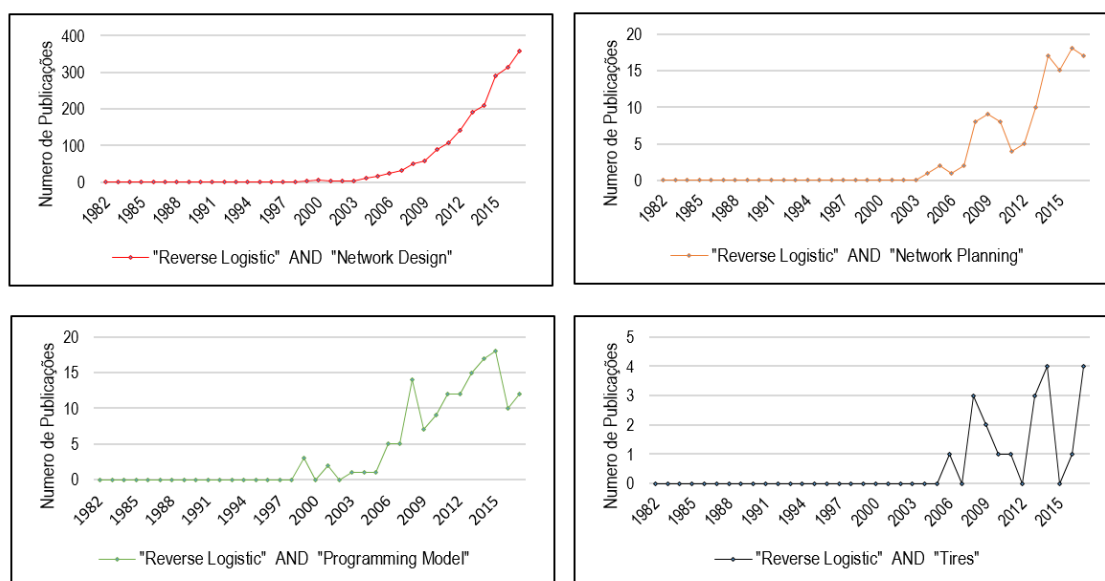
- O planejamento da logística reversa é abordado do ponto de vista dos responsáveis pela rede de coleta em geral, não são considerados interesses particulares de agentes da rede, como por exemplo, plantas de destinação final ou empresas de recauchutagem/ reforma de pneus.
- A pesquisa aborda o planejamento da logística reversa de pneus focando na minimização de custos, não considera em seus objetivos aspectos sociais ou aspectos ambientais, como a emissão de poluentes.
- A pesquisa foca a otimização da rede de logística reversa apenas considerando o trade-off relacionado aos custos de abertura, custos de transporte e receitas provenientes de subprodutos. Não são feitos estudos sobre o retorno de investimentos ou análise de viabilidade econômica para centros intermediários.
- A rede reversa considera apenas três tipos de instalações (ecopontos, centros intermediários e plantas de processamento) e um único tipo de produto.

As justificativas para desenvolvimento desta pesquisa estão baseadas na relevância do problema prático e no potencial da pesquisa em contribuir com a compreensão e mitigação deste problema.

O gerenciamento de resíduos sólidos é um problema que chama a atenção de uma grande parte da sociedade e da comunidade científica. A Figura 1 mostra os resultados relativos a publicações, obtidas no *Scopus*, utilizando respectivamente as palavras-chaves: “*Reverse Logistic and Network Design*”; “*Reverse Logistic and Network Planning*”; “*Reverse Logistic and Programming Model*”; e “*Reverse Logistic and Tire*”.

Os dados mostram que após a década de 90 tem aumentado o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao desenho e planejamento de redes reversa: em relação ao desenho de rede reversa nos 3 anos tem sido publicados mais artigos (962) que os publicados anteriormente (944); no relacionado ao uso de modelos de programação em rede reversa, também observou-se um aumento, passaram de ser publicado 1 artigo anual (2001-2005) a ser publicados cerca de 15 artigos anualmente (2013-2017); e finalmente, em relação ao abordagem de sistemas de rede reversa de pneus, apenas se observam 20 publicações, das quais mais da metade foram publicadas nos últimos 5 anos.

Figura 1. Evolução das publicações relacionadas ao tema desta pesquisa nos últimos anos.



Fonte: Scopus (2018)

Desta forma, do ponto de vista acadêmico, uma justificativa para esta pesquisa é a proposta de um modelo que incorpora decisões de transporte e processamento às decisões de configuração de redes de logística reversa de pneus. Do ponto de aplicação, a pesquisa se justifica pela abordagem de técnicas quantitativas como estratégias de solução para problemas que envolvem a conciliação do processo de desenvolvimento tecnológico com a preservação do meio ambiente.

1.2 Etapas e Classificação da Pesquisa

Este trabalho se baseia no pressuposto de que podem ser formulados modelos matemáticos que representem total ou parcialmente problemas de tomada de decisões de ambientes reais. Assim, a pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa Empírica Normativa Quantitativa (BERTRAND; FRANSOO, 2002), pois estuda o desenvolvimento de ações de melhoria em uma situação real, utilizando modelos de programação matemática.

Esta pesquisa segue as etapas características de Pesquisa Operacional (PO) descritas em Morabito e Pureza (2010), que envolvem a definição do problema de interesse e a coleta

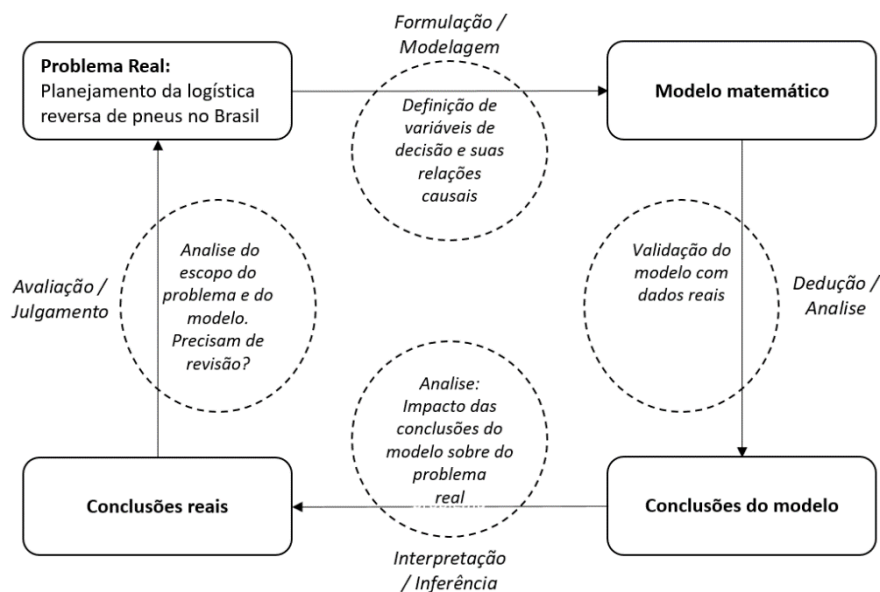
de dados; a formulação de modelos matemáticos para representar o problema; a solução de modelos matemáticos; e finalmente a análise e discussão dos resultados.

A etapa inicial da pesquisa consiste em uma revisão de literatura relacionada aos pneus inservíveis no Brasil, ao problema decorrente de seu descarte inadequado e sobre o sistema de logística reversa utilizado para abordá-lo.

O passo seguinte, envolve a compreensão mais aprofundada do problema estudado, a caracterização do sistema de logística reversa e a coleta dos dados e informações para o problema. Em seguida, um modelo matemático é desenvolvido com o objetivo de representar o problema real com suas especificidades e características mais relevantes. Para resolução computacional do modelo matemático são propostos métodos heurísticos baseados em programação matemática.

Finalmente, o modelo é testado e validado a partir de um conjunto de instâncias geradas a partir de dados reais do setor. Por fim, os resultados dos testes são compilados, analisados e comparados com as informações sobre o estado atual do sistema de rede reversa estudado. A Figura 2, mostra de forma sequencial as etapas desenvolvidas neste trabalho.

Figura 2. Etapas desenvolvidas na pesquisa.



Fonte: Adaptado de Morabito e Pureza (2010)

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 apresenta a contextualização e descrição do problema de planejamento da logística reversa de pneus no Brasil; o Capítulo 3 consiste em uma revisão de literatura sobre conceitos básicos de logística reversa e modelos matemáticos para a configuração de sistemas de rede reversa, em particular, de pneus inservíveis; o Capítulo 4 descreve a abordagem proposta para a representação do sistema de rede logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, e propõe um modelo de programação matemática para representar o problema; o Capítulo 5 descreve diversos métodos heurísticos, propostos para encontrar soluções para o problema em menor tempo computacional; o Capítulo 6 apresenta os estudos computacionais realizados e os resultados obtidos; o Capítulo 7 discute as conclusões finais e perspectivas para trabalhos futuros; e, finalmente, as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação são listadas.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

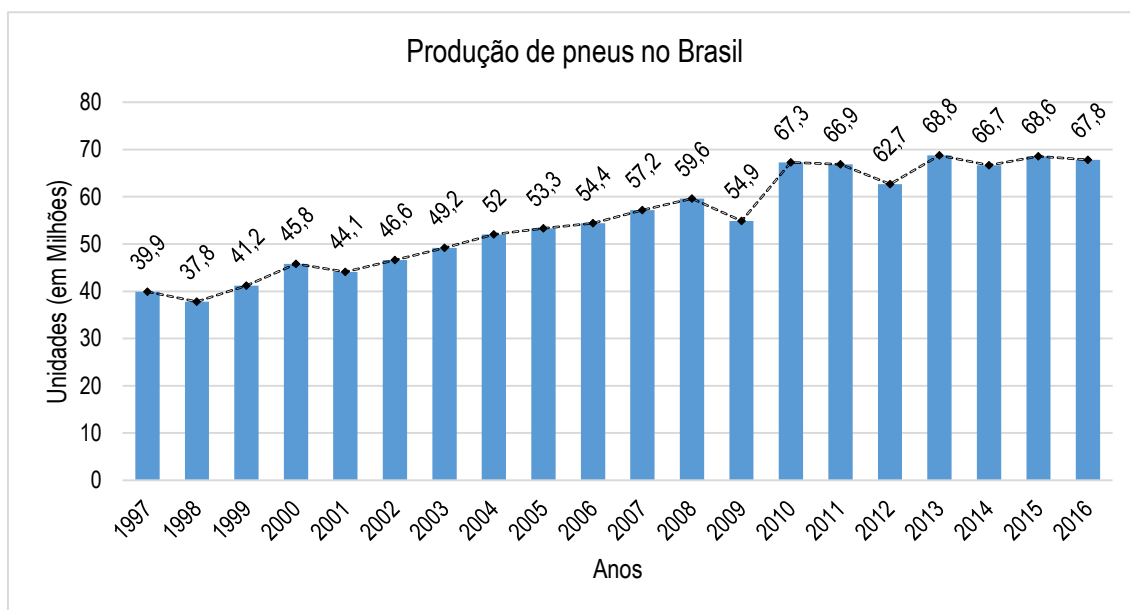
Este capítulo apresenta uma descrição do problema dos pneus inservíveis no Brasil. Inicialmente se aborda o contexto da indústria de pneus, a problemática dos pneus inservíveis, suas possíveis formas de destinação e as leis ambientais que tratam esta problemática. Posteriormente, a rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil é detalhada, com foco na descrição das atividades de planejamento da coleta.

2.1 O descarte de pneus usados no Brasil

O setor de fabricação de pneumáticos representa atualmente cerca de 0,7% do PIB industrial brasileiro, e gera 29,5 mil empregos diretos e 160 mil indiretos. Somente a cadeia de venda para reposição é constituída por uma rede com mais de 4.500 pontos no Brasil e cerca de 40 mil empregados (ANIP, 2015).

No Brasil, a produção de pneus começou em 1936 com instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha (Pneus Brasil) no Rio de Janeiro (ANIP, 2013), durante o primeiro ano foram produzidos mais de 29 mil pneus. Já na década de 80, no Brasil tinham sido produzidos mais de 29 milhões de pneus (SINPEC, 2011). O aumento da produção de pneus no Brasil se evidencia na Figura 3, que mostra a quantidade de pneus produzidos anualmente durante os últimos 20 anos.

Figura 3. Produção de pneus dos últimos 20 anos.



Fonte: ANIP (2015) e ANIP (2016)

Com o aumento da produção dos pneus surgiram problemas ambientais e de saúde pública, relacionados com o descarte inadequado após sua utilização.

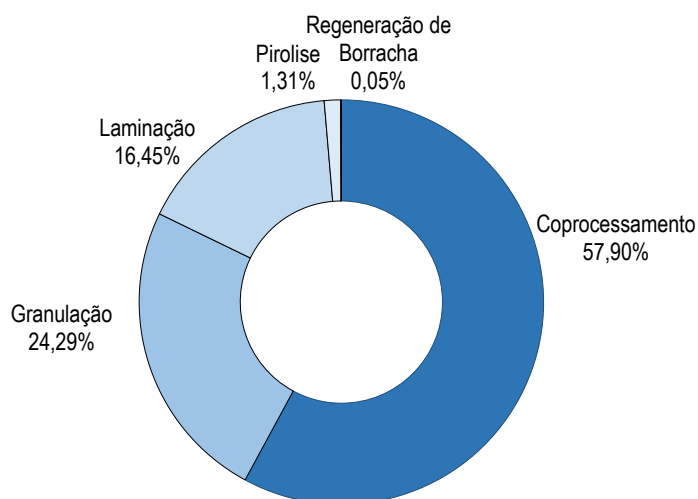
A fim de mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de pneus inservíveis, tem-se desenvolvido diversas formas de reutilização destes resíduos sólidos. Os pneus descartados podem ser classificados em inservíveis e servíveis. Os pneus considerados servíveis podem ser reutilizados.

Para os pneus inservíveis existem alternativas de reciclagem e destinação final, das quais as mais praticadas são o coprocessamento (incineração em fornos de cimento), que consiste no uso de pneus como substituto parcial de combustíveis, a laminação, onde os pneus são cortados em lâminas que servem para a fabricação de outros produtos, e a granulação, que consiste na fabricação de borracha moída, em diferentes tamanhos de grânulos (com separação e aproveitamento do aço), sendo estes grânulos utilizados em múltiplas aplicações (RECICLANIP, 2015; IBAMA, 2016).

De acordo com o relatório do IBAMA (2016), no ano 2015 dos pneus coletados no Brasil, 59,16% foram destinados às atividades de coprocessamento, 23,56% às atividades de granulação e 15,96% às atividades de laminação. A Figura 4, mostra a distribuição das quantidades de destinação dos pneus no Brasil no ano 2015 segundo a tecnologia de

destinação utilizada. Vale a pena ressaltar que, para o desenvolvimento de algumas das tecnologias de destinação de pneus inservíveis é necessário que estes se encontrem triturados ou picados (em pequenos pedaços). Logo, existem empresas dedicadas à trituração de pneus inteiros para o posterior envio destes às empresas de destinação final.

Figura 4. Destinação de Pneus Inservíveis no Brasil no 2015.



Fonte: IBAMA (2016)

2.2 Legislação sobre pneus inservíveis

Apesar da produção e indústria de pneus no Brasil ter começado formalmente na década de 30, e de que a quantidade de pneus fabricados durante as décadas seguintes foi notável (SINPEC, 2011), foi somente nos anos 90 que surgiram as primeiras regulamentações focadas no problema da acumulação de pneus inservíveis.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) são as entidades encarregadas de regulamentar e supervisionar o descarte ambientalmente adequado de pneus inservíveis.

Como resultado de sua gestão apareceram múltiplas medidas entre as quais se destacam a responsabilização dos produtores e importadores de pneus pela coleta e destinação ambientalmente correta de pneus inservíveis, a definição de metas anuais de destinação a

serem cumpridas, e o estabelecimento de uma penalização, pelo não cumprimento das metas estabelecidas, que consiste em uma multa (custo financeiro).

Em 2009, foi publicada a Resolução n° 416/09 do CONAMA (CONAMA, 2009), que pretende organizar e direcionar o adequado tratamento dos pneus inservíveis. As metas de destinação ambientalmente adequadas de pneus inservíveis foram estabelecidas com base em uma relação de 1:1, ou seja, para cada pneu novo disposto no mercado de reposição, os fabricantes e importadores tem a obrigação de dar adequada destinação final a um pneu inservível.

O cálculo da quantidade de pneus inservíveis a serem destinados é feito usando o peso dos pneus e considerando um fator de desgaste de 30% nos pneus inservíveis (perda mássica). Se a meta estabelecida no ano não é atingida, os responsáveis têm que pagar uma multa pelo passivo ambiental gerado naquele ano. A equação (2.1) mostra a forma de cálculo para o mercado de reposição (IBAMA, 2016).

$$MR = [(P + I) - (E + EO)] \quad (2.1)$$

Sendo:

<i>MR</i>	Mercado de Reposição
<i>P</i>	Total de pneus produzidos
<i>I</i>	Total de pneus importados
<i>E</i>	Total de pneus exportados
<i>EO</i>	Total de pneus que equipam veículos novos

A Resolução n° 416/09 do CONAMA também obriga os fabricantes e importadores a declarar anualmente ao IBAMA a quantidade de pneus fabricados, importados, exportados, enviados para montadoras, e a quantidade de pneus inservíveis que tiveram uma destinação adequada. Da mesma forma, as empresas encarregadas a dar uma destinação adequada aos pneus inservíveis devem reportar ao IBAMA a quantidade de pneus inservíveis destinados anualmente.

Os pneus servíveis podem ser reutilizados passando por processos de reforma, como: recapagem, onde um pneu é reformado pela substituição unicamente de sua banda de rodagem; recauchutagem, onde um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos ombros; e remoldagem, onde um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, ombros e toda a superfície de seus flancos. Vale a pena ressaltar,

que a Resolução nº 416/09 estabelece que os pneus usados que são submetidos ao processo de reutilização, não são contabilizados como pneus destinados, uma vez é prolongada sua vida útil e são vendidos novamente em um mercado secundário.

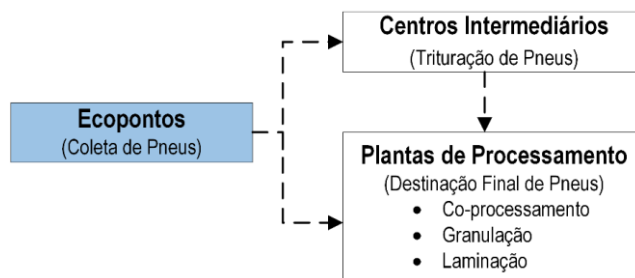
2.3 Logística reversa de pneus inservíveis no Brasil

Os produtores e importadores de pneus utilizam sistemas de logística reversa de pneus independentes. A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) utiliza a entidade REICLANIP para gestão do processo de coleta e destinação de pneus inservíveis, e a Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus (ABIDIP) realiza as atividades de coleta e descarte de pneus inservíveis sem uma associação ou entidade formalizada (ABIDIP, 2017; LAGARINHOS, 2011).

O sistema de logística reversa adotado pelos fabricantes e importadores, baseia-se em grande medida no sistema de gestão existente na Europa, onde se envolvem alguns agentes da cadeia de logística direta de pneus, com o objetivo de conseguir um equilíbrio entre os benefícios obtidos e as responsabilidades adquiridas.

Espalhados por todo o país há pontos disponíveis para receber os pneus descartados pelos consumidores finais. Quando uma quantidade determinada pneus é alcançada nestes pontos, se solicita sua coleta. Os responsáveis recolhem tais pneus, e os transportam a plantas de processamento certificadas por autoridades ambientais, onde se realizam atividades de reciclagem e recuperação de valor. Em alguns casos há centros intermediários onde se trituram os pneus, o que permite reduzir os custos de transporte. A Figura 5, apresenta a rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.

Figura 5. Rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme a Figura 5 e o já mencionado, a rede de logística reversa de pneus no Brasil caracteriza-se por ter três tipos de instalações:

- Ecopontos, onde são levados os pneus descartados, logo depois de serem trocados por pneus novos ou logo que veículos finalizam sua vida útil. Os ecopontos geralmente são empresas revendedoras, borracharias ou locais especiais criados em parceria público-privada. Segundo o IBAMA (2016) em 2015 foram cadastrados 1.615 ecopontos no Brasil, e estes, ao serem administrados por diferentes entidades, caracterizam-se por ter diferentes dimensões e capacidades.
- As plantas de processamento, onde são realizadas atividades de reciclagem e recuperação de valor. Como foi referido na seção 2.1, as formas de destinação mais praticadas no Brasil são o coprocessamento, a laminação (apenas para pneus inteiros), a granulação e pirólise. Segundo IBAMA (2016), há 94 plantas de processamento no Brasil, sendo 20 no Estado de São Paulo.
- Os centros intermediários, onde são realizadas atividades de trituração de pneus. A trituração é um processo onde se fragmenta e diminui o volume dos pneus, o que permite reduzir e economizar nos custos de transporte, adicionalmente, este processo permite retirar uma fração de aço dos pneus para posteriormente vendê-la (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

Não existe um processo formalizado de triagem de pneus nas instalações da rede, o que leva à possibilidade de que uma quantidade de pneus ainda em condições de uso seja enviada a destinação final, e por conseguinte, se contribuía ao não aproveitamento dos pneus e no esgotamento dos recursos naturais.

Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ABR, 2013) dos pneus inservíveis coletados nos ecopontos, aproximadamente 70% são realmente pneus inservíveis, 20% podem ser reformados para continuar em uso e 10% podem ser reutilizados, sem qualquer processamento. Os pneus reformados e reutilizáveis podem ser comercializados em um mercado secundário, aumentando o tempo de vida útil do produto e gerando receitas adicionais na rede.

Esta rede enfrenta vários desafios logísticos no planejamento da coleta e do transporte de pneus, uma vez que o formato dos pneus prejudica a compactação da carga no transporte

(LAGARINHOS, 2011) e há uma grande dispersão geográfica dos ecopontos (OLIVEIRA; CASTRO, 2007).

A rede de logística reversa de pneus no Brasil é o resultado da reação dos produtores e importadores diante da imposição da obrigação da coleta e destinação. Não existe um planejamento que considere a logística reversa de forma integrada e coordenada, considerando as diferentes alternativas de destinação final com suas respectivas capacidades e especificidades, além de avaliar a estrutura da rede e o potencial de novas instalações para melhorar o desempenho da rede em termos de custos logísticos.

Tanto que uma oportunidade de negócio na logística reversa de pneus é a abertura em certos locais estratégicos das chamadas ‘usinas de reciclagem’, onde se realizem as atividades de estocagem, triagem e trituração de pneus que podem trazer benefícios econômicos e ambientais à rede (SEBRAE, 2017).

Um modelo de programação matemática que considera as informações críticas para o planejamento é uma boa ferramenta para apoiar o processo decisório e permitir a avaliação das atividades em uma perspectiva de rede logística. Muitos trabalhos da literatura propõem modelos de otimização para representar as decisões de configuração de redes de logística reversa de resíduos sólidos (DEHGHANIAN; MANSOUR, 2009; SASIKUMAR; KANNAN; HAQ, 2010; CHANINTRAKUL et al. 2009; MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009).

Considerando o problema do descarte de pneus inservíveis no Brasil, as políticas e leis emitidas pelas entidades governamentais para enfrentar tal problema, e a utilização de sistemas de logística reversa como ferramenta para apoiar a coleta e descarte ambientalmente adequado dos pneus inservíveis, na próxima seção, é apresentada uma revisão da literatura sobre modelos de programação matemática utilizados para abordar problemas de configuração de sistemas de rede de logística reversa para diversos tipos de resíduos sólidos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma fundamentação teórica sobre configuração de sistemas de logística reversa, incluindo a definição de conceitos básicos para a compreensão do problema; e uma revisão da literatura de modelos matemáticos que abordam o problema de planejamento da logística reversa, particularmente os que consideram a decisões de localização de instalações a serem abertas e fluxo de produtos.

3.1 Contextualização Teórica

A logística reversa é conhecida como o processo de planejamento, implementação, e controle da eficiência, custo efetivo do fluxo de matérias-primas, estoques de processo, produtos acabados, e respectivas informações do ponto de consumo até o ponto de origem com o objetivo de recapturar valor ou adequar o seu destino (ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 1999).

Muitas são as razões que motivam e impulsionam as empresas, pesquisadores e grande parte da comunidade mundial a focar seus interesses na logística reversa (ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 1999), no entanto, a maioria baseia-se em três aspectos fundamentais: preocupação ambiental, diferenciação por serviço e redução de custos (DE BRITO; DEKKER, 2004; BARKER; ZABINSKY, 2008; LAMBERT; RIOPEL; ABDUL-KADER, 2011).

De acordo com Leite (2003), a logística reversa pode ser classificada em logística reversa pós-consumo e logística reversa pós-venda. A logística reversa de pós-venda se refere ao gerenciamento do fluxo físico e de informações logísticas dos bens que após a venda retornam ao ciclo produtivo, devido a defeitos, erros de processamento, entre outros.

A logística reversa pós-consumo se refere ao gerenciamento do fluxo de produtos descartados após a finalização de sua vida útil, considerando o transporte destes a locais de destinação final ou a locais especialistas no prolongamento da vida útil.

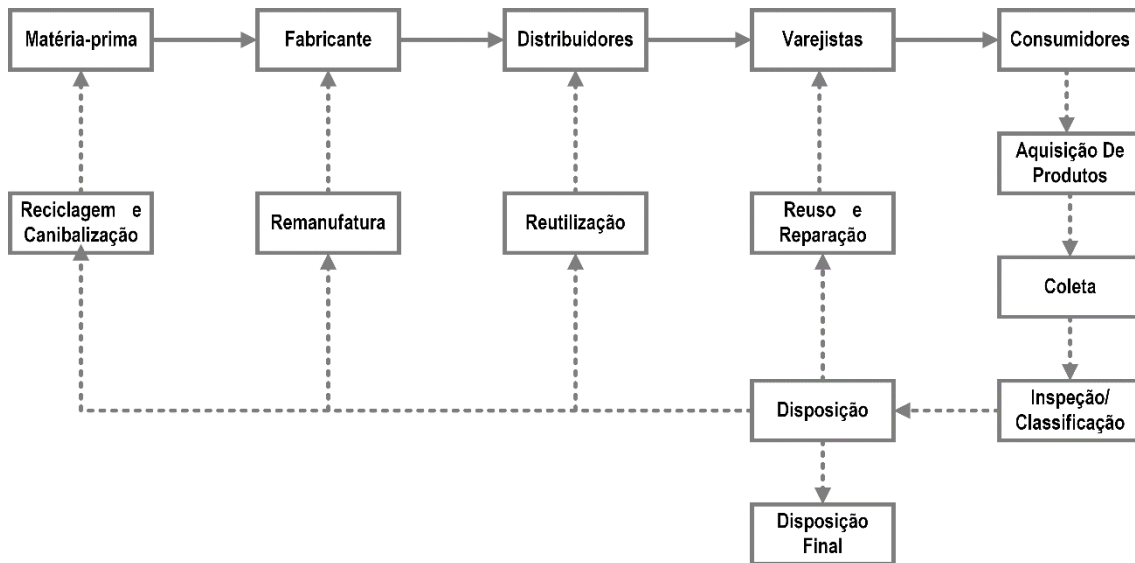
No caso dos pneus inservíveis no Brasil, a motivação para a LR decorre da preocupação das entidades governamentais com a preservação do meio ambiente. Antes das primeiras políticas e normativas referentes à coleta e descarte adequado de pneus, não tinham sido observadas iniciativas relativas à utilização de sistemas de logística reversa (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2010; LAGARINHOS; TENÓRIO, 2013).

Segundo Aksen, Aras e Karaarslan (2009) os aspectos legais são o principal motivador de sistemas de logística reversa no geral, com a ajuda do estabelecimento de responsabilidade estendida para o produtor. No entanto, segundo Lambert, Riopel e Abdul-Kader (2011) sempre que o produto possa ter valor recuperado, a motivação é econômica.

O sistema de rede de logística reversa de pneus inservíveis considerado neste trabalho faz referência à logística reversa pós-consumo, os pneus deixados pelos consumidores finais nos pontos de coleta são descartados, ou seja, não foram devolvidos por defeito algum ou por garantia.

De acordo com Agrawal, Singh e Murtaza (2015) em um sistema de rede reversa podem-se encontrar processos chaves como aquisição, coleta, inspeção/classificação e disposição. A Figura 6 mostra a estrutura geral dos sistemas de rede de logística reversa (pós-consumo). O fluxo de linha contínua, que começa na matéria prima e finaliza no consumidor representa a cadeia de logística direta, e o fluxo de linha tracejada representa a cadeia de logística reversa.

Figura 6. Estrutura geral dos sistemas de rede de logística reversa.



Fonte: Adaptado de Saavedra et al. (2013) e Agrawal, Singh e Murtaza (2015)

O processo de aquisição representa a entrada de produtos na rede reversa, usualmente o retorno destes produtos é incerto em termos de tempo, quantidade e qualidade (FLEISCHMANN et al. 2000). Depois da aquisição de produtos, segue a coleta, inspeção e classificação de resíduos.

No que se refere à coleta, Kumar e Putnam (2008) discutem três métodos: diretamente dos clientes, por meio de varejistas ou de uma logística terceirizada. As possíveis razões do descarte ou retorno de produtos são muitas, portanto, é necessária uma inspeção e avaliação dos mesmos para verificar seu estado e classificá-los (ROGERS; TIBBEN-LEMBKE, 1999). Em relação a disposição dos produtos coletados, existem diversas formas de destinação, como por exemplo, reuso, reparo, remodelagem, reciclagem, canibalização e remanufatura (SAAVEDRA et al., 2013).

Todas as formas de destinação final referidas por Saavedra et al. (2013) estão presentes no sistema de rede reversa de pneus inservíveis no Brasil, no entanto, somente as atividades de canibalização e reciclagem, que focam na recuperação de partes dos pneus inservíveis para sua reutilização na fabricação de novos produtos, são consideradas como destinação final (destinação ambientalmente adequada), as atividades de reuso, reparo, remodelagem e remanufatura são atividades de prolongamento de ciclo de vida dos produtos.

Uma rede de logística reversa é formada por agentes, como por exemplo fábricas, depósitos, centros de armazenagem, triagem e pré-processamento, entre outros, usualmente representados por nós, e entre os quais pode ou não existir fluxo de materiais.

Entre as características mais representativas das redes reversas se encontram: a centralização, referente ao número de agentes ou instalações que desenvolvem atividades similares; o número de níveis, referente ao número de agentes presentes em um fluxo de materiais contínuo ou sequencial; o grau de cooperação, referente aos responsáveis do gerenciamento da rede, e o tipo de estrutura, referente à relação entre os fluxos de entrada e saída da rede (FLEISCHMANN et al., 2000; BARKER; ZABINSKY, 2008).

Nos problemas de configuração dos sistemas de rede de logística reversa geralmente se pretende determinar a localização dos agentes a serem abertos nos diferentes níveis da rede e/ou o fluxo de materiais entre tais agentes, visando otimizar algum critério como a renda, custos ou impacto ambiental (FLEISCHMANN et al., 2000).

A abordagem deste tipo de problema está muito relacionada com as considerações feitas nas características da rede e seus elementos. Tais considerações estão relacionadas ao conhecimento ou não da quantidade e qualidade de materiais deixados nos pontos de descarte, às capacidades de armazenamento e processamento dos agentes da rede, às particularidades do transporte de materiais entre agentes, etc.

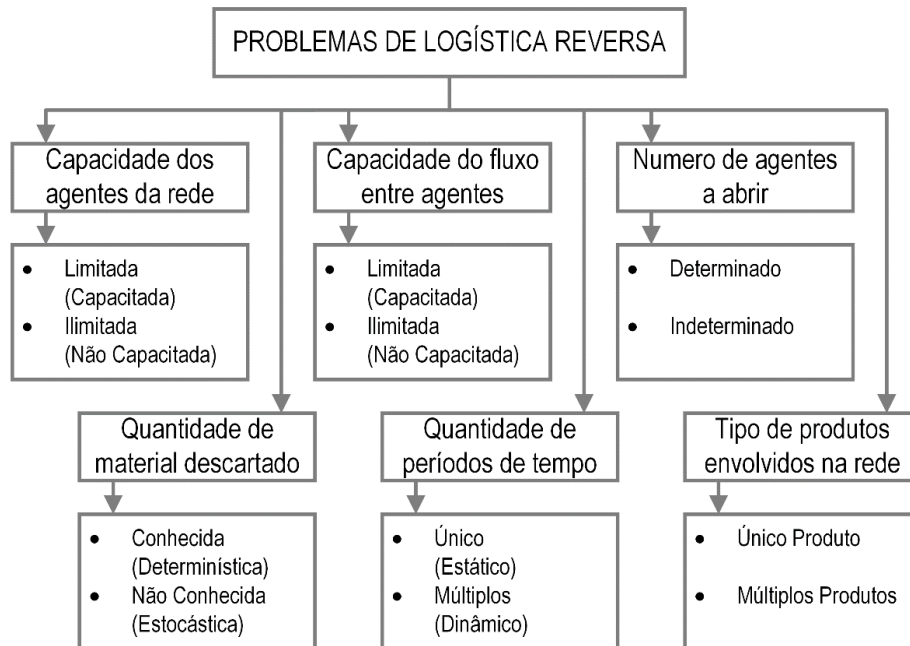
Pode-se dizer com base nos estudos de Lagarinhos (2011) e Stark (2015), nos relatórios IBAMA (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016), e informações nas páginas da RECICLANIP (2015) e ANIP (2015), que o sistema de rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, caracteriza-se por não ser centralizado, ter poucos níveis de operação, ser independente ou manter pouca ligação com outras redes, e ter fluxos de saída e entrada independentes (estrutura aberta).

3.2 Modelos de configuração de redes de logística reversa

Diversas considerações são levadas em conta na modelagem dos sistemas de rede de logística reversa. Sheriff, Gunasekaran e Nachiappan (2012) classificam e descrevem as características de cada uma destas considerações, dentre as quais se destacam a capacidade e a quantidade de instalações, a quantidade e variedade dos produtos envolvidos na rede,

e o número de períodos de tempos estabelecidos para o planejamento. A Figura 7, mostra algumas das classificações dos problemas de logística reversa segundo as características da rede.

Figura 7. Classificação dos problemas de rede reversa segundo as características da rede.



Fonte: Adaptado de Sheriff, Gunasekaran e Nachiappan (2012)

Dado que este estudo está focado no apoio às decisões presentes na rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, foi realizada uma revisão de literatura sobre sistemas de rede reversa com características similares às observadas neste sistema.

Assim, foram estudados principalmente trabalhos de configuração de sistemas de redes de logística reversa com considerações de abertura de instalações com capacidades limitadas (capacitadas), estrutura aberta (independência entre os fluxos de entrada e saída da rede), quantidades de materiais descartados conhecida, um único tipo de produto e múltiplos períodos de tempo (multiperíodos).

Delimitou-se a busca a pesquisas que utilizam modelos de programação matemática como ferramenta de apoio nas decisões de configuração das redes reversas, especificamente, documentos publicados em revistas das bases de dados *Web of Science* e *Scopus* nas áreas de pesquisa *Engineering* e *Operation; Research Management*.

Em uma primeira busca foram utilizados os termos: “Reverse logistics” e “Tire”, e encontraram-se 18 artigos. Com uma segunda busca, utilizando os termos: “Reverse logistics”, “Programming Model”, “Network Design” e “Facility Location”, se encontraram 22 artigos. E finalmente, em uma terceira busca foram utilizados os termos: “Reverse logistics”, “Programming Model” e “Network Design” e se encontraram 66 artigos.

Após uma leitura dos artigos inicialmente encontrados, alguns foram descartados por não estarem relacionados ao escopo desta revisão de literatura. Da primeira combinação de palavras chaves foi selecionado um artigo, da segunda combinação foram selecionados 3 artigos, e finalmente, da terceira combinação foram selecionados 15 artigos.

Adicionalmente, foi feita uma pesquisa nas referências dos artigos selecionados, a fim de encontrar novos artigos relacionados ao foco desta revisão de literatura, o que levou a um total de 22 artigos selecionados. A Tabela 1 resume o processo de busca de artigos da revisão de literatura.

Tabela 1. Busca de artigos segundo as palavras chaves.

Palavras Chaves	Artigos Encontrados nas bases de dados	Artigos selecionados após leitura	Artigos após a combinação dos resultados das palavras chaves	Artigos finais após busca nas referências dos artigos selecionados
1. Reverse logistics 2. Tire	18	1	16	22
1. Reverse logistics 2. Programming Model 3. Network Design 1. Facility Location	22	3		
2. Reverse logistics 3. Programming Model 4. Network Design	66	15		

A apresentação dos resultados desta revisão da literatura foi dividida com base na quantidade de períodos de tempo considerados para os modelos matemáticos. Primeiro são apresentados os estudos de modelos nos quais as decisões são definidas para um único período de tempo (monoperíodos), e posteriormente, são apresentados estudos de modelos que tem decisões definidas para múltiplos períodos de tempo (multiperíodos).

A principal diferença entre as abordagens monoperíodo e multiperíodos, observa-se nos parâmetros e nas decisões destes. Nos problemas monoperíodos se consideram as informações dos parâmetros de custos, rendas, capacidades, entre outros, estáticos para

todo o horizonte de tempo considerado, e estas são agregadas em único período de tempo. Por outro lado, nos problemas multiperíodo, o horizonte de planejamento é dividido em vários períodos de tempo, e são estabelecidas algumas decisões para os parâmetros em cada um destes períodos.

3.2.1 Modelos monopéridos para redes reversas

Na literatura dos estudos de problemas de configuração de rede de logística reversa predominam os modelos matemáticos que consideram decisões definidas para um único período de tempo. Neste tipo de abordagem, as informações utilizadas caracterizam-se por serem altamente agregadas e as variáveis de decisão utilizadas estão relacionadas à localização de instalações a serem abertas e fluxo de material.

3.2.1.1 Modelos monopéridos monoproduto

A maioria dos trabalhos selecionados que apresentam modelos matemáticos monopérido se caracterizam por considerar a coleta e descarte de um único tipo de produto.

Barros, Dekker e Scholten (1998) estudam um sistema de rede reversa focado na reciclagem da areia (resíduo de construção civil) onde propõem um modelo matemático que visa minimizar os custos da rede apoiando as decisões de instalação de depósitos de triagem e de plantas de tratamento e as decisões de fluxo da areia entre os agentes da rede. As atividades de triagem e tratamento realizadas se baseiam no estado da areia, limpa, medianamente poluída e totalmente poluída. Adicionalmente, o modelo considera limitada a capacidade das instalações e estabelece que toda a areia descartada deve ser coletada.

Krikke, Kooi e Schuur (1999) também abordam um sistema de rede reversa de um único produto, no entanto, na indústria automotiva, os autores propõem um modelo matemático que visa minimizar os custos da rede apoiando as decisões de abertura de diferentes tipos de instalações e as decisões do fluxo entre estas. Ao contrário do modelo de Barros, Dekker e Scholten (1998) este modelo não considera limitações nas capacidades das instalações abertas.

Pishvae, Kianfar e Karimi (2010), por sua vez, propõem um modelo matemático para minimizar os custos de um sistema de rede reversa apoiando as decisões de instalação de um único tipo de centro intermediário de coleta e inspeção e as decisões de fluxo de material. Os autores não consideram custos de operação nos centros instalados e estabelecem que todos os produtos descartados têm que ser coletados.

No trabalho de Dehghanian e Mansour (2009) é estudado um sistema de rede reversa de pneus inservíveis. Os autores propõem um modelo multiobjetivo que visa maximizar a renda do sistema e o benefício social, e minimizar o impacto ambiental, simultaneamente. No modelo se considera a instalação de diferentes tipos de plantas dependendo dos processos de tratamento de fim de vida dos pneus. Este estudo se baseia no sistema de rede reversa de pneus inservíveis no Irã, e diferentemente do sistema do Brasil, não considera a existência de centros de trituração, atividades de triagem de pneus nem a comercialização de pneus servíveis. Neste estudo pretende-se determinar a localização, tipo e o tamanho de plantas de destinação de pneus a instalar, e o fluxo de pneus entre os pontos de coleta e as plantas. Vale a pena ressaltar que o modelo considera que as plantas instaladas devem ser utilizadas em sua máxima capacidade.

Os trabalhos de Kara e Onut (2010) abordam sistemas de rede reversa de reciclagem de papel. Os autores pretendem maximizar a renda por meio de um modelo de programação matemática que apoie as decisões de instalação de centros de coleta e plantas de reciclagem de papel, fluxo entre os agentes da rede, quantidade de produtos a classificar (recuperáveis e não recuperáveis) e quantidade de produtos não coletados nos clientes. No modelo é limitada a quantidade de agentes a instalar, existe a possibilidade de instalar plantas de reciclagem de dois tipos, com e sem capacidade de triagem de produtos. Nos centros de coleta são feitas duas atividades de triagem e é considerada uma porcentagem mínima de coleta de produtos para os clientes.

Suyabatmaz, Altekin e Şahin (2014), por sua vez, abordam o sistema de logística reversa do ponto de vista de uma empresa terceirizada provedora de serviços de logística. Dado os centros de coleta e plantas de recuperação tem-se que encontrar a quantidade e locação de centros de avaliação de produtos, visando minimizar os custos totais do sistema. No modelo proposto é considerada uma penalização pela não coleta de produtos dos centros de coleta e é limitada a capacidade de operação dos centros de avaliação. Finalmente, o modelo é testado em dois casos: remanufatura de copiadoras e reciclagem de papel.

O artigo de Kannan et al. (2012) aborda o setor do plástico, os autores buscam minimizar os custos e a pegada de carbono de um sistema de rede reversa por meio de um modelo matemático que apoia as decisões de instalação de centros de inspeção e o fluxo de materiais. A quantidade e a capacidade dos centros a instalar são limitadas e todo o material descartado tem que ser coletado. Os autores validam o modelo com um estudo de caso em uma empresa da Índia.

Yu e Solvang (2016a), também visam minimizar os custos e a pegada de carbono de um sistema de logística reversa, no entanto, o modelo matemático que propõem apoia as decisões de instalação de cinco tipos diferentes de instalações, centros de coleta, plantas de reparação, centros de reciclagem, incineradoras e aterros, decisões de fluxo de materiais entre os agentes, e finalmente, decisões de venda de calor obtido das incineradoras. No modelo são estabelecidos requisitos mínimos e máximos de utilização para cada uma das instalações abertas; um limite do número de instalações a serem abertas de cada tipo; toda a quantidade de produto descartado tem que ser coletada.

Finalmente, o trabalho de Zandieh e Chensebli (2016) propõem um modelo que visa minimizar os custos do sistema apoiando as decisões de instalação de três tipos de instalações, centros de coleta, plantas de recuperação e centros disposição, e as decisões de fluxo de materiais. No modelo não são considerados os custos de operação nas instalações abertas, apenas os custos de abertura, e a capacidade dos agentes abertos é limitada.

3.2.1.2 Modelos monoperíodos multiprodutos

A quantidade de pesquisas relacionadas a sistemas de rede reversa de vários produtos é menor em comparação às pesquisas de sistemas de rede reversa de um único tipo de produto, no entanto, tem se observado um crescente interesse por este tipo de problema, principalmente em situações relacionadas com os resíduos eletrônicos.

O estudo de Jayaraman, Patterson e Rolland (2003) apresenta um modelo de programação matemática monoperíodo que visa minimizar os custos de um sistema de rede reversa de múltiplos tipos de produtos apoiando as decisões de abertura de dois tipos de instalações, centros de coleta e centros de recuperação, e decisões de fluxo entre os agentes da rede.

No modelo é permitido o transporte de produtos diretamente do seu local de descarte até os centros de recuperação. É estabelecida uma quantidade mínima e máxima de agentes a instalar, e todos os materiais descartados devem ser coletados.

Fonseca et al. (2010), por sua vez, abordam uma rede reversa de resíduos sólidos urbanos, visando minimizar os custos da rede e o impacto ambiental, simultaneamente, em um sistema onde não se tem conhecimento exato da quantidade de produtos descartados e dos custos de seu transporte. O modelo proposto considera as decisões de instalação de centros de coleta, plantas de recuperação e aterros, decisões de fluxo de materiais entre agentes da rede, e decisões referentes à quantidade de produtos recuperados e descartados. Neste estudo os centros de coleta são classificados dependendo do tipo de produto a receber, e as plantas de recuperação são classificadas segundo o tipo de produto e a tecnologia de recuperação utilizada.

Os artigos de Dat et al. (2012), Ayvaz e Bolat (2014), Ayvaz, Bolat e Aydin (2015), Kilic, Cebeci e Ayhan (2015) e Yu e Solvang (2016b), abordam a configuração de sistemas de rede reversa de monopérios de vários tipos de resíduos eletrônicos.

Dat et al. (2012), propõem um modelo matemático que visa minimizar os custos da rede reversa apoiando as decisões de abertura de instalações de desmontagem, reciclagem e reparo, e decisões de fluxo de materiais entre os agentes da rede. No modelo é considerada a recuperação e comercialização de produtos em um mercado secundário onde todos os produtos devem ser coletados, e além disso, são levados em conta os custos de operação em cada uma das instalações abertas.

Kilic, Cebeci e Ayhan (2015), motivados pela problemática do descarte de resíduos eletrônicos na Turquia, propõem um modelo matemático para minimizar os custos do sistema de rede reversa apoiando as decisões de abertura de centros de armazenagem e plantas de reciclagem, decisões de fluxo de material entre agentes da rede, e, finalmente, decisões relacionadas com a quantidade de produto a estocar nos centros de armazenamento, e subprodutos úteis e perigosos resultantes das plantas de reciclagem. No modelo se estabelecem capacidades máximas e mínimas para a utilização dos agentes e todos os produtos descartados tem que ser coletados, além disso, são considerados custos de operação e de estoque.

O modelo proposto por Ayvaz e Bolat (2014) visa minimizar os custos do sistema de rede reversa apoiando as decisões de abertura de três tipos de instalações: centros de coleta, centros de inspeção e centros de reciclagem; e as decisões de fluxo de material. Os autores consideram para este modelo tanto os custos fixos das instalações como os custos de operação.

Ayvaz, Bolat e Aydin (2015) abordam o mesmo sistema de Ayvaz e Bolat (2014), no entanto, neste trabalho pretende-se maximizar a renda total do sistema e existe a possibilidade de não coletar todos produtos descartados.

Finalmente, Yu e Solvang (2016b), propõem um modelo que visa minimizar os custos do sistema e a pegada de carbono apoiando as decisões de instalação de centros de coleta e centros de reciclagem, decisões de fluxo de materiais entre os agentes da rede, quantidade de produtos processados nos agentes da rede e vendidos em um mercado secundário, e finalmente, decisões relacionadas com emissões de carbono. Os autores determinam a taxa de emissão de carbono pelo tamanho da instalação e tecnologia adotada no tratamento e transporte dos produtos.

3.2.2 Modelos multiperíodos para redes reversas

Os problemas de configuração de rede de logística reversa multiperíodo, consideram a mudança de alguns parâmetros ao longo do tempo de forma previsível. Nestas situações, o horizonte de planejamento é dividido em vários períodos de tempo e o objetivo é conseguir uma configuração de instalações e fluxo de produtos que se adapte o melhor possível às mudanças e variações dos parâmetros.

Neste tipo de abordagem, além de encontrar variáveis de decisão correspondentes a diferentes períodos de tempo, é muito frequente encontrar modelos que considerem decisões relacionadas com o estoque de produtos entre períodos (STARK, 2015; ALUMUR et al., 2012) e a mudança nas capacidades das instalações (ALUMUR et al. 2012; ARAS et al. 2015).

3.2.2.1 Modelos multiperíodos monoproduto

No caso de estudos que consideram a modelagem multiperíodo de sistemas de rede reversa de um único tipo de produto, foram encontrados dois trabalhos focados na coleta e destinação de pneus inservíveis.

O artigo de Sasikumar, Kannan e Haq (2010) aborda o sistema de logística reversa de pneus inservíveis na Índia. Os custos e rendas incorridos nos processos da rede são os mesmos para todo o horizonte de planejamento, e o único parâmetro que varia para cada período de tempo é a quantidade de pneus descartados. Os autores buscam maximizar a renda do sistema propondo um modelo matemático que apoie as decisões de abertura de centros de coleta e recuperação, e o fluxo de materiais entre os agentes da rede. O modelo estabelece uma quantidade mínima de instalações a serem abertas, uma distância máxima entre os clientes (locais de origem dos pneus descartados) e os centros de coleta. Além disso, estabelece que um cliente somente deve ser atendido por um centro de coleta em cada período de tempo. Apesar de ser uma abordagem multiperíodo, os autores não consideram decisões de estoque no modelo.

O trabalho de Stark (2015) aborda a rede de logística reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo (Brasil), considerando que a quantidade de pneus descartados em cada ponto de descarte varia a cada período de tempo. O autor propõe um modelo matemático para apoiar as decisões de instalações de centros de armazenagem e plantas de trituração, decisões de fluxos de pneus entre os agentes da rede, decisões da quantidade de pneus a classificar, vender como servíveis em um mercado secundário, estocar, triturar, e finalmente, destinar.

Diferente do trabalho de Sasikumar, Kannan e Haq (2010), Stark (2015) não considera uma distância máxima entre pontos de descarte e as instalações a serem abertas, os pontos de coleta podem ser atendidos por várias das instalações abertas. Adicionalmente, no estudo de Stark (2015) é estabelecida uma meta de descarte para cada período de tempo e uma penalização pelo não cumprimento da mesma, podendo ocorrer fluxo direto de pneus a partir de qualquer um dos agentes da rede para as empresas de destinação final. O problema é otimizado utilizando dois critérios, minimizando os custos totais da rede e minimizando a pegada de carbono.

3.2.2.2 Modelos multiperíodos multiprodutos

Finalmente, são apresentados os estudos que consideram a modelagem multiperíodo de sistemas de rede reversa de múltiplos produtos.

Alumur et al. (2012) apresentam um modelo matemático multiperíodo que visa maximizar o lucro de um sistema de logística reversa de múltiplos produtos apoiando as decisões de instalação de centros de inspeção e de plantas de remanufatura, decisões de alocação de módulos de capacidade de processamento nos agentes instalados, e decisões de quantidade de produtos a estocar e processar. Todas as decisões são estabelecidas para cada período de tempo, o que torna o modelo flexível, já que se permite fazer ajustes futuros na configuração do sistema, como mudanças graduais na estrutura da rede e nas capacidades das instalações. Os autores avaliam o modelo em um estudo de caso de um sistema reverso de máquinas de lavar e secar na Alemanha.

O estudo de Aras et al. (2015) também aborda a problemática decorrente dos resíduos elétricos e eletrônicos. Os autores propõem um modelo matemático que visa minimizar os custos apoiando as decisões de instalação de centros de reciclagem, decisões de fluxo de material e decisões de quantidade de veículos a utilizar, para cada período de tempo. Este estudo é o único encontrado nesta revisão de literatura que considera decisões de quantidade de veículos de carga a utilizar para o transporte de material entre os agentes da rede. Neste caso, os veículos têm a mesma capacidade estabelecida em paletes, sendo que cada um pode transportar produtos de um único tipo. De forma similar ao estudo de Alumur et al. (2012), este modelo permite mudar o tamanho das instalações abertas em cada período de tempo. O modelo é testado utilizando informação de resíduos elétricos e eletrônicos de 15 cidades da Turquia.

Ene e Öztürk (2015) e Demirel, Demirel e Gökçen (2016), por sua vez, abordam a problemática da reciclagem das partes de veículos ao final de sua vida útil. No estudo de Ene e Öztürk (2015), os autores propõem um modelo matemático que maximiza a renda do sistema apoiando as decisões de abertura de centros de coleta, plantas de tratamento e centros de desmontagem, e decisões de fluxo de produtos. O modelo considera que a informação de descarte de produtos e de custos de operação nas plantas de tratamento e centros de desmontagem muda a cada período de tempo. A diferença em relação aos trabalhos de Alumur et al. (2012) e Aras et al. (2015), é que as decisões de abertura de

instalações são estabelecidas para todo o horizonte de planejamento e somente é considerado um único tamanho para estas instalações.

No estudo de Demirel, Demirel e Gökçen (2016), os autores propõem um modelo matemático que minimiza os custos totais de um sistema de rede reversa, apoiando as decisões de instalação de centros de trituração e plantas de desmontagem, e as decisões de fluxo de material entre agentes. Vale a pena ressaltar que não são consideradas decisões de estoques entre períodos como nos trabalhos de Aras et al. (2015) e Ene e Öztürk (2015).

Neste estudo, todas as informações relacionadas aos custos de operação e de transporte e à quantidade de material descartado muda em cada período de tempo, desta forma, todas as decisões do modelo também estão estabelecidas para cada período. O modelo é utilizado em um estudo de caso com dados de uma cidade na Turquia, analisando diversos cenários gerados com base na evolução média a longo prazo que podem ter o número de resíduos de partes de veículos retornados.

3.2.3 Aplicações dos modelos de logística reversa

Em relação ao interesse da comunidade científica pela configuração de redes de logística reversa em situações reais, nota-se a existência de uma tendência para o desenvolvimento de modelos que forneçam apoio a problemas práticos em todo o mundo, são poucos os trabalhos de enfoque teórico.

Assim, os sistemas de logística reversa focados no descarte de resíduos elétricos e eletrônicos foram os que mais impulsionaram o desenvolvimento das pesquisas relacionadas nesta revisão de literatura (DAT et al., 2012; AYVAZ; BOLAT, 2014; ARAS et al., 2015; AYVAZ; BOLAT; AYDIN, 2015; KILIC; CEBECI; AYHAN, 2015; YU; SOLVANG, 2016).

Outras situações reais que motivaram a realização de vários dos estudos apresentados nesta revisão foram o descarte de pneus inservíveis (DEHGHANIAN; MANSOUR, 2009; SASIKUMAR; KANNAN; HAQ, 2010; STARK, 2015), e a indústria automotiva (KRIKKE, KOOI; SCHUUR, 1999; ENE; ÖZTÜRK, 2015).

Os sistemas reais de logística reversa abordados nos trabalhos anteriormente mencionados têm sido motivados em sua maioria por aspectos legais decorrentes da preocupação dos governos com o cuidado do meio ambiente.

Nos sistemas abordados por Krikke, Kooi e Schuur (1999), Aras et al. (2015), Stark (2015) e Yu e Solvang (2016) se encontram questões legais como a responsabilidade estendida do produtor. Em outras pesquisas também existe uma responsabilidade de coleta e reciclagem sobre produtores, no entanto, os pesquisadores não aprofundam muito nestas particularidades (DAT et al., 2012).

A Tabela 2 apresenta uma síntese das características mais representativas dos estudos considerados nesta revisão de literatura.

Tabela 2. Trabalhos de configuração de rede de logística reversa.

Artigo	Objetivo	Horizonte de planejamento	Quantidade Produtos	Quantidade produtos a coletar	Tipos de instalações a serem abertas*	Aplicação
Barros, Dekker e Scholten (1998)	Min Custos	Único período	Único	Total	Triagem Processamento	Resíduos de Construção (Areia)
Krikke, Kooi e Schuur (1999)	Min Custos	Único período	Único	Total	Processamento	Indústria Automotiva
Jayaraman, Patterson e Rolland (2003)	Min Custos	Único período	Múltiplos	Total	Triagem Processamento	-
Dehghanian e Mansour (2009)	Max Renda Max Benefício Social Min Impacto Ambiental	Único período	Único	Flexível	Destinação	Pneus Inservíveis
Fonseca et al. (2010)	Min Custos Min Impacto Ambiental	Único período	Múltiplos	Total	Triagem Processamento Destinação	Resíduos Sólidos Urbanos
Kara e Onut (2010)	Max Renda	Único período	Único	Flexível	Triagem Processamento	Reciclagem de papel
Pishvaei et al. (2010)	Min Custos	Único período	Único	Total	Triagem	-
Sasikumar, Kannan e Haq (2010)	Min Custos	Múltiplos períodos	Único	Flexível	Triagem Processamento	Pneus Inservíveis
Alumur et al. (2012)	Max Renda	Múltiplos períodos	Múltiplos	Total	Triagem Processamento	Máquinas de lavar e secar roupa
Dat et al. (2012)	Min Custos	Único período	Múltiplos	Total	Processamento	Resíduos elétricos e eletrônicos
Kannan et al. (2012)	Min Custos Min Impacto Ambiental	Único período	Único	Total	Triagem	Setor de plástico
Ayvaz e Bolat (2014)	Min Custos	Único período	Múltiplos	Total	Armazenagem Triagem Processamento	Resíduos eletrônicos
Suyabatmaz, Altekin e Şahin (2014)	Min Custos	Único período	Único	Flexível	Triagem	Reciclagem de papel / Copiadoras
Aras et al. (2015)	Min Custos	Múltiplos períodos	Múltiplos	Total	Processamento	Resíduos eletrônicos
Ayvaz, Bolat e Aydin (2015)	Max Renda	Único período	Múltiplos	Flexível	Armazenagem Triagem Processamento	Resíduos eletrônicos
Ene e Öztürk (2015)	Max Renda	Múltiplos períodos	Múltiplos	Total	Processamento	Setor automotivo
Kilic, Cebeci e Ayhan (2015)	Min Custos	Único período	Múltiplos	Total	Armazenagem Processamento	Resíduos eletrônicos
Stark (2015)	Min Custos Min Impacto Ambiental	Múltiplos períodos	Único	Flexível	Triagem Processamento	Pneus Inservíveis
Demirel, Demirel e Gökçen (2016)	Min Custos	Múltiplos períodos	Múltiplos	Total	Processamento	Setor automotivo
Yu e Solvang (2016a)	Min Custos Min Impacto Ambiental	Único período	Único	Total	Armazenagem Triagem Processamento Destinação	-
Yu e Solvang (2016b)	Min Custos Min Impacto Ambiental	Único período	Múltiplos	Total	Triagem Processamento	Resíduos elétricos e eletrônicos
Zandieh e Chensebli (2016)	Min Custos	Único período	Único	Total	Triagem Processamento Destinação	-

*Os tipos de instalações a serem abertas foram classificados em 4 tipos: armazenagem (único objetivo de estocar produtos), triagem (centros com o objetivo de inspecionar, avaliar e classificar produtos), processamento (centros de reciclagem, recuperação, trituração, etc.) e destinação (aterros e plantas de destinação final).

3.3 Conclusões da revisão de literatura

Após o desenvolvimento da revisão de literatura dos problemas relacionados com a configuração de sistemas de rede de logística reversa, incluindo a localização de instalações a serem abertas, alguns tópicos interessantes podem ser ressaltados:

- A maioria dos pesquisadores tem abordado o problema da configuração de redes de logística reversa como um problema monopérido, tomando as decisões para todo o horizonte de planejamento e utilizando informação agregada dos parâmetros correspondentes ao descarte de pneus, custos, rendas, etc.
- Dos modelos monopérido abordados, somente o trabalho de Kilic, Cebeci e Ayhan (2015) considera decisões de estoque em um dos tipos de instalações a serem abertas. No que se refere aos trabalhos que propõem um enfoque multipérido, foi possível encontrar modelos matemáticos que consideraram decisões de estoque de produto (STARK, 2015; ALUMUR et al., 2012), decisões de utilização de veículos de carga (ARAS et al., 2015), e decisão de mudança no tamanho das instalações abertas (ALUMUR et al. 2012; ARAS et al., 2015).
- Em todas as abordagens multipérido os parâmetros relacionados com o descarte de produtos variam com o tempo. Particularmente nos trabalhos de Alumur et al. (2012), Aras et al. (2015), Stark (2015) e Demirel, Demirel e Gökçen (2016), também são consideradas mudanças nos custos e rendas em cada período de tempo.
- Outro aspecto que vale a pena ressaltar, é que na maioria dos estudos considera que toda a quantidade de produtos descartados tem que ser coletada, somente nos trabalhos de Dehghanian e Mansour (2009), Kara e Onut (2010), Suyabatmaz, Altekin e Şahin (2014), Ayvaz, Bolat e Aydin (2015) e Stark (2015), consideram a possibilidade de não coletar todos os produtos descartados.
- De forma geral, pode-se dizer que os modelos propostos para a configuração de sistemas de rede de logística reversa com considerações de localização de instalações a serem abertas, em sua maioria estão focados em decisões de nível estratégico. A comunidade científica tem focado em decisões estratégicas como a localização e alocação, sendo relativamente menor a quantidades de pesquisas que envolvem decisões de transporte (ARAS et al.; 2015) e estoque (ALUMUR et al. 2012; ARAS et al. 2015).

- Dos trabalhos da literatura encontrados, a pesquisa de Stark (2015) é a mais próxima ao estudo abordado neste trabalho, pois foca também o planejamento da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil. Stark (2015) aborda as decisões de nível estratégico para períodos de tempo anuais, entre tais decisões destacam-se a abertura de centros de armazenagem e plantas de trituração, o fluxo de pneus entre os agentes da rede, e a quantidade de pneus a triturar e estocar.

O trabalho de Stark (2015) foca na rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, no entanto, sua abordagem é diferente da considerada neste estudo. Em Stark (2015) a informação dos parâmetros de descarte de pneus e capacidade das instalações é agrupada e agregada em períodos de tempo de um ano e, devido a isso, não é fornecida informação sobre decisões táticas para o planejamento da rede reversa.

Nesta dissertação pretende-se propor um modelo de programação matemática para a configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil que, utilizando informação detalhada das capacidades das instalações e do descarte de pneus, apoie decisões de caráter estratégico e tático, como são: a localização e dimensionamento de centros intermediários, para um horizonte de planejamento de um ano; e o fluxo de pneus, viagens a realizar, veículos a utilizar, e quantidade de pneus a classificar, estocar, triturar, destinar e vender como servíveis, para diferentes períodos de tempo.

4 ABORDAGEM PROPOSTA PARA O PROBLEMA

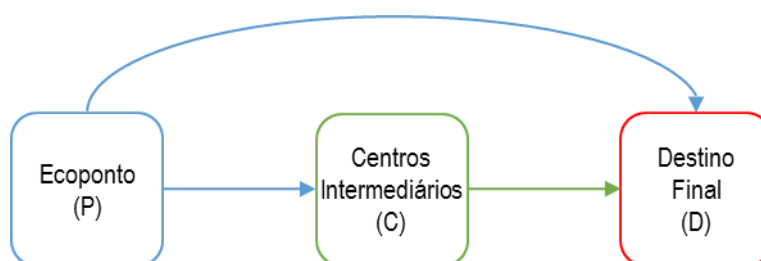
O sistema de rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil tem sido descrito nos trabalhos de Lagarinhos (2011) e Stark (2015). No Capítulo 2, foram descritas as características desta rede reversa, seus atores e as respectivas atividades realizadas em cada um.

Como já mencionado, a rede reversa começa quando os pneus são descartados e levados aos ecopontos, daí os pneus são transportados para as plantas de destinação final, que possuem diferentes formas de recuperação de valor (reciclagem) ou mesmo recuperação energética (co-processamento).

Às vezes, entre os ecopontos e as plantas de destinação final, existem centros intermediários que executam atividades de triagem e trituração de pneus, trazendo benefícios, como, por exemplo, a redução dos custos de transporte para destinação de pneus, o aumento do ciclo de vida e a obtenção de lucro na venda de pneus servíveis no mercado secundário.

A rede reversa conta com três níveis, os Ecopontos (P) onde é feita a coleta de pneus; Centros Intermediários (C) onde são feitas atividades de triagem, trituração e estocagem, e as Empresas de Destinação Final (D) onde são feitas atividades de reciclagem ou co-processamento. A Figura 8 mostra a estrutura da rede reversa.

Figura 8. Estrutura do sistema de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.



Fonte: Stark (2015)

De acordo com as informações coletadas, não ocorre um planejamento coordenado da logística reversa. Logo, um planejamento coordenado que considere simultaneamente informações relacionadas às capacidades e disponibilidades dos diferentes atores da rede

reversa pode identificar pontos de melhoria e fornecer decisões mais adequadas para o desempenho geral da rede.

4.1 Considerações para a formulação matemática

Assume-se que os centros intermediários podem realizar funções de armazenagem e de processamento (triagem e trituração) dos pneus. Diferentemente do trabalho de Stark (2015), que considera a abertura de dois tipos diferentes de instalações, centros de armazenagem (triagem e armazenamento), e centros de trituração (triagem e trituração).

Para o desenvolvimento do modelo matemático são feitas as seguintes considerações:

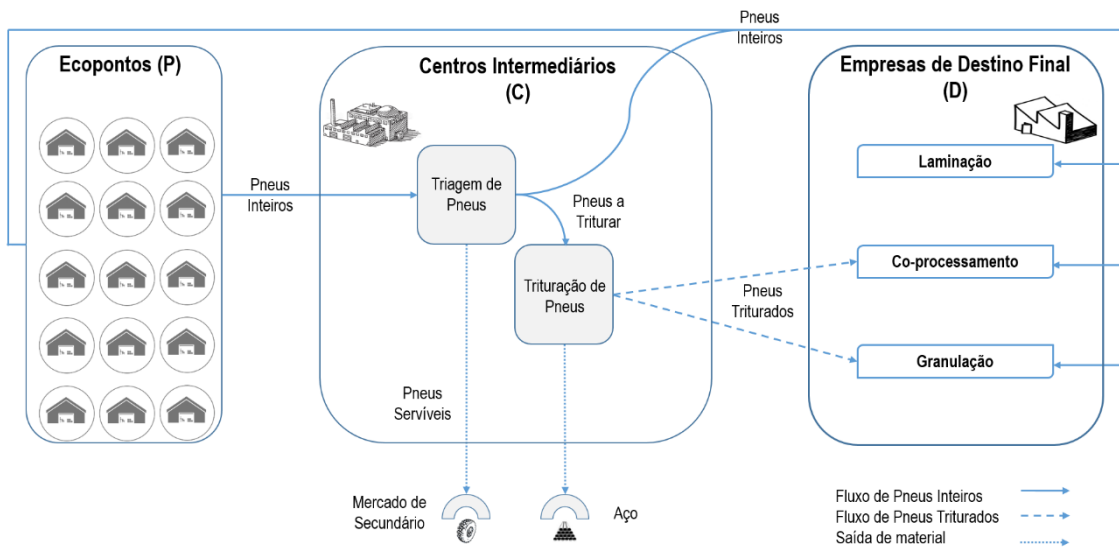
- A localização dos ecopontos e as empresas de destinação final é fixa, enquanto a localização dos centros intermediários é uma decisão do modelo definida para todo o horizonte de planejamento.
- Pode existir fluxo de pneus dos ecopontos aos centros intermediários e diretamente para as empresas de destinação final.
- Os centros intermediários somente recebem produtos dos ecopontos. Não existe fluxo de pneus entre centros intermediários.
- Os centros intermediários podem ser abertos com diferentes níveis de capacidade nos locais candidatos.
- Nos centros intermediários são feitas atividades de triagem e trituração de pneus, de forma sequencial. Desta forma, pode-se dizer que existem dois estágios de planejamento nestas instalações, sendo que todos os pneus que chegam aos centros intermediários são triados, mas nem todos são triturados. Ou seja, as quantidades de pneus triturados, estocados, comercializados como servíveis no mercado secundário e enviados à destinação final, é uma decisão do modelo em cada período de tempo em cada centro intermediário.
- Os pneus servíveis correspondem a um percentual da quantidade total de pneus recebidos em cada centro. Estes pneus podem ser comercializados ou triturados para atender a meta de destinação final.
- A capacidade de estoque nos centros intermediários é limitada e estabelecida em volume, os pneus inteiros e triturados são estocados no mesmo espaço sendo

considerado o volume destes (os pneus inteiros ocupam mais espaço por sua estrutura).

- Podem ser enviados pneus inteiros e triturados dos centros intermediários às empresas de destinação final.
- No processo de trituração o aço é separado dos pneus, sendo que quantidade de aço corresponde a uma taxa do total de material recebido. É considerado o valor de venda do material sem custos de transporte para entregar.
- Em relação ao transporte, são utilizados veículos de diferentes capacidades para o transporte de pneus entre os agentes da rede, sendo que os pneus inteiros e triturados não podem ser transportados no mesmo veículo
- Os custos de transporte dependem da quantidade de veículos utilizados e da distância percorrida por estes veículos. No entanto, devido às diferenças de volume entre os pneus inteiros e triturados, para transportar uma determinada quantidade de pneus inteiros é necessário utilizar mais veículos (ou viagens) do que para transportar a mesma quantidade de pneus triturados. Desta forma também é possível transportar quantidades menores que a capacidade dos veículos.
- Os custos de triagem, trituração e estoque de pneus são os mesmos para todo o horizonte de planejamento.
- Os custos de destinação dos pneus inservíveis inteiros e triturados dependem do tipo de destinação final.
- Existe uma meta anual para a quantidade total de pneus inservíveis enviados para destinação final, e uma multa financeira pelo não cumprimento desta meta.

A Figura 9 detalha os fluxos na rede logística reversa proposta para a modelagem.

Figura 9. Rede reversa proposta para a modelagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, o problema de planejamento da rede de logística reversa abordado neste estudo consiste em determinar para todo horizonte de planejamento a quantidade, localização e dimensionamento de centros intermediários; e determinar a cada período: a quantidade de pneus enviados para triagem; a quantidade de pneus a serem triturados; a quantidade de pneus inteiros e triturados em estoque; a quantidade de pneus servíveis a serem vendidos no mercado secundário; a quantidade de pneus a serem enviados para as empresas de destinação final; a quantidade e tipos de veículos de carga a serem utilizados.

4.2 Modelo para decisões estratégico-táticas no planejamento da logística reversa de pneus no Brasil

A seguir é detalhada a notação matemática utilizada para formular o modelo matemático:

Índices

- i, j, k : Nós da rede;
- l : Tamanho das instalações;
- t : Período de tempo;
- b : Tipo de veículo de transporte;

Conjuntos

- P : Ecopontos;
 C : Centros intermediários;
 D : Empresas de destinação final;
 L : Tamanhos dos centros intermediários;
 T : Períodos de tempo;
 B : Tipos de veículos;

Parâmetros

- g_{it} Quantidade de pneus descartados no ecoponto i no período t ;
 d_j Capacidade de processamento no centro de destinação final j ;
 U_b Capacidade de transporte de pneus inteiros no veículo tipo b ;
 U'_b Capacidade de transporte de pneus triturados no veículo tipo b ;
 ci_l Custo de instalação de um centro intermediário de tamanho l ;
 cs Custo unitário de triagem dos pneus nos centros intermediários;
 cp Custo unitário de trituração dos pneus nos centros intermediários;
 ce Custo de estoque de pneus inteiros nos centros intermediários;
 ce' Custo de estoque de pneus triturados nos centros intermediários;
 cv_{ijb} Custo de transportar pneus inteiros de i até j utilizando o veículo tipo b ;
 cv'_{ijb} Custo de transportar pneus triturados de i até j utilizando veículo tipo b ;
 rs Preço de venda de pneus servíveis no mercado secundário;
 ra Preço de venda de aço obtido após trituração;
 rp_j Custo de destinação de pneu inteiro na planta de destinação final j ;
 rp'_j Custo de destinação de pneu triturado na planta de destinação final j ;
 qr_l Capacidade de triagem de pneus em um centro intermediário de tamanho l ;
 qp_l Capacidade de trituração de um centro intermediário de tamanho l ;
 qe_l Capacidade de estoque de um centro intermediário de tamanho l ;
 vp Volume de pneus inteiros;

vp'	Volume de pneus triturados;
α	Fração média de aço separado no processo de trituração;
σ	Fração média de pneus servíveis no total coletado;
β	Penalização unitária por não cumprimento da meta;
M	Meta para a quantidade de pneus a serem destinados;

Variáveis de decisão

X_{ijt}	Quantidade de pneus inteiros transportados no arco (i,j) no período t ;
X'_{ijt}	Quantidade de pneus triturados transportados no arco (i,j) no período t ;
I_{jt}	Quantidade de pneus inteiros em estoque no nó $j \in [P \cup C]$, ao final do período t ;
I'_{jt}	Quantidade de pneus triturados em estoque no nó $j \in C$, ao final do período t ;
Y_{jt}	Quantidade de pneus a serem triturados no nó $j \in C$ no período t ;
S_{jt}	Quantidade de pneus servíveis a comercializar no nó j no período t ;
G	Quantidade de pneus faltantes por destinar para atingir a meta estabelecida;
Z_{jl}	Indica se um centro intermediário com capacidade l é instalado no nó j ($z_{jl} = 1$) ou não ($z_{jl} = 0$);
F_{bijt}	Número de viagens feitas com um veículo de tamanho b para o transporte de pneus inteiros entre os nós (i,j) no período t ;
F'_{bijt}	Número de viagens feitas com um veículo de tamanho b para o transporte de pneus triturados entre os nós (i,j) no período t ;

A função objetivo (1) minimiza a diferença entre os custos totais (incluindo a penalização e os gastos de destinação) e a renda obtida na rede reversa. A expressão da função objetivo divide-se em 6 termos, o primeiro representa os custos de transporte totais entre ecopontos e centros intermediários, ecopontos e empresas de destinação, e entre centros intermediários e empresas de destinação (1.a). O segundo termo representa os custos de instalação de centros intermediários (1.b). O terceiro termo considera os custos de operação, ou seja, custos de triagem, trituração e estocagem incorridos nos centros intermediários (1.c). O quarto representa a penalização pelo não cumprimento da meta estabelecida (1.d). O quinto termo representa os gastos de destinação final de pneus

inteiros e triturados (1.e). Finalmente, o sexto termo refere-se à receita total obtida pela venda de pneus servíveis e aço (1.f):

$$\mathbf{min} \quad \text{Custos Transporte} + \text{Custos Abertura} + \text{Custos Operação} \\ + \text{Multa} + \text{Custos Destinação} - \text{Receitas} \quad (1)$$

$$\text{Custos Transporte} = \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{\substack{j \in [CUD] \\ i \neq j}} \sum_{b \in B} (cv_{bij} F_{bijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{b \in B} (cv'_{bij} F'_{bijt}) \right\} \quad (1.a)$$

$$\text{Custos Abertura} = \sum_{j \in C} \sum_{l \in L} c_l Z_{jl} \quad (1.b)$$

$$\text{Custos Operação} = \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs X_{ijt} + \sum_{j \in C} (cp Y_{jt} + ce I_{jt} + ce' I'_{jt}) \right] \quad (1.c)$$

$$\text{Multa} = \beta G \quad (1.d)$$

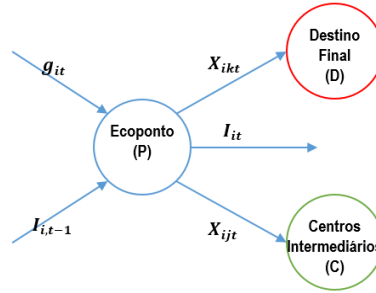
$$\text{Custos Destinação} = \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in D} rp_j X_{ijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \quad (1.e)$$

$$\text{Receitas} = \sum_{t \in T} \left\{ rs S_{jt} + ra \sum_{j \in C} \alpha Y_{jt} \right\} \quad (1.f)$$

As restrições (2) representam o balanço de fluxo nos ecopontos (P). A quantidade de pneus descartados no ecoponto no período (g_{it}) mais os pneus em estoque no ecoponto no período anterior ($I_{i,t-1}$) deve ser igual aos pneus transportados para os centros intermediários e para as empresas de destinação final ($\sum X_{ijt} + \sum X_{ikt}$), mais os pneus deixados em estoque no período atual (I_{it}). A Figura 10 ilustra o balanceamento do fluxo de pneus nos ecopontos:

$$\sum_{j \in [CUD]} X_{ijt} + I_{it} = g_{it} + I_{i,t-1} \quad i \in P; t \in T. \quad (2)$$

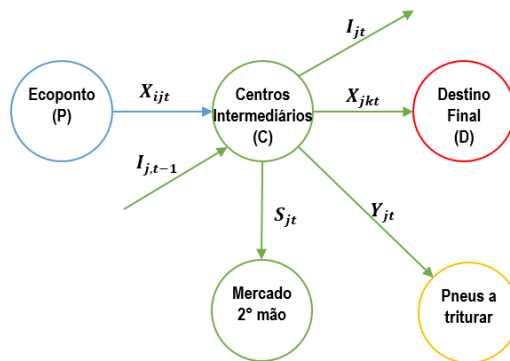
Figura 10. Balanço de fluxo de material nos ecopontos.



As restrições (3) garantem a conservação de fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários (C). As entradas de pneus procedentes dos ecopontos ($\sum X_{ijt}$) mais o estoque de pneus inteiros do período anterior ($I_{j,t-1}$) devem ser iguais à saída de pneus servíveis para venda no mercado secundário (S_{jt}), mais os pneus inteiros inservíveis enviados para destinação final ($\sum X_{jkt}$), mais os estoques de pneus do período atual (I_{jt}), e mais a quantidade de pneus inteiros destinados a trituração no período atual (Y_{jt}). A Figura 11 representa o balanço do fluxo da restrição 3:

$$\sum_{i \in P} X_{ijt} + I_{j,t-1} = S_{jt} + \sum_{k \in D} X_{jkt} + Y_{jt} + I_{jt} \quad j \in C; t \in T. \quad (3)$$

Figura 11. Balanço de fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários.

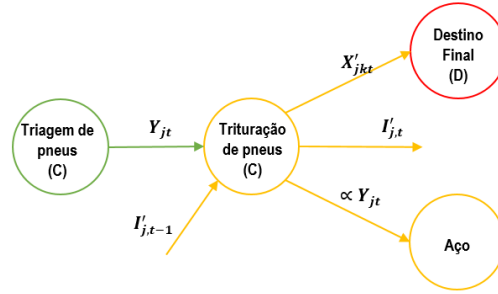


As restrições (4) garantem a conservação de fluxo de pneus triturados nos centros intermediários (C). Os pneus triturados no período atual (Y_{jt}) mais o estoque de pneus triturados do período anterior ($I'_{j,t-1}$) tem que ser igual à fração de aço obtida dos pneus triturados no período atual (αY_{jt}), mais a quantidade de pneus triturados enviados para as

empresas de destinação final ($\sum X'_{jkt}$) e mais a quantidade de pneus triturados deixados no estoque do período atual (I'_{jt}). A Figura 12 mostra o balanço do fluxo desta restrição:

$$Y_{jt} + I'_{j,t-1} = \alpha Y_{jt} + \sum_{k \in D} X'_{jkt} + I'_{jt} \quad j \in C; t \in T. \quad (4)$$

Figura 12. Balanço de fluxo dos pneus triturados nos centros intermediários.



As restrições (5) limitam a quantidade de pneus que podem ser considerados para comercialização no mercado de segunda mão, que não pode ultrapassar uma porcentagem (σ) da quantidade total de pneus recebidos em cada centro:

$$S_{jt} \leq \sigma \sum_{i \in P} X_{ijt} \quad j \in C; t \in T. \quad (5)$$

As restrições (6) limitam a quantidade de pneus que podem ser recebidos e triados para cada centro intermediário em cada período de tempo:

$$\sum_{i \in P} X_{ijt} \leq \sum_{l \in L} q r_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (6)$$

As restrições (7) limitam a quantidade de pneus que podem ser triturados nos centros intermediários para cada período de tempo:

$$Y_{jt} \leq \sum_{l \in L} q p_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (7)$$

As restrições (8) limitam a quantidade de pneus inteiros e triturados que podem ser estocados nos centros intermediários:

$$vpI_{jt} + vp'I'_{jt} \leq \sum_{l \in L} qe_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (8)$$

As restrições (9) estabelecem que a capacidade das empresas de destinação final seja respeitada:

$$\sum_{i \in [PUC]} X_{ikt} + \sum_{i \in C} X'_{ikt} \leq d_j \quad k \in D; t \in T \quad (9)$$

As restrições (10) garantem que um único centro intermediário pode ser instalado em cada ponto candidato e com um único nível de capacidade:

$$\sum_{l \in L} Z_{jl} \leq 1 \quad j \in C; \quad (10)$$

As restrições (11) determinam a quantidade de pneus não enviada para destinação, considerando a meta estabelecida:

$$\sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{k \in D} X_{ikt} + \sum_{i \in C} \sum_{k \in D} X'_{ikt} + \alpha \sum_{j \in C} Y_{jt} \right\} + G \geq M \quad (11)$$

As restrições (12) e (13) associam a quantidade de pneus inteiros e triturados transportados com a quantidade de veículos usados para tal transporte, considerando as limitações de peso destes veículos:

$$X_{ijt} \leq \sum_{b \in B} U_b F_{bijt} \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; \quad (12)$$

$$i \neq j; t \in T.$$

$$X'_{ikt} \leq \sum_{b \in B} U'_b F'_{bikt} \quad i \in C; k \in D; t \in T. \quad (13)$$

Finalmente, nas restrições (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21) e (22) são estabelecidos os domínios das variáveis:

$$G \geq 0 \quad (14)$$

$$X'_{ikt} \geq 0 \quad i \in C; k \in D; t \in T. \quad (15)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad j \in [P \cup C]; t \in T; \quad (16)$$

$$I'_{jt} \geq 0 \quad j \in C; t \in T; \quad (17)$$

$$X_{ijt} \geq 0 \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; \quad (18)$$

$$t \in T; i \neq j$$

$$Z_{jl} \in \{0,1\} \quad j \in C; l \in L. \quad (19)$$

$$S_{jt} \geq 0 \quad j \in C; t \in T; \quad (20)$$

$$F_{bijt} \in Z^+ \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; \quad (21)$$

$$b \in B; t \in T; i \neq j$$

$$F'_{bikt} \in Z^+ \quad i \in C; k \in D; b \in B; t \in T \quad (22)$$

No que se refere ao número de restrições e variáveis binárias, inteiras e contínuas presentes no modelo, na Tabela 3 é apresentado o número total de cada uma destas, em função dos conjuntos do modelo.

Tabela 3. Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do modelo.

Número de restrições	$ T * (P + D + 6 * C + (C * D) + ((P + C) * (C + D))) + C + 1$	
Número de variáveis contínuas	$ T * ((P + C) * (C + D)) + (C * D) + 4 * C + 2 * P + 1$	
Número de variáveis binárias	$ C * L $	
Número de variáveis inteiras	$[B * T * ((P + C_i) * (C_j + D) * (C * D))]$	$C_i \wedge C_j \in C;$ $C_i \neq C_j$

5 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Conforme discutido no Capítulo 4, o problema abordado nesta dissertação envolve vários subproblemas entre os que se destaca o problema de localização de instalações. Os problemas de localização possuem uma natureza combinatória, o crescimento é exponencial no número de soluções possíveis com o crescimento apenas linear do número de variáveis do problema, e são conhecidos na literatura como de tipo NP-hard (VERTER, 2011; DASKIN; MAASS, 2015).

Situações reais que envolvem o problema de localização, em geral, possuem um número elevado de possibilidades de localizações, o que torna sua solução uma tarefa difícil e até mesmo inviável apenas com a utilização de métodos de solução exatos. Por esta razão, muitos dos trabalhos mostrados na revisão de literatura do Capítulo 3, tem focado na proposição de heurísticas (BARROS; DEKKER; SCHOLTEN, 1998; JAYARAMAN; PATTERSON; ROLLAND, 2003; SUYABATMAZ; ALTEKIN; ŞAHIN, 2014; YU; SOLVANG, 2016b) e meta-heurísticas (DEHGHANIAN; MANSOUR, 2009; PISHVAEE; KIANFAR; KARIMI, 2010; ZANDIEH; CHENSEBLI, 2016) para solucionar os problemas abordados.

Considerando que a rede reversa estudada neste trabalho é bastante esparsa resultando em conjuntos de dados grandes, neste capítulo são propostos métodos heurísticos para resolver o modelo matemático apresentado no Capítulo 4. Inicialmente, é apresentada uma heurística de decomposição em duas fases, em seguida, são descritas 5 heurísticas do tipo *relax and fix*, e finalmente, são descritas 3 heurísticas do tipo *fix and optimize*.

5.1 Heurística de decomposição em duas fases

Com o objetivo de obter uma solução inicial de boa qualidade para a instalação de centros intermediários e a partir daí encontrar soluções relacionadas ao transporte e processamento dos pneus entre os agentes da rede reversa, foi proposta esta heurística de decomposição de duas fases. Assim, pode-se dizer que o problema da logística reversa é abordado por meio da resolução sequencial de dois problemas menos complexos. Na primeira fase, é resolvido um modelo simplificado de localização de instalações baseado no modelo original proposto neste trabalho. No modelo simplificado não são consideradas

as variáveis relacionadas ao número de viagens necessárias para transportar os pneus inservíveis entre os agentes da rede reversa (F_{bijt} e F'_{bijt}), conseqüentemente não são consideradas as restrições (12) e (13) que associam a quantidade de pneus inteiros e triturados transportados com a quantidade de veículos, e os custos de transporte da função objetivo são colocados em função do fluxo de pneus inservíveis entre os agentes da rede (X_{ijt} e X'_{ijt}). Após resolver o problema de localização, são fixadas as decisões de abertura de centros intermediários (Z_{jl}) e é resolvido o problema original de logística reversa de pneus inservíveis na segunda fase. A seguir é descrito o modelo de localização de instalações da primeira fase da heurística de decomposição:

Modelo de localização para planejamento da logística reversa de pneus no Brasil

Parâmetros:

ct_{ij} Custo de transportar uma tonelada de pneus inteiros de i até j ;

ct'_{ij} Custo de transportar uma tonelada pneus triturados de i até j ;

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \min \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{\substack{j \in [CUD] \\ i \neq j}} (ct_{ij} X_{ijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} (ct'_{ij} X'_{ijt}) \right\} + \sum_{j \in C} \sum_{l \in L} c_{il} Z_{jl} \\ - \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in D} rp_j X_{ijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \\ + \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs X_{ijt} + \sum_{j \in C} (cp Y_{jt} + ce I_{jt} + ce' I'_{jt}) \right] + \beta G \\ - \sum_{t \in T} \left\{ rs \sum_{j \in C} S_{jt} + ra \sum_{j \in C} \alpha Y_{jt} \right\} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Sujeito a:

Restrições (2-11)

Definição de variáveis (14-20)

A Tabela 4 apresenta a heurística de decomposição de duas fases proposta.

Tabela 4. Heurística de decomposição em duas fases.

Heurística de decomposição em duas fases	
1.	Fase 1. Resolva o <i>Modelo de localização para planejamento da logística reversa de pneus no Brasil</i> , até o critério de parada estabelecido
2.	Fixe as variáveis de abertura de centros intermediários (Z_{jl})
3.	Fase 2. Resolva o <i>Modelo para decisões estratégico-táticas no planejamento da logística reversa de pneus no Brasil</i> (Modelo Original)

5.2 Relax and Fix

As heurísticas do tipo *relax-and-fix* foram propostas inicialmente por Wolsey (1998), e basicamente se baseiam em um método de decomposição, onde um conjunto de variáveis inteiras de um modelo de programação inteira mista (MIP) é particionado em n subconjuntos disjuntos. A resolução do problema é realizada de forma iterativa e sequencial. A cada iteração é resolvido um subproblema n -MIP, onde as variáveis inteiras do subconjunto n são mantidas inteiras e as variáveis dos outros subconjuntos são relaxadas. Se a solução do subproblema n -MIP for factível, as variáveis do subconjunto (ou parte delas) são fixadas no valor obtido. Com esta abordagem pretende-se deixar apenas um grupo de variáveis discretas para cada iteração, visando assim, resolver vários problemas menos complexos, ao invés, de um problema grande e de maior complexidade. Este tipo de heurística tem sido utilizado para abordar problemas de grande porte de planejamento da produção (TOSO, MORABITO; CLARK, 2009; FERREIRA; MORABITO; RANGEL, 2010) e de localização de instalações (MORENO; ALEM; FERREIRA, 2016). A seguir, a Tabela 5 descreve as heurísticas do tipo *relax and fix*.

Tabela 5. Heurísticas do tipo *relax-and-fix*.

Algoritmos do tipo <i>relax and fix</i>	
1.	Inicialização: Relaxar o modelo. Definir o conjunto de partições $P_1 \dots P_N$, para as variáveis. Estabelecer os critérios de fixação de variáveis
2.	Para $n=1$ até N , faça:
3.	Colocar as variáveis da partição P_n inteiras
4.	Resolver o subproblema MIP
5.	Se a solução encontrada é factível
6.	Então → fixar variáveis
7.	Senão → parar
8.	Fim Se
9.	Fim Para
10.	Mostrar solução

Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2016).

A seguir, são apresentadas as cinco heurísticas do tipo *relax and fix* consideradas nesta dissertação.

- **RF01 – Partição por períodos:** Nesta heurística as variáveis do número de viagens são particionadas segundo o período de tempo. Assim, são resolvidos iterativa e sequencialmente subproblemas monopéridos, integrados para obter soluções ao longo do horizonte de planejamento. Após cada iteração são fixadas todas as variáveis da respectiva partição.

- **RF02 – Partição por trechos:** Nesta heurística as variáveis do número de viagens são particionadas segundo os trechos percorridos: P-C, P-D e C-D. Após a resolução do subproblema de cada iteração, são fixadas todas as variáveis da respectiva partição.
- **RF03 – Partição por tipo de decisão:** Nesta heurística, inicialmente é resolvido o problema considerando apenas as variáveis relacionadas ao nível de decisão estratégico (variáveis da abertura de instalações) como inteiras, e todas as variáveis do número de viagens relaxadas. Caso seja encontrada uma solução factível, o problema é resolvido novamente considerando fixas as variáveis abertura de instalações e em sua forma original (inteiras) as variáveis do número de viagens.
- **RF04 – Partição por períodos e decisão:** Esta heurística *relax and fix* é muito semelhante à primeira, utiliza uma decomposição por período de tempo. No entanto, após encontrar uma solução factível de cada subproblema, não são fixadas as variáveis relacionadas à partição em questão, apenas logo depois de resolver todas as iterações, são fixadas as variáveis de abertura de instalações que sempre foram escolhidas em todas as iterações, e posteriormente é resolvido o modelo original.
- **RF05 – Partição por períodos “flexível”:** A última heurística *relax and fix* considerada é muito semelhante à primeira, utiliza uma decomposição por período de tempo. No entanto, se é encontrada uma solução factível do subproblema, apenas as variáveis relacionadas à partição em questão que são diferentes de “zero” são fixadas.

5.3 *Fix and Optimize*

A heurística *fix-and-optimize* é um método de melhoria proposto inicialmente por Pochet e Wolsey (2006). Este tipo de heurística também se baseia na decomposição de um conjunto de variáveis discretas em n subconjunto de variáveis. A diferença em relação a *relax-and-fix*, é que a *fix-and-optimize* parte de uma solução factível inicial e tenta melhorá-la por meio da resolução iterativa dos subproblemas n -MIP. A cada iteração apenas as variáveis da partição n são considerada sem fixar, e as variáveis das outras partições são fixadas. Assim como no *relax-and-fix*, com este tipo de heurísticas pretende-se deixar apenas um grupo de variáveis inteiras livres para cada iteração, e resolver vários subproblemas de melhoria menos complexos. Este tipo de heurísticas tem sido utilizado para bordar problemas de grande porte de planejamento da produção (HELBER; SAHLING, 2010; SEEANNER; ALMADA-LOBO; MEYR, 2013) e de localização de

instalações (GHADERI; JABALAMELI, 2013). A seguir, a Tabela 6 descreve as heurísticas de tipo *fix and optimize*.

Tabela 6. Heurísticas do tipo *fix and optimize*.

Algoritmos do tipo <i>fix and optimize</i>	
1.	Inicialização: Achar uma solução inicial. Definir o conjunto de partições $P_1 \dots P_N$, para as variáveis. Estabelecer <i>solução inicial</i> como <i>solução escolhida</i> . Fixar todas as variáveis inteiras da <i>solução escolhida</i> .
2.	Para $n=1$ até N , faça:
3.	Desfixar as variáveis inteiras partição P_n
4.	Se a solução encontrada é melhor à <i>solução escolhida</i>
5.	Então \rightarrow <i>solução escolhida</i> = <i>solução encontrada</i>
6.	Senão \rightarrow deixar a mesma solução escolhida
7.	Fim Se
8.	Fixar todas as variáveis inteiras da <i>solução escolhida</i>
9.	Fim Para
10.	Mostrar solução

Fonte: Adaptado de Moreno et al. (2016).

A seguir, são apresentadas as três heurísticas do tipo *fix and optimize* consideradas nesta dissertação.

- **FO01 – Partição por períodos:** Esta heurística considera uma partição do conjunto de variáveis do número de viagens baseada nos períodos de tempo.
- **FO02 - Partição por trechos:** Esta heurística considera uma partição do conjunto de variáveis do número de viagens baseada nos trechos percorridos: P-C, P-D e C-D.
- **FO03 - Partição por tipo de decisões:** Esta heurística considera uma partição do conjunto de variáveis discretas baseada no tipo de decisão. Após uma solução inicial, é resolvido novamente o problema fixando apenas as variáveis de abertura de instalações (decisões estratégicas).

A seguir, a Tabela 7 mostra as cinco heurísticas *relax-and-fix* e as três heurísticas *fix and optimize* consideradas nesta dissertação, com suas respectivas partições e critérios de fixação.

Tabela 7. Heurísticas do tipo *relax-and-fix* and *fix and optimize* propostas.

HEURÍSTICA	PARTIÇÃO	Variáveis Fixadas
RF01 / FO01	Partição por períodos	$F_{bijt}; F'_{bijt}$
RF02 / FO02	Partição por trechos	$F_{bijt}; F'_{bijt}$
RF03 / FO03	Partição por tipo de decisões	Z_{jl}
RF04	Partição por períodos	Z_{jt}
RF05	Partição por períodos	$F_{bijt}; F'_{bijt} \neq 0$

6 TESTES COMPUTACIONAIS

Para a execução dos experimentos computacionais foi utilizado um computador com processador Intel (R) Core (TM) i7-2600 3.40GHz com 16GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 professional. Foi utilizada a linguagem de modelagem algébrica AMPL com o solver CPLEX 12.6. Os experimentos foram conduzidos com critério de parada de *gap relativo* igual a “0,5” ou tempo limite de processamento de 14.400 segundos. Primeiramente, o modelo proposto foi validado com uma pequena instância ilustrativa, os resultados destes experimentos estão no Apêndice A.

Esta seção descreve os dados reais coletados e a geração de instâncias a partir destes dados. Posteriormente, os resultados do modelo são detalhados para uma instância base, com o objetivo de verificar a representatividade do modelo matemático. Em seguida, os resultados do modelo são comparados com outras abordagens da literatura para avaliar a validade dos principais pressupostos. Também são analisados os métodos heurísticos propostos para diferentes conjuntos de dados. Por fim, são analisados diferentes cenários reais considerados e é analisado o comportamento da rede reversa frente a variação de diferentes parâmetros.

6.1 Descrição das instâncias

Os dados coletados foram obtidos em sua maioria dos relatórios do IBAMA (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016) e de trabalhos da literatura focados na reciclagem de pneus (LIBERA et al., 2012; LAGARINHOS, 2011; ANDRADE; JESUS; CRUZ, 2015; STARK, 2015; SILVA e DAMO, 2016). A seguir são detalhados os dados e as fontes de onde foram obtidos:

- **Localização dos agentes da rede:** O relatório de pneus IBAMA (2016) descreve a localização dos pontos de coleta de pneus e das empresas de destinação final de pneumáticos inservíveis presentes em todo Brasil. No caso particular do Estado de São Paulo foram encontrados 412 ecopontos e 20 empresas de destinação final. Em relação aos potenciais candidatos para instalação de centros intermediários, foram

consideradas as principais cidades das 41 regiões de governo e a região metropolitana do Estado de São Paulo.

- **Distância entre os agentes da rede:** Para o cálculo da distância entre os ecopontos, centros intermediários e empresas de destinação final foi utilizada a fórmula de Haversine, de forma semelhante aos trabalhos de que Lagarinhos (2011) e Stark (2015). Esta fórmula (23) utiliza relações trigonométricas e o diâmetro da terra para estimar os valores das distâncias diretas entre dois pontos, no entanto, não considera a malha rodoviária no cálculo. A expressão (23) é dada por:

$$d = 2 * r * \sin^{-1} \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\delta_b - \delta_a}{2} \right) + \cos(\delta_a) * \cos(\delta_b) * \sin^2 \left(\frac{\tau_b - \tau_a}{2} \right)} \right) \quad (23)$$

A distância d entre os dois pontos a e b , é calculada com base nas latitudes (δ_a e δ_b) e nas longitudes (τ_a e τ_b) destes pontos, e r é o raio médio da terra em quilômetros (6.371 km).

- **Número de pneus descartados nos ecopontos:** A quantidade total de pneus descartados não é conhecida. Nos relatórios do IBAMA somente há registros da quantidade de pneus coletados nos ecopontos e enviados às empresas de destinação final pelos produtores e importadores nos anos 2009-2015. A quantidade real de pneus descartada pode ser maior que a quantidade de pneus destinados, uma vez que parte deles poderia ter ficado nos ecopontos ou ter sido triados e vendidos como servíveis no mercado secundário, antes da destinação final dos pneus. Desta forma, os valores de destinação foram utilizados como referência para a quantidade de pneus descartados. A Tabela 8, mostra a quantidade de pneus coletados e enviados às empresas de destinação final pelos produtores e importadores nos anos 2009-2015.

Tabela 8. Pneus coletados pelos produtores e importadores nos anos 2009-2015.

	2009-2010	2011	2012	2013	2014	2015
Coletado Fabricantes (t.)	378.774	285.138	317.150	377.212	404.491	417.132
Coletado Importadores (t.)	176.333	177.318	141.879	114.440	140.203	101.791
Total Pneus Coletados (t.)	555.107	462.457	459.030	491.653	544.695	518.924
Variação (%)	*	"	-0.74%	7.11%	10.79%	-4.73%

Fonte: IBAMA (2016).

- **Custo de transporte:** No que se refere aos custos de transporte da rede, foi utilizada a informação do Índice Nacional de Custo do Transporte Carga Lotação (INCT-L,

2017), e relacionada com a capacidade dos veículos de carga utilizados por RECICLANIP (RECICLANIP, 2015). A Tabela 9, detalha os custos de transporte por tonelada para diferentes faixas de distância.

Tabela 9. Custo de transporte de carga por tonelada.

PERCURSO	DISTÂNCIA (km)	R\$/t.
Muito curto	50	72.88
Curto	400	133.39
Médio	800	205.33
Longo	2,400	476.79
Muito longo	6,000	1075.37

Fonte: DECOPE | NTC&LOGÍSTICA (2017).

- **Capacidade dos centros intermediários:** Foram considerados 3 possíveis tipos de centros intermediários. A capacidade de trituração de cada um destes centros baseou-se na capacidade das máquinas de trituração das usinas de reciclagem de pneus propostas nos trabalhos de Libera et al. (2012), Andrade, Jesus e Cruz (2015) e Silva e Damo (2016), que em média é de 300 t/mês. No que se refere à capacidade de triagem, foi estabelecido que os centros intermediários podem receber e classificar uma quantidade de pneus maior do que a quantidade triturada, isso porque existe a possibilidade de encontrar pneus servíveis na triagem, que podem ser vendidos em um mercado secundário.

Desta forma, estimou-se uma capacidade de triagem 25% maior que a capacidade de trituração, com base na porcentagem de pneus servíveis que podem ser encontrados nos pneus coletados (ABR, 2013). Em relação à capacidade do estoque, foi estabelecida a possibilidade de armazenar nos centros os pneus processados (triados e triturados) por uma semana. A Tabela 10, detalha as capacidades estabelecidas para os centros intermediários, pequenos, médios e grandes, sendo que os médios têm o dobro da capacidade dos pequenos e os grandes têm o triplo da capacidade dos pequenos.

Tabela 10. Capacidades dos Centros Intermediários.

Tipo de Centro Intermediário	Capacidade de trituração Mensal (t.)	Capacidade de triagem Mensal (t.)	Capacidade de estoque Mensal (t.)
Pequeno	300	375	75
Médio	600	750	150
Grande	900	1125	225

- Custos de abertura:** Os custos de abertura de Centros Intermediários foram estimados a partir de diversas fontes, considerando os custos de construção/galpão, mobiliário, equipamentos e máquinas, veículos e capital de giro (SEBRAE, 2017). Os custos da instalação de galpões industriais foram estimados com base na informação fornecida pelo Custo Unitário Básico Da Construção Civil no Estado de São Paulo em maio de 2017, que era de 733,49 R\$/m² (SINDUSCONSP, 2017). Os custos do maquinário foram obtidos dos trabalhos de Andrade, Jesus e Cruz (2015) e Silva e Damo (2016). Os custos mobiliários administrativos foram baseados nos valores utilizados por Libera et al. (2012). A área do galpão industrial foi determinada levando em conta o espaço necessário para maquinário e área de armazenamento, estoque e movimentação de pneus, sabendo que em uma área de 50 m² podem ser armazenadas 11 toneladas de pneus inteiros (área e capacidade de armazenamento dos veículos de carga de RECICLANIP). A Tabela 11 mostra os custos de instalação dos centros intermediários.

Tabela 11. Custos de instalação de Centros Intermediários.

Tipo de Centro Intermediário	Depreciação das instalações para cada ano (BRL)
Pequeno	125.000
Médio	250.000
Grande	375.000

Vale a pena ressaltar, que foi considerada uma depreciação linear de 10 anos para as instalações dos centros intermediários, levando em conta a vida útil do maquinário utilizada nos mesmos (FAZENDARJ, 2017).

- Custos de operação:** Os custos relativos à trituração de pneus foram estimados com base no rendimento médio por funcionário/hora de trabalho de 280 kg/h (LIBERA et al., 2012) e a consideração de que cada trabalhador recebe dois salários mínimos nacional do ano de 2017 com os encargos trabalhistas, R\$1.874,00 (PORTAL BRASIL, 2016). De forma similar, os custos relativos à triagem de pneus foram estabelecidos com base no rendimento médio por funcionário/hora de trabalho de 560 kg/h, no que se refere aos custos de armazenagem, se tomou como base os custos de armazenagem de uma Central de Armazenamento de Pneus Inservíveis (CAPI) localizada em Caxias do Sul/RS, que são R\$7,5 /t. (CODECA, 2017).

- **Renda de Produtos:** Os valores de rendas e custos decorrentes do envio de pneus ao mercado secundário, venda de aço, destinação de pneus inteiros e destinação de subproduto de borracha (pneu triturado), foram baseados nos valores utilizados nos trabalhos de Lagarinhos (2011), Stark (2015) e Andrade, Jesus e Cruz (2015), atualizando-os pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), que é o indicador oficial do Governo Federal para aferição das metas inflacionárias.
- **Meta estabelecida para a destinação de pneus:** Nos relatórios do IBAMA há registro dos valores das metas de coleta e descarte estabelecidas para os últimos anos. A Tabela 12, mostra o valor da meta de coleta e descarte de pneus inservíveis para os produtores e importadores nos 7 últimos anos.

Tabela 12. Meta de descarte de pneus nos últimos 7 anos.

	2009-2010	2011	2012	2013	2014	2015
Metas Fabricantes (t.)	357.743	280.119	301.152	352.756	378.086	412.327
Metas Importadores (t.)	202.594	265.691	178.276	182.511	179.978	120.152
Meta (t.)	560.337	545.810	479.429	535.267	558.064	532.479
Porcentagem de variação	*	*	-12,16%	11,65%	4,26%	-4,58%

Fonte: IBAMA (2016).

- **Penalização:** No relatório do IBAMA (2016) consta o valor da multa aos importadores pelo não cumprimento da meta de descarte no ano de 2015. A quantidade de pneus pendentes para esse ano foi de 18.360,61 toneladas, e por causa disto, cinco empresas foram multadas com o valor de R\$25.086.000,00. Desta forma, considerou-se que a penalização pelo não cumprimento da meta de coleta é de R\$6.900 por tonelada pendente (valor médio).

Todos os valores relacionados com os parâmetros utilizados se encontram disponíveis nos Anexos.

Levando em conta que a quantidade de pneus descartados pode variar, e que somente se tem registro nos relatórios de IBAMA da quantidade total de pneus coletados, que pode ser menor que a quantidade total de pneus descartados nos ecopontos, foram geradas diferentes instâncias para representarem possíveis situações com diferentes quantidades de pneus inservíveis descartados nos ecopontos para cada um dos períodos de tempo considerados (bimestres).

Desta forma, dez grupos de instâncias foram gerados. Os grupos de instâncias resultaram da combinação de valores possíveis para a meta de destinação e quantidades de pneus descartados nos ecopontos, com base em dados históricos.

Os valores estabelecidos para a meta de destinação baseiam-se no valor da meta do ano 2015 (137.380 t.), esse valor com a maior porcentagem de aumento observado nos últimos 3 anos (153.385 t.) e com a menor porcentagem de decréscimo observado nos últimos 3 anos (131.088 t.). De modo semelhante, os valores estabelecidos para a quantidade de pneus descartados nos ecopontos baseiam-se no valor da quantidade de pneus inservíveis coletados para o ano 2015 (133.882 t.), esse valor com a maior porcentagem de aumento observado nos últimos 3 anos (148.328 t.) e com a menor porcentagem de decréscimo observado nos últimos 3 anos (127.549 t.). A Tabela 13 apresenta os valores da meta de destinação e quantidade de pneus descartados, e sua diferença em toneladas e porcentagem, para cada um dos grupos de instâncias utilizados para os experimentos computacionais.

Tabela 13. Pneus descartados e meta estabelecida dos grupos de instâncias.

Grupo de Instância	Quantidade de Pneus Descartados (t.)	Meta estabelecida (t.)	Relação	Diferença Meta-Descarte (t.)	*Diferença Meta-Descarte (%)
1	148.328	131.088	D > M	-17.240	-13.15%
2	148.328	137.380	D > M	-10.948	-7.97%
3	133.882	131.088	D > M	-2.794	-2.13%
4	133.882	133.882	D = M	0	0.00%
5	133.882	137.380	D < M	3.498	2.55%
6	127.550	131.088	D < M	3.538	2.70%
7	148.328	153.385	D < M	5.057	3.30%
8	127.550	137.380	D < M	9.830	7.16%
9	133.882	153.385	D < M	19.503	12.71%
10	127.550	153.385	D < M	25.835	16.84%

* A tabela está organizada de forma crescente com base na diferença da quantidade descartada e a Meta estabelecida.

Além da combinação de valores de meta e quantidades de pneus descartados, foram consideradas 4 possíveis distribuições de pneus inservíveis entre os ecopontos. Tais distribuições foram feitas de forma semelhante a Stark (2015), onde se considerou a *Frota de Veículos* dos municípios (IMP, 2017), para a distribuição de pneus entre os ecopontos. Desta forma, os fatores de variação considerados nesta geração de instâncias baseiam-se nos dados de *frota de veículos*, *IDHM*, *população* e *PIB* dos municípios com ecopontos (IMP, 2017). A expressão 24 mostra o cálculo da quantidade de pneus descartados por ecoponto:

$$ge_i = \left(\frac{\text{valor do fator de variação no município } i}{\text{somada dos valores do fator de variação de todos os municípios com Ecopontos}} \right) * \left(\begin{array}{l} \text{Quantidade de pneus} \\ \text{descartados no} \\ \text{Estado de São Paulo} \end{array} \right) \quad (24)$$

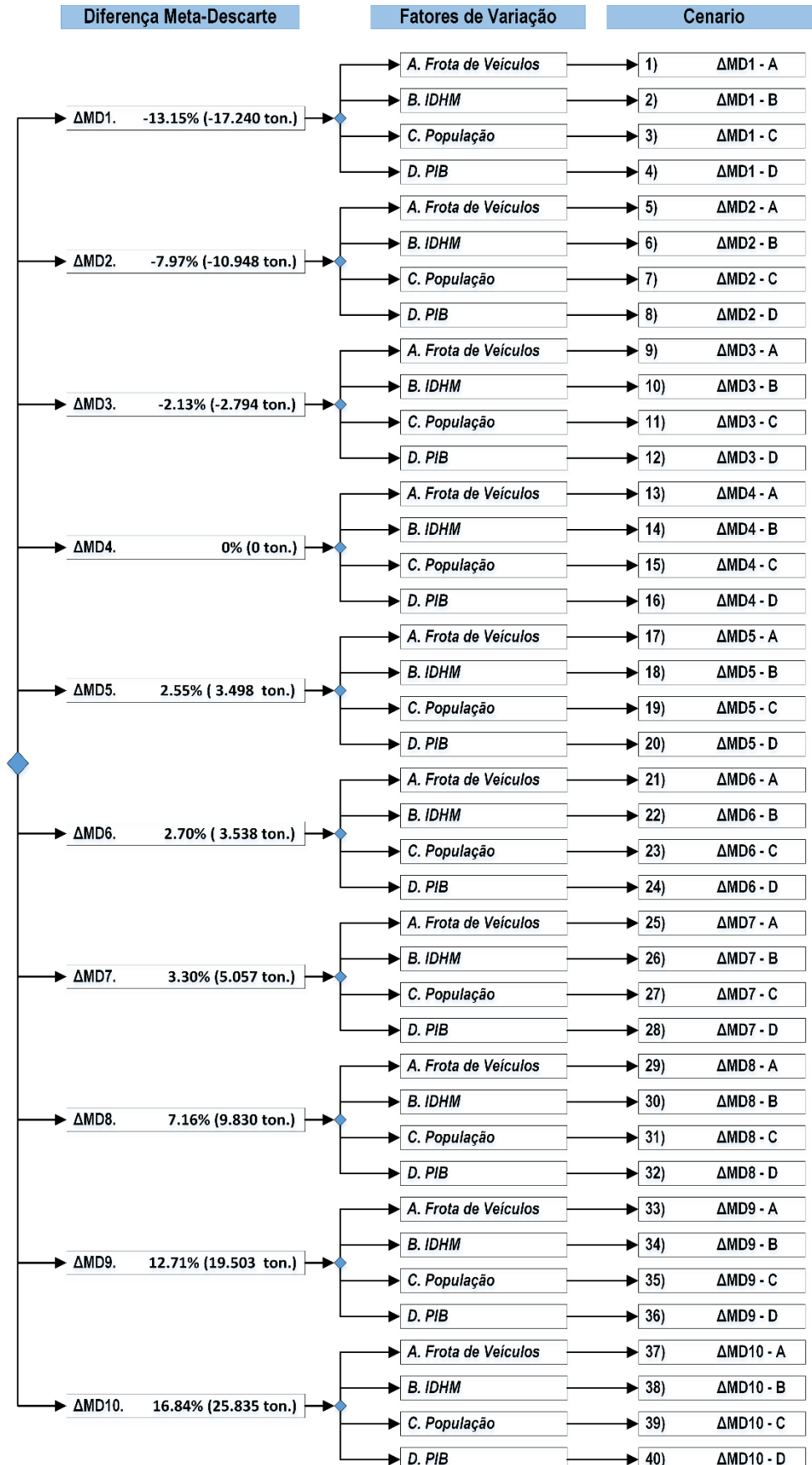
Onde, ge_i corresponde a quantidade de pneus descartados no município i durante todo o ano. No caso de existir mais de um ecoponto no município, a quantidade total é dividida entre o número de ecopontos do município. O horizonte de planejamento considerado foi de um ano dividido em 6 períodos (bimestres). Desta forma, foi utilizada uma porcentagem de variação bimestral para a distribuição dos pneus descartados em cada ecoponto entre os períodos de tempo, conforme a informação de venda de pneus apresentada no Livro Branco da Indústria de Pneus (ANIP, 2015), ver Anexos. A expressão 25 detalha o cálculo:

$$g_{it} = ge_i * \left(\begin{array}{l} \text{porcentagem estimada} \\ \text{para o período (bimestre)} \end{array} t \right) \quad (25)$$

Desta forma, foram geradas instâncias a partir da combinação das diferenças associadas aos diversos valores de meta de destinação e quantidades de pneus descartados observadas na Tabela 13, e nos 4 tipos de distribuição de pneus entre os ecopontos.

A Figura 13 apresenta as 40 instâncias testadas. Vale a pena ressaltar, que as instâncias consideradas se caracterizam por terem 412 ecopontos, 20 empresas de destinação final, 42 possíveis candidatos para instalação de centros intermediários e 6 períodos de tempo, e estarem representadas no modelo matemático por 178.075 restrições, e 126 variáveis binárias, 173.928 variáveis inteiras e 179.881 variáveis contínuas.

Figura 13. Árvore de cenários para os testes computacionais.

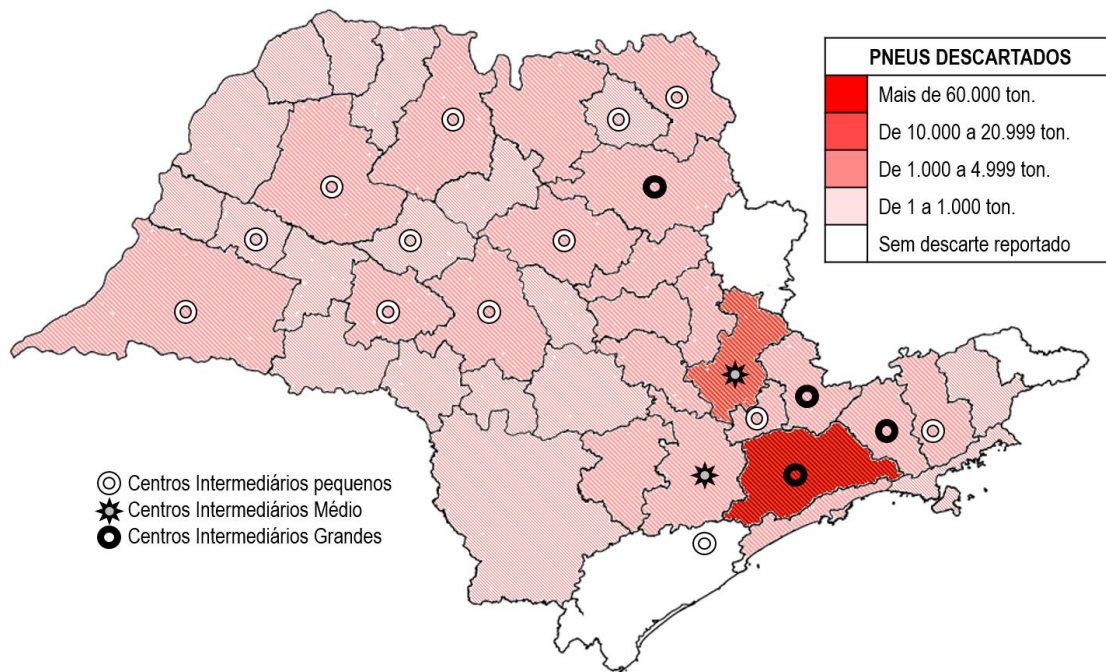


6.2 Resultados detalhados para instância base (Δ MD5-A)

Uma avaliação do modelo proposto foi feita utilizando a instância baseada nos dados estabelecidos para a meta de destinação e a quantidade de pneus coletados no ano 2015, e a distribuição de pneus inservíveis nos ecopontos segundo o fator de variação de *Frota de Veículos* (instância Δ MD5-A).

Foram obtidos resultados com *gap relativo* de 1,46% em 14.400 segundos. Os resultados indicam a abertura de 19 centros intermediários, sendo 13 de tamanho pequeno, 2 de tamanho médio e 4 de tamanho grande. A Figura 14 mostra a localização e o dimensionamento dos centros intermediários no Estado do São Paulo. Note que estes centros estão espalhados por todo o Estado, com maior presença e maior capacidade nas regiões com maior quantidade de pneus descartados (São Paulo, Bragança Paulista, São Jose dos Campos, Sorocaba, Campinas e Jundiaí).

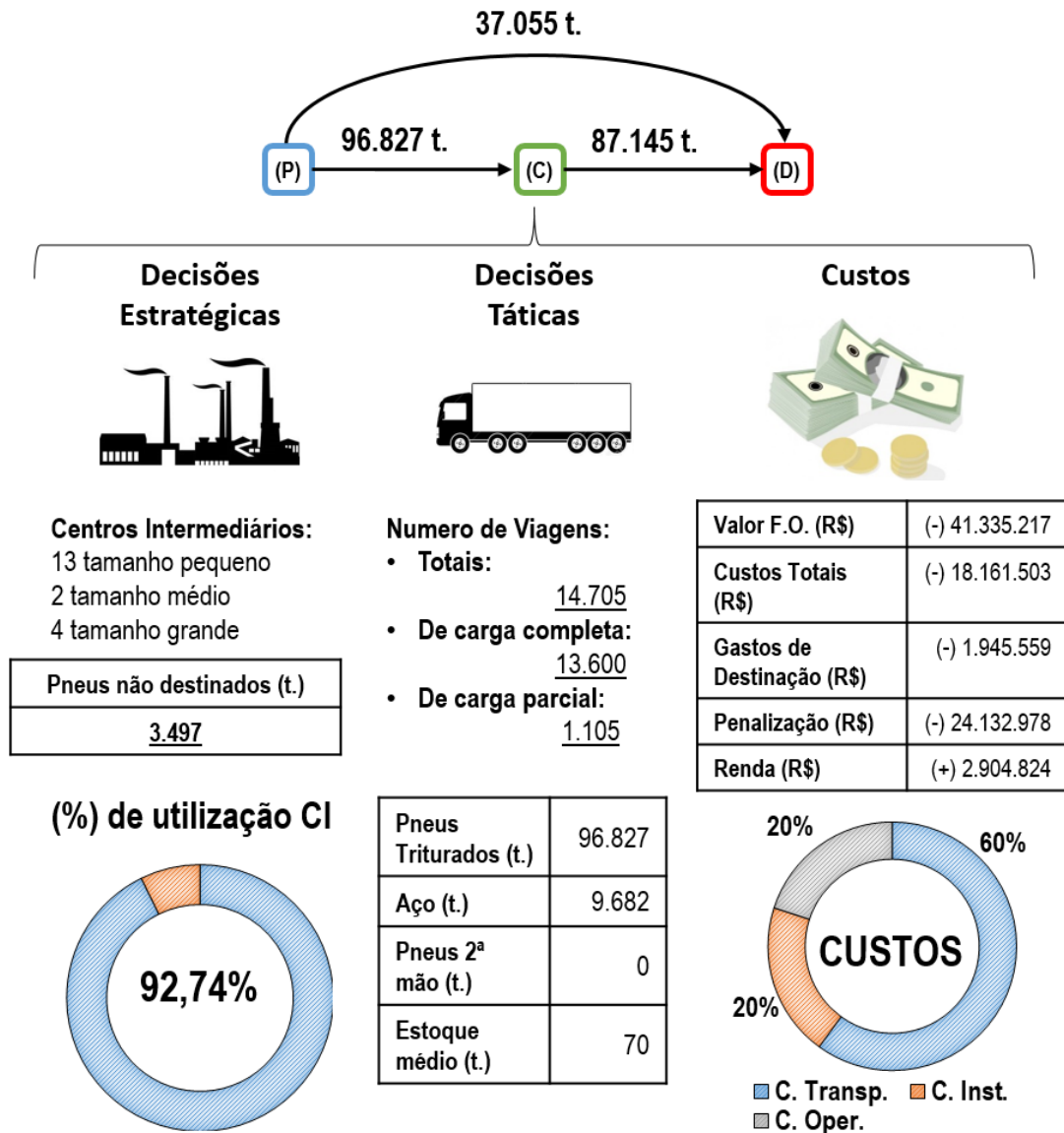
Figura 14. Localização de centros intermediários para a instâncias Δ MD5-A.



A Figura 15 ilustra de forma sintética os resultados gerais obtidos pelo modelo para esta instância, mostrando os fluxos de pneus entre os agentes da rede, as decisões estratégicas de localização, dimensionamento e porcentagem de utilização de centros intermediários a instalar, as decisões táticas de número de viagens realizadas e veículos utilizados, quantidade de pneus a triturar e pneus a vender como servíveis no mercado secundário,

estoque médio de pneus, os custos totais do sistema de rede reversa, e finalmente, a porcentagem de participação dos custos de transporte, abertura de centros intermediários e operação nos centros intermediários (triagem, trituração e estocagem), nos custos totais.

Figura 15. Síntese dos resultados gerais da instância Δ MD5-A.



Analisando a porcentagem de utilização da capacidade de trituração atribuída aos centros, nota-se que os centros de tamanho pequeno tiveram uma porcentagem média de utilização da capacidade de 83,81%, e os centros de tamanho médio e grande utilizam 100% da capacidade instalada.

O modelo sugere a coleta de todos os pneus descartados nos ecopontos, e não indica a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário. Este resultado já era esperado

devido a duas razões: a quantidade de pneus descartados ser menor que a meta estabelecida e a penalização pelo não cumprimento da meta ser maior que o valor de venda de pneus servíveis.

A multa pelo não cumprimento da meta é de R\$ 24.132.978, que corresponde a 3.497,5 toneladas de pneus pendentes para atingir a meta de descarte estabelecida. Vale a pena ressaltar, que todos os pneus enviados aos centros intermediários são triturados e não ocorre envio de pneus inteiros dos centros às plantas de destinação final.

No que se refere aos custos totais, os custos de transporte foram os mais representativos (60,04%), seguidos pelos custos de operação nos centros intermediários (20%), e por último, os custos de abertura de instalações (19,96%).

Em relação ao transporte, são necessárias 14.705 viagens, das quais 13.600 utilizam veículos em sua capacidade máxima de carga e 1.105 utilizam a capacidade parcial dos veículos, com uma média de utilização de 97,96%.

Conforme apresentado na Figura 15, ocorre uma maior quantidade de fluxo de pneus dos ecopontos (P) para os centros intermediários (C), 96.827,5 toneladas de pneus e 9.054 viagens. Dos ecopontos (P) às empresas de destinação final (D) são transportadas 37.055 toneladas de pneus, utilizando 3.449 viagens. Dos centros intermediários (C) às empresas de destinação final (D) são transportadas 87.144,7 toneladas, utilizando 2.202 viagens. Note que há uma diferença entre a quantidade total de pneus que chegam aos centros intermediários P-C (96.827,5 t.) e a quantidade total de pneus que saem dos centros intermediários C-D (87.147,7 t.). Esta diferença corresponde a porcentagem de aço dos pneus que é separada antes do processo de trituração (9.682 t.). O custo total de transporte do sistema é de R\$ 10.904.679, sendo que R\$ 5.530.345 corresponde ao trecho P-C, R\$ 2.333.749 corresponde ao trecho P-D e R\$ 3.040.585 corresponde ao trecho C-D.

A estratégia de manter pneus em estoque é utilizada tanto nos ecopontos como nos centros intermediários, em todos os períodos de tempo do horizonte de planejamento. Os estoques são necessários devido às limitações de capacidade de processamento dos centros intermediários e das plantas de destinação final, e também para a consolidação da carga. Nos resultados desta instância observa-se uma média de estoque de pneus nos ecopontos de 2.366 toneladas e nos centros intermediários de 70,6 toneladas. Vale a pena ressaltar que o estoque nos centros intermediários é composto unicamente por pneus triturados.

A Tabela 14 apresenta o fluxo de pneus entre os agentes da rede para cada período de tempo, assim como os estoques nos ecopontos e centros intermediários, a quantidade de aço vendido, e o número de viagens realizadas.

Tabela 14. Resultados dos fluxos da instância Δ MD5-A, detalhados por período.

Per.	Pneus descartados (t.)	Estoque em P (t.)	Fluxo		Pneus Triturados (t.)	Aço (t.)	Fluxo C-D (t.)	Estoque em C (t.)	Número de viagens		
			P-D (t.)	P-C (t.)					P-C	P-D	C-D
1	21.828	2.126	4.316	15.387	15.387	1.539	13.733	115	1.431	399	347
2	21.903	2.936	5.286	15.806	15.806	1.581	14.306	35	1.473	485	362
3	22.069	3.678	5.570	15.756	15.756	1.576	14.094	121	1.478	517	355
4	21.075	2.953	5.446	16.355	16.355	1.635	14.841	-	1.530	512	376
5	23.004	2.507	6.563	16.887	16.887	1.689	15.046	153	1.582	610	379
6	24.003	0	9.873	16.636	16.636	1.664	15.125	-	1.560	926	383

Nota-se, na Tabela 14 que o fluxo de pneus, e as atividades dos centros intermediários foram de certa forma semelhantes para todos os períodos de tempo. O número de viagens por período realizados nos trechos P-C, P-D e C-D foi muito parecido, no caso dos trechos P-C a quantidade média de viagens por período foi de 1.509 viagens, nos trechos P-D foi de 575 viagens e nos trechos C-D foi de 367 viagens.

No que se refere à quantidade de pneus triturados, o período que apresentou a menor quantidade foi o primeiro com 15.387 toneladas, e o período que apresentou a maior quantidade foi o penúltimo com 16.887 toneladas. Em relação às quantidades em estoque nos centros intermediários, no quinto período ocorre uma quantidade maior de pneus em estoque, 153 toneladas. Os últimos períodos de tempo foram os que tiveram maior fluxo de pneus, pois nestes períodos de tempo a quantidade de descarte de pneus nos ecopontos é maior.

A Tabela 15 mostra uma síntese do envio de pneus inservíveis às empresas de destinação final, detalhando a capacidade das empresas, e a quantidade de pneus triturados e inteiros destinados.

Tabela 15. Síntese do envio de pneus às empresas de destinação final.

Empresa de destinação Final	Custo de destinação Pneus (R\$/t.)		Capacidade (t.)	Quantidade de pneus destinados (t.)		Capacidade disponível (t.)
	Tipo de Destinação	Inteiros		Triturados	Inteiros	
Granulação	101.65	0	47.847	25.340	585	21.922
Granulação	50.83	0	23.732	16.805	2.022	4.905
Granulação	50.83	0	25.937	12.577	13.360	0
Co-Processamento	50.83	0	20.855	10.298	10.550	7
Granulação	50.83	0	3.787	738	3.046	2
Granulação	50.83	0	14.047	1.171	124	12.752
Co-Processamento	50.83	0	15.725	14.735	923	66
Granulação	50.83	0	4.794	872	3.873	48
Granulação	50.83	0	2.062	0	2.059	3
Granulação	50.83	0	5.370	1.791	927	2.652
Granulação	50.83	0	479	0	471	8
Laminação	203.31	-	1.966	0	375	1.591
Granulação	50.83	0	863	264	101	498
Granulação	50.83	0	719	0	719	0
Granulação	50.83	0	431	0	419	12
Laminação	203.31	-	431	0	0	431
Pirólise	117.7	18	336	0	313	23
Laminação	203.31	-	23.731	0	24	23.707
Laminação	203.31	-	431	0	0	431
Laminação	203.31	-	431	0	0	431
TOTAL	-	-	193.974	84.593	39.890	69.775

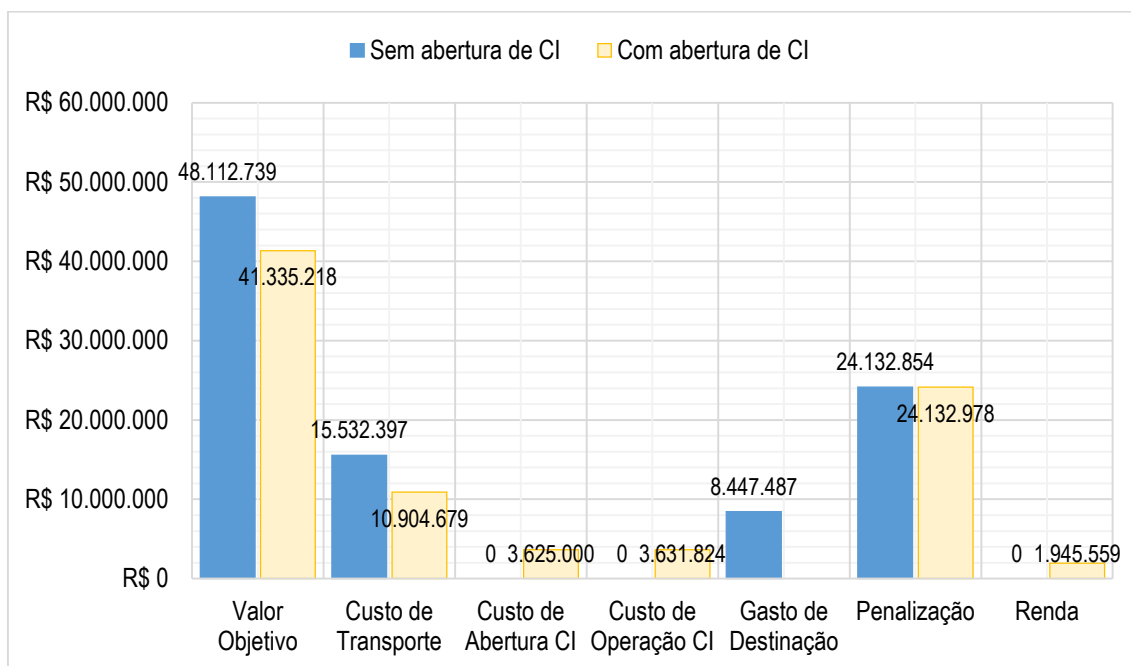
A capacidade das empresas de destinação final para todo o horizonte de planejamento é de 193.974 toneladas e a quantidade de pneus inservíveis destinados é de 124.199 toneladas, ou seja, a capacidade total de destinação é suficiente. Logo, detalhando cada uma das empresas de destinação final independentemente, pode ser observado que o modelo não envia pneus para algumas empresas, já que o custo de destinação nestas é maior. As empresas de laminação (D16, D18, D19 e D20) caracterizam-se por receber somente pneus inteiros e tem um custo alto de destinação (LAGARINHOS, 2011), desta forma o modelo as considera como última opção no envio de pneus. As empresas de co-processamento, por outro lado, apresentam os menores custos de destinação, R\$50,83 para pneus inteiros e R\$0 para pneus triturados, e por isso, foram as mais consideradas para a destinação dos pneus.

6.3 Comparação com o planejamento sem abertura de C.I. (Rede Atual)

Com o objetivo de detalhar os benefícios da utilização de Centros Intermediários foram realizados experimentos computacionais da instâncias base (instância Δ MD5-A)

considerando o planejamento sem a abertura destas instalações. Os resultados mostraram múltiplas diferenças relacionadas ao valor da função objetivo, custos de transporte e gastos de destinação. A Figura 16, mostra uma comparação dos resultados gerais da instancia base, sem e com consideração da abertura de centros intermediários.

Figura 16. Comparação dos resultados do planejamento com e sem abertura de CI.



Conforme apresentado na Figura 16 o valor da função objetivo alcançado com a consideração de abertura de centros intermediários é menor em comparação com o planejamento da rede reversa sem estas instalações. Ao não existirem centros intermediários, os pneus em seu estado inteiro são enviados diretamente dos ecopontos às plantas de destinação final, isto acarreta custos de transporte maiores, uma vez não se apresentou fragmentação e redução do tamanho dos pneus. Em relação aos gastos de destinação, no planejamento sem abertura de centros intermediários se apresentaram os maiores gastos, isso devido ao fato que é mais custoso destinar pneus inteiros do que triturados. Adicionalmente, o planejamento sem abertura de centros intermediários não gerou receita, com a abertura dos centros intermediários se conseguiu uma receita de R\$1.945.559 decorrente da venda do aço tirado dos pneus no processo de trituração. Desta forma, foi evidenciado ainda mais, as vantagens da abertura de centros intermediários na rede de logística reversa de pneus inservíveis.

6.4 Comparação com abordagens da literatura

Com o objetivo de avaliar a consideração de uma abordagem multiperíodo que incorpore, decisões táticas e estratégicas da rede reversa, em comparação com as abordagens monopерíodo, foram realizados experimentos computacionais considerando algumas informações agregadas em um ano. Ou seja, as quantidades de pneus descartados, as capacidades de processamento das instalações e os custos de estoque da instância detalhada na seção anterior (instância Δ MD5-A) foram consideradas de forma agregada. Desta forma, esta instância foi resolvida utilizando uma abordagem monopерíodo do modelo proposto e pelo modelo de Stark (2015). A Tabela 16 sintetiza todas as decisões em cada uma das abordagens a comparar.

Tabela 16. Decisões abordadas pelos modelos a comparar.

	Decisões	Modelo Multiperíodo para decisões estratégico táticas na LR de pneus no Brasil	Modelo monopерíodo para decisões estratégico táticas na LR de pneus no Brasil	Modelo Stark (2015)
Estratégicas	Localização de instalações a serem abertas	√	√	√
	Dimensionamento de instalações a serem abertas	√	√	√
	Fluxo anual de pneus entre os agentes de rede reversa	√	√	√
	Quantidade de pneus a triturar anualmente	√	√	√
	Quantidade de pneus a estocar anualmente	√	√	√
	Venda de pneus servíveis no mercado secundário anualmente	√	√	√
	Venda de aço anualmente	√	√	√
	Quantidade de pneus pendentes para cumprir meta	√	√	√
	Utilização de veículos de transporte anualmente	√	√	
Táticas (Por período)	Utilização de veículos de transporte	√		
	Fluxo de pneus entre os agentes de rede reversa	√		
	Quantidade de pneus a triturar	√		
	Quantidade de pneus a estocar	√		
	Venda de pneus servíveis no mercado secundário	√		
	Venda de aço	√		

6.4.1 Abordagem Monoperíodo

Ao utilizar o modelo proposto para solucionar a instância de informação agregada, foi encontrado um resultado ótimo em aproximadamente 72 segundos. Os resultados detalhados deste teste computacional são apresentados no Apêndice C.

O resultado desta abordagem indica a abertura de 14 centros intermediários de tamanho pequeno, 2 de tamanho médio e 4 de tamanho grande. Em relação à capacidade de trituração dos centros intermediários, os centros de médio e grande porte tem uma

porcentagem de utilização de 100%, e os centros pequenos tem uma porcentagem média de 84,02% de utilização. Os locais escolhidos para abertura de centros intermediários de tamanho médio e grande foram os mesmos locais escolhidos pela abordagem multiperíodo. Quanto aos centros intermediários de tamanho pequeno, 11 locais candidatos para abertura foram escolhidos em ambas abordagens (monoperíodo e multiperíodo). Desta forma, estes resultados indicam em termos de localização de centros intermediários, que ambas abordagens sugerem a escolha de quase os mesmos locais candidatos para instalação.

De forma semelhante à abordagem multiperíodo, o modelo sugere a coleta de todos os pneus descartados nos ecopontos, não indica a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário, todos os pneus enviados aos centros intermediários são triturados e não são enviados pneus inteiros dos centros às empresas de destinação final.

Adicionalmente, o fluxo de pneus entre agentes tem a mesma tendência que na abordagem multiperíodo, dos ecopontos (P) aos centros intermediários (C) foi enviada a maior quantidade de pneus inservíveis, seguido da quantidade de pneus enviada dos centros intermediários (C) às plantas de destinação final (D), e por último a quantidade enviada dos ecopontos (P) às plantas de destinação final (D).

No que se refere aos custos totais do sistema, os custos de transporte (58,74%) foram os mais representativos, seguidos por os custos de abertura dos centros intermediários (20,63%), e por último, os custos de operação (20,62%). Uma distribuição de custos de similar à observada na abordagem multiperíodo.

Apesar das abordagens multiperíodo e monoperíodo considerarem informações de forma diferente, os resultados gerais para esta instância foram relativamente similares. As vantagens da abordagem multiperíodo estão relacionadas com as decisões de caráter tático. Com a abordagem multiperíodo é possível definir as atividades a realizar (triagem, trituração, transporte, etc.) para cada bimestre, levando em conta as disponibilidades dos centros intermediários e capacidade dos veículos de carga.

As decisões de estoques permitem ao modelo a alternativa de transportar e processar os pneus em diferentes períodos de tempo, na abordagem monoperíodo, não são considerados estoques, todos os pneus são transportados e processados no único período

de tempo. Estes resultados mostram que, caso a variação na quantidade descartada nos diferentes períodos seja pequena, a abordagem monopériodo pode ser vantajosa.

6.4.2 Comparação com resultados do modelo de Stark (2015)

Diferentemente do modelo proposto nesta dissertação, o modelo de Stark (2015) considera apenas as decisões de localização e as decisões de fluxo de pneus entre os agentes. As decisões para operação nos centros intermediários (triagem e trituração) são dadas para períodos de tempo maiores (anuais), e além disso, considera a abertura de 2 tipos de centros intermediários (centros de armazenagem e centros de trituração). Desta forma, para testar este modelo foram considerados os 221 municípios que possuem ecopontos como possíveis locais para a abertura de centros de armazenamento (K), e as 42 regiões de governo como possíveis locais para a abertura de centros de trituração (C). O resultado ótimo foi encontrado em aproximadamente 13 segundos. No Apêndice D estes resultados são apresentados mais detalhadamente.

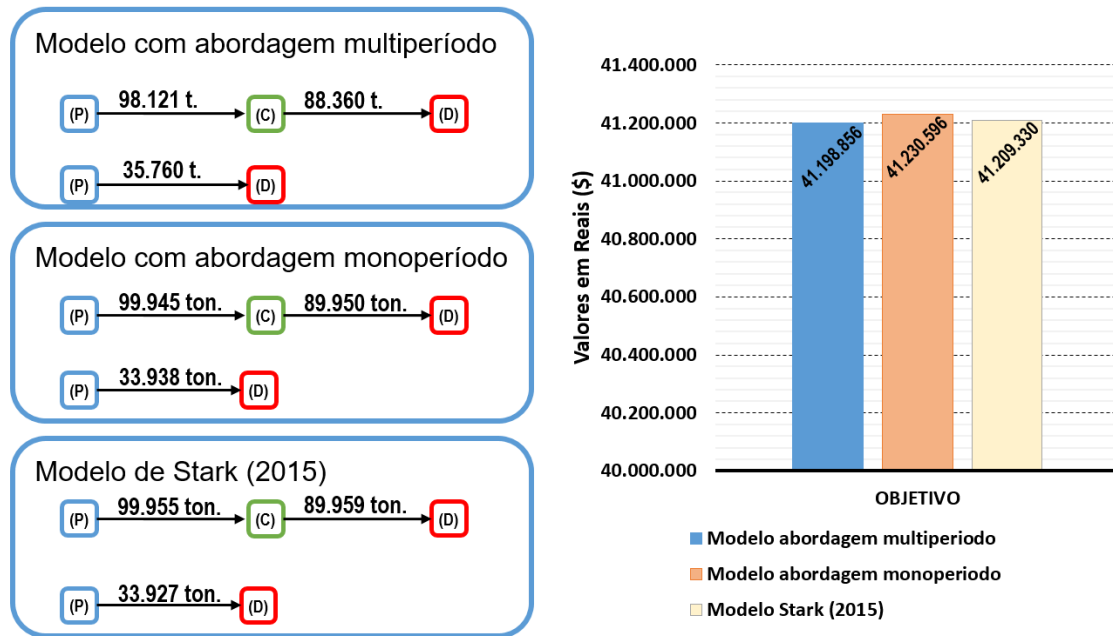
O resultado obtido não indica a abertura de centros de armazenagem, mas apenas a abertura de centros de trituração, especificamente, 14 de tamanho pequeno, 2 de tamanho médio e 4 de tamanho grande. São escolhidos os mesmos locais candidatos para abertura de centros intermediários de tamanho médio e grande, em comparação com as abordagens multiperíodo e monopériodo do modelo proposto. No que se refere aos centros intermediários pequenos foram escolhidos 12 locais, que coincidem com os escolhidos na abordagem multiperíodo do modelo proposto.

De forma geral, as decisões relacionadas com a coleta, destinação e fluxo de pneus foram muito similares às mostradas pelas abordagens multiperíodo e monopériodo do modelo proposto.

Logo, levando em conta que a abordagem monopériodo proposta e o modelo de Stark (2015) fornecem apenas decisões estratégicas, realizou-se uma comparação com estas abordagens utilizando as decisões estratégicas fornecidas por elas para resolver o problema tático. Desta forma, se fixaram as decisões de localização obtidas nos experimentos anteriores e se resolveu o modelo multiperíodo. A Figura 17 mostra os

resultados gerais obtidos na comparação das decisões estratégicas das 3 abordagens consideradas.

Figura 17. Fluxos e objetivos obtidos na comparação das 3 abordagens.



Nota-se, na Figura 17, que o valor da função objetivo ao resolver o problema tático considerando fixas as decisões estratégicas da abordagem monopériodo e do modelo de Stark (2015) é maior ao valor da função objetivo ao resolver o problema tático considerando fixas as decisões estratégicas obtidas inicialmente com o modelo multiperíodo. Estes resultados indicam que considerar uma abordagem multiperíodo leva a melhores decisões estratégicas (abertura de centros intermediários) em relação aos custos logísticos da rede.

6.5 Avaliação das abordagens Heurísticas

O modelo proposto é difícil de ser resolvido para dados reais, assim no capítulo 5 foram propostos heurísticas baseadas nos algoritmos *fix-and-optimize* and *relax-and-fix*, para resolvê-lo.

Antes da execução dos experimentos computacionais com os métodos heurísticos propostos foram realizados testes preliminares da instancia base (instância Δ MD5-A),

com o objetivo de determinar a melhor configuração do pacote CPLEX para abordar o problema e o modelo da forma mais eficiente. Assim, em relação ao algoritmo usado na resolução do subproblema MIP inicial, consideraram-se as configurações: *default* (escolha automática), *primal simplex*, *dual simplex*, *barrier* e *concurrent* (vários algoritmos de uma só vez). Do mesmo modo, em relação às estratégias para abordar o problema MIP no CPLEX, consideraram-se as configurações: geração agressiva de cortes (*mircuts 2*), de utilização de heurística de ramificação local (*lbheur 1*), de não utilização da heurística de busca de vizinhança induzida por relaxamento (*rinsheur -1*) e de escolha do próximo nó a testar quando é o nó do melhor limitante (*nodeselect 2*). Os resultados destes testes preliminares estão detalhados no Apêndice B.

Desta forma, os testes computacionais foram realizados utilizando a melhor configuração do CPLEX obtida nos testes preliminares: a utilização da estratégia do uso de vários algoritmos de uma só vez para resolver o MIP inicial (*concurrent*); e a geração agressiva de cortes em relação às estratégias para abordar o problema MIP do CPLEX.

A seguir são apresentados os resultados obtidos com os 9 métodos heurísticos propostos para as 40 instâncias geradas. A Tabela 17 mostra os resultados da heurística de decomposição, e das heurísticas FO01, FO02 e FO03. A Tabela 18, mostra os resultados das heurísticas RF-01, RF-02, RF-03, RF-04 e RF-05.

Tabela 17. Resultados do método de decomposição e as heurísticas FO01, FO02 e FO03.

INSTÂNCIA	CPLEX (Tempo Limite 4 Horas)			DECOMPOSIÇÃO EM DUAS FASES			FO01			FO02			FO03		
	F.O.	LIMITANTE	Gap (%)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)
ΔMD1-A	-8.416.550	-9.037.299	7,38	-8.594.813	5,15	14.400	-8.388.403	7,74	7.215	-8.430.756	7,19	7.459	-8.485.427	6,50	14.400
ΔMD1-B	-3.431.514	-4.052.221	18,09	-3.801.826	6,59	14.400	-3.488.668	16,15	7.301	-3.457.076	17,22	12.017	-3.501.442	15,73	14.400
ΔMD1-C	-8.490.689	-9.351.564	10,14	-8.923.535	4,80	14.400	-8.630.477	8,36	7.216	-8.610.494	8,61	7.388	-8.661.936	7,96	14.400
ΔMD1-D	-7.839.573	-8.933.647	13,96	-8.424.161	6,05	14.400	-8.056.691	10,88	7.216	-8.009.743	11,53	7.346	-8.077.890	10,59	14.400
ΔMD2-A	1.478.114	936.120	36,67	1.339.764	30,13	14.400	2.190.947	57,27	7.218	2.382.876	60,71	12.009	2.256.089	58,51	14.400
ΔMD2-B	6.443.341	6.017.708	6,61	6.311.950	4,66	14.400	6.908.094	12,89	7.217	7.061.103	14,78	12.034	6.989.131	13,90	14.400
ΔMD2-C	1.375.634	562.040	59,14	974.097	42,30	14.400	1.109.025	49,32	7.227	1.104.166	49,10	12.008	1.042.756	46,10	14.400
ΔMD2-D	1.649.692	973.209	41,01	1.478.914	34,19	14.400	1.489.965	34,68	7.234	1.488.674	34,63	9.406	1.485.366	34,48	14.400
ΔMD3-A	12.769.903	12.039.408	5,72	12.460.696	3,38	14.400	13.055.033	7,78	7.213	12.955.336	7,07	7.413	12.934.612	6,92	14.400
ΔMD3-B	18.542.835	17.018.752	8,22	17.408.188	2,24	14.400	17.653.629	3,60	7.209	17.692.099	3,81	8.488	17.739.871	4,06	14.400
ΔMD3-C	12.385.029	11.669.325	5,78	12.075.339	3,36	14.400	12.239.977	4,66	7.211	12.230.866	4,59	7.312	12.159.527	4,03	14.400
ΔMD3-D	13.982.686	12.099.667	13,47	12.548.010	3,57	14.400	13.106.061	7,68	7.212	12.994.359	6,89	7.519	12.966.071	6,68	14.400
ΔMD4-A	17.384.192	16.610.628	4,45	17.024.690	2,43	3.965	17.384.192	4,45	7.208	17.304.689	4,01	9.604	17.242.215	3,66	14.400
ΔMD4-B	22.318.909	21.739.575	2,60	22.137.091	1,80	14.400	22.578.777	3,72	7.211	22.521.158	3,47	12.014	22.359.709	2,77	14.400
ΔMD4-C	17.040.898	16.240.004	4,70	16.613.485	2,25	6.827	17.275.535	5,99	7.211	17.113.101	5,10	10.089	17.032.314	4,65	13.493
ΔMD4-D	17.840.783	16.700.936	6,39	17.150.235	2,62	14.400	17.702.543	5,66	7.209	17.705.940	5,68	7.423	17.635.110	5,30	14.400
ΔMD5-A	41.335.218	40.801.520	1,29	41.168.313	0,89	5.196	42.133.725	3,16	7.205	42.014.656	2,89	7.321	41.571.896	1,85	7.412
ΔMD5-B	46.578.214	45.878.404	1,50	46.255.841	0,82	1.178	46.631.866	1,62	7.205	46.528.370	1,40	7.342	46.480.648	1,30	8.678
ΔMD5-C	41.080.621	40.363.811	1,74	40.758.870	0,97	2.721	41.121.965	1,84	7.203	41.031.913	1,63	7.207	40.862.649	1,22	7.356
ΔMD5-D	41.540.561	40.878.322	1,59	41.290.918	1,00	2.725	42.219.020	3,18	7.205	41.994.581	2,66	7.210	41.820.948	2,25	7.398
ΔMD6-A	41.069.629	40.151.034	2,24	40.654.058	1,24	2.382	41.341.586	2,88	7.205	41.156.233	2,44	7.253	40.835.421	1,68	7.388
ΔMD6-B	45.819.830	45.036.942	1,71	45.454.170	0,92	1.018	45.850.580	1,77	7.205	45.724.941	1,50	7.361	45.727.311	1,51	7.513
ΔMD6-C	40.999.895	39.834.707	2,84	40.240.088	1,01	3.029	40.840.844	2,46	7.205	40.668.493	2,05	7.216	40.495.295	1,63	7.330
ΔMD6-D	41.381.055	40.332.751	2,53	40.774.816	1,08	2.431	41.172.513	2,04	7.205	41.078.093	1,81	7.260	40.974.169	1,57	7.388
ΔMD7-A	54.754.735	53.453.647	2,38	53.894.051	0,82	867	54.683.446	2,25	7.205	54.378.776	1,70	7.210	54.208.848	1,39	7.331
ΔMD7-B	59.974.701	59.028.506	1,58	59.390.397	0,61	370	60.125.070	1,82	7.205	59.841.038	1,36	7.464	59.630.118	1,01	10.513
ΔMD7-C	53.682.130	53.004.236	1,26	53.452.365	0,84	949	53.825.544	1,53	7.205	53.825.544	1,53	7.204	53.825.544	1,53	7.209
ΔMD7-D	54.953.984	53.472.848	2,70	53.932.124	0,85	1.485	54.294.665	1,51	7.205	54.294.665	1,51	7.203	54.150.384	1,25	7.378
ΔMD8-A	84.677.568	83.635.949	1,23	84.088.844	0,54	418	84.541.990	1,07	7.203	84.541.990	1,07	7.203	84.338.215	0,83	7.209
ΔMD8-B	89.370.441	88.445.409	1,04	88.780.013	0,38	65	89.507.513	1,19	7.205	89.507.513	1,19	7.205	89.322.815	0,98	7.212
ΔMD8-C	84.090.439	83.268.560	0,98	83.659.864	0,47	125	84.090.439	0,98	7.205	84.090.439	0,98	7.204	84.090.439	0,98	7.203
ΔMD8-D	84.789.442	83.655.585	1,34	84.189.923	0,63	551	84.788.864	1,34	7.203	84.788.864	1,34	7.203	84.788.864	1,34	7.207
ΔMD9-A	151.805.663	151.214.386	0,39	151.625.608	0,27	32	151.927.604	0,47	7.205	151.927.604	0,47	7.203	151.927.604	0,47	7.203
ΔMD9-B	156.989.678	156.292.673	0,44	156.663.098	0,24	40	156.989.678	0,44	7.205	156.989.678	0,44	7.205	156.989.678	0,44	7.204
ΔMD9-C	151.723.341	150.845.629	0,58	151.243.406	0,26	34	152.376.278	1,00	7.205	152.376.278	1,00	7.204	152.376.278	1,00	7.203
ΔMD9-D	152.071.407	151.315.724	0,50	151.730.583	0,27	38	152.025.499	0,47	7.204	152.025.499	0,47	7.203	152.025.499	0,47	7.203
ΔMD10-A	195.297.350	194.067.100	0,63	194.533.013	0,24	30	195.197.771	0,58	7.205	195.197.771	0,58	7.203	195.197.771	0,58	7.203
ΔMD10-B	199.968.544	198.937.628	0,52	199.224.182	0,14	31	199.968.544	0,52	7.205	199.968.544	0,52	7.205	199.968.544	0,52	7.204
ΔMD10-C	194.954.857	193.729.174	0,63	194.144.478	0,21	31	194.867.093	0,58	7.205	194.867.093	0,58	7.204	194.867.093	0,58	7.203
ΔMD10-D	194.702.941	194.095.319	0,31	194.627.408	0,27	30	195.331.727	0,63	7.203	195.331.727	0,63	7.203	195.331.727	0,63	7.203

Nota: Os valores ressaltados com **NEGRITO**, destacam os melhores resultados obtidos para cada instância. Com o método de decomposição em duas fases foram obtidas os melhores resultados de 27 instâncias

Tabela 18. Resultados das heurísticas RF01, RF02, RF03, RF04 e RF05.

INSTÂNCIA	CPLEX (Tempo Limite 4 Horas)			RF01			RF02			RF03			RF04			RF05		
	F.O.	LIMITANTE	Gap (%)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)	F.O.	Gap (%)	Tempo (s)
ΔMD1-A	-8.592.433	-9.037.299	5,18	-8.543.256	5,78	2.425	-8.400.055	7,59	4.861	-8.627.797	4,75	14.521	-8.615.984	4,89	14.425	-8.622.938	4,81	5.413
ΔMD1-B	-3.431.514	-4.052.221	18,09	-3.749.281	8,08	2.433	-3.364.966	20,42	4.892	-3.796.155	6,75	14.637	-3.440.108	17,79	14.425	-3.802.576	6,57	5.150
ΔMD1-C	-8.574.345	-9.351.564	9,06	-8.846.487	5,71	2.422	-8.617.397	8,52	4.867	-8.971.938	4,23	14.147	-8.925.300	4,78	14.425	-8.912.596	4,93	3.552
ΔMD1-D	-8.043.037	-8.933.647	11,07	-8.405.328	6,29	2.426	-8.140.029	9,75	4.867	-8.457.165	5,63	14.444	-8.428.634	5,99	14.434	-8.460.063	5,60	3.139
ΔMD2-A	1.444.404	936.120	35,19	1.288.101	27,33	2.467	1.712.456	45,33	4.877	1.295.450	27,74	14.408	1.673.259	44,05	14.426	1.269.283	26,25	14.486
ΔMD2-B	6.443.341	6.017.708	6,61	6.326.218	4,88	2.439	6.696.579	10,14	4.824	6.272.367	4,06	14.557	6.487.371	7,24	14.425	6.260.717	3,88	6.139
ΔMD2-C	1.142.576	562.040	50,81	1.014.309	44,59	2.438	1.289.381	56,41	4.902	989.897	43,22	14.633	1.121.313	49,88	14.427	999.821	43,79	14.400
ΔMD2-D	1.614.090	973.209	39,71	1.469.137	33,76	2.434	1.760.280	44,71	4.891	1.426.131	31,76	14.406	1.519.272	35,94	14.424	1.440.826	32,45	14.401
ΔMD3-A	12.769.903	12.039.408	5,72	12.669.169	4,97	2.425	12.867.511	6,44	4.850	12.508.094	3,75	14.501	12.513.093	3,79	14.425	12.487.627	3,59	4.732
ΔMD3-B	17.739.871	17.018.752	4,06	17.575.185	3,17	2.429	17.501.264	2,76	4.811	17.348.056	1,90	14.611	17.506.269	2,78	14.426	17.427.593	2,35	8.144
ΔMD3-C	12.297.505	11.669.325	5,11	12.227.403	4,56	2.423	12.253.428	4,77	4.852	12.085.830	3,45	14.410	12.227.789	4,57	14.425	12.134.342	3,83	3.053
ΔMD3-D	13.204.457	12.099.667	8,37	12.733.637	4,98	2.424	12.914.218	6,31	4.813	12.616.489	4,10	14.403	12.677.225	4,56	14.425	12.642.239	4,29	3.219
ΔMD4-A	17.341.829	16.610.628	4,22	17.240.406	3,65	2.424	17.444.089	4,78	4.818	17.038.480	2,51	14.028	17.398.581	4,53	14.425	17.080.831	2,75	5.492
ΔMD4-B	22.095.075	21.739.575	1,61	22.289.791	2,47	1.346	22.322.592	2,61	4.809	22.095.548	1,61	14.405	22.517.548	3,45	14.421	22.218.905	2,16	1.549
ΔMD4-C	16.901.079	16.240.004	3,91	16.864.009	3,70	2.422	16.924.474	4,04	4.812	16.620.943	2,29	3.707	16.702.598	2,77	14.427	16.741.326	2,99	4.306
ΔMD4-D	17.359.718	16.700.936	3,79	17.327.230	3,61	2.424	17.666.780	5,47	4.812	17.161.067	2,68	14.402	17.284.283	3,38	14.425	17.240.221	3,13	9.443
ΔMD5-A	41.335.218	40.801.520	1,29	41.781.035	2,34	2.074	41.572.618	1,85	4.807	41.153.644	0,86	1.184	41.229.223	1,04	11.678	41.342.632	1,31	5.497
ΔMD5-B	46.578.214	45.878.404	1,50	46.785.107	1,94	466	46.556.326	1,46	4.807	46.267.076	0,84	788	46.228.381	0,76	14.418	46.442.606	1,21	3.617
ΔMD5-C	41.080.621	40.363.811	1,74	41.295.777	2,26	1.749	41.325.759	2,33	4.809	40.787.927	1,04	2.835	41.291.101	2,25	14.422	40.948.874	1,43	4.713
ΔMD5-D	41.540.561	40.878.322	1,59	41.923.936	2,49	2.420	41.829.790	2,27	4.807	41.400.776	1,26	2.908	41.324.599	1,08	14.430	41.544.428	1,60	10.225
ΔMD6-A	41.069.629	40.151.034	2,24	41.236.846	2,63	2.421	41.348.887	2,90	4.807	40.680.910	1,30	1.291	40.742.570	1,45	12.574	40.739.515	1,44	6.363
ΔMD6-B	45.819.830	45.036.942	1,71	46.018.835	2,13	596	45.699.734	1,45	4.807	45.475.381	0,96	770	45.490.303	1,00	14.502	45.656.242	1,36	2.418
ΔMD6-C	40.920.598	39.834.707	2,65	40.842.561	2,47	2.419	40.510.522	1,67	4.807	40.274.695	1,09	1.938	40.266.658	1,07	13.321	40.556.881	1,78	2.657
ΔMD6-D	41.172.513	40.332.751	2,04	41.353.869	2,47	1.675	41.304.832	2,35	4.808	40.773.302	1,08	1.784	40.823.089	1,20	12.597	41.038.880	1,72	4.216
ΔMD7-A	54.366.519	53.453.647	1,68	54.413.030	1,76	1.161	54.199.996	1,38	4.806	53.837.821	0,71	898	54.360.639	1,67	14.425	54.086.616	1,17	6.783
ΔMD7-B	59.974.701	59.028.506	1,58	59.987.356	1,60	78	59.708.800	1,14	4.806	59.496.679	0,79	392	59.843.213	1,36	14.425	59.648.520	1,04	916
ΔMD7-C	53.682.130	53.004.236	1,26	54.037.770	1,91	1.915	53.836.906	1,55	4.806	53.536.481	0,99	1.028	53.860.300	1,59	14.425	53.674.710	1,25	2.243
ΔMD7-D	54.294.665	53.472.848	1,51	54.520.008	1,92	1.581	54.414.418	1,73	4.807	53.936.738	0,86	1.087	54.057.545	1,08	14.432	54.095.163	1,15	4.586
ΔMD8-A	84.282.511	83.635.949	0,77	84.711.844	1,27	385	84.557.389	1,09	4.806	84.285.014	0,77	439	84.194.465	0,66	2.838	84.594.736	1,13	3.735
ΔMD8-B	89.370.441	88.445.409	1,04	89.636.779	1,33	159	89.440.546	1,11	3.900	88.970.608	0,59	166	88.948.501	0,57	652	89.337.655	1,00	333
ΔMD8-C	84.090.439	83.268.560	0,98	84.256.423	1,17	837	84.094.162	0,98	4.806	83.927.139	0,78	188	83.825.907	0,66	3.777	84.184.393	1,09	3.116
ΔMD8-D	84.733.904	83.655.585	1,27	84.804.517	1,35	674	84.647.855	1,17	4.806	84.416.927	0,90	370	84.474.864	0,97	14.430	84.574.210	1,09	2.550
ΔMD9-A	151.805.663	151.214.386	0,39	152.470.947	0,82	66	152.464.306	0,82	1.236	152.103.238	0,58	42	151.946.911	0,48	868	152.440.678	0,80	367
ΔMD9-B	157.076.494	156.292.673	0,50	157.598.299	0,83	51	157.612.349	0,84	449	157.500.927	0,77	46	156.850.973	0,36	538	157.689.778	0,89	120
ΔMD9-C	151.723.341	150.845.629	0,58	151.817.353	0,64	77	151.916.216	0,70	486	151.886.375	0,69	48	151.528.594	0,45	188	151.930.729	0,71	259
ΔMD9-D	152.025.499	151.315.724	0,47	152.582.239	0,83	69	152.429.481	0,73	574	152.242.976	0,61	47	152.040.306	0,48	1.455	152.417.855	0,72	349
ΔMD10-A	194.926.886	194.067.100	0,44	195.655.635	0,81	54	195.615.958	0,79	1.337	195.117.248	0,54	37	194.798.950	0,38	162	195.755.116	0,86	1.211
ΔMD10-B	199.963.959	198.937.628	0,51	200.046.199	0,55	47	200.552.637	0,81	364	199.712.879	0,39	37	199.821.145	0,44	238	200.077.362	0,57	290
ΔMD10-C	194.470.709	193.729.174	0,38	194.963.240	0,63	57	195.155.500	0,73	174	194.594.545	0,44	35	194.445.160	0,37	198	194.773.722	0,54	152
ΔMD10-D	194.702.941	194.095.319	0,31	195.567.638	0,75	44	195.614.519	0,78	164	195.092.091	0,51	39	195.207.025	0,57	709	195.743.367	0,84	329

Nota: Os valores ressaltados com **NEGRITO**, destacam os melhores resultados obtidos para cada instância. Com a heurística RF03, RF04 e RF05 foram obtidas os melhores resultados de 8 instâncias, 1 instância e 4 instâncias, respectivamente.

De forma geral, pode-se dizer que os métodos heurísticos propostos na seção 5, apresentaram bons desempenhos em termos de qualidade de solução (*gaps*) e tempo computacional. No entanto, as instâncias em que a quantidade de pneus descartados é maior que a meta de destinação estabelecida, resultaram em maiores *gap*. Isso ocorre pois a multa pelo não cumprimento da meta é muito maior em comparação com o valor da venda de pneus no mercado secundário. Desta forma, as instâncias com meta de destinação maior ou igual à quantidade de pneus descartados focam apenas na decisão de destinação de pneus, enquanto as instâncias com meta de destinação menor que a quantidade de pneus descartados consideram as decisões de destinação de pneus e de comercialização no mercado secundário, sendo mais complexas.

Conforme as Tabelas 17 e 18, a resolução do modelo com o pacote do CPLEX encontra resultados com *gap* menores que 1% em 9 das 40 instâncias testadas, em 18 instâncias os resultados mostraram *gap* entre 1% e 5%, em 10 instâncias se observaram resultados com *gap* entre 5% e o 25%, em 2 instâncias se observaram resultados com *gap* entre 25% e 50%, e finalmente, em 1 instancias se observou resultado com *gap* entre 50% e 60%

Os algoritmos que mostraram os melhores resultados foram o método de decomposição em duas fases e as heurísticas RF-03 e RF-05.

Os resultados na Tabela 17 mostram que o algoritmo de decomposição alcança nas 40 instâncias melhores resultados em termos de função objetivo em comparação com os resultados do pacote CPLEX. A Tabela 18, por outro lado, mostra que o algoritmo RF-03 alcança em 35 das 40 instâncias testadas melhores resultados competitivos em termos de custo total que os obtidos pelo pacote CPLEX, nas 5 instâncias onde não são alcançados melhores resultados, os valores de *gap* são menores que 0,84%.

A Tabela 19 compila os resultados dos testes para facilitar a comparação, mostrando o número de soluções obtidas em cada faixa de *gap* para os métodos heurísticos propostos. Note que o algoritmo de decomposição em duas fases, alcança em mais da metade das instâncias resultados de *gap* menores que 1% (21 das 40 instâncias), em 13 das instâncias resultados de *gap* entre 1% e 5%, em 3 das instâncias resultados de *gap* entre 5% e 25%, e em 3 das instâncias resultados de *gap* entre 50% e 60%. Com a heurística RF-03, por sua vez, são obtidos resultados com *gap* menor que 1% em 19 instâncias, resultados com *gap* maior que 1% e menor que 5% em 16 instâncias, resultados com *gap* maior que 5%

e menor que 25% em 2 instâncias e resultados com *gap* maior que 25% e menor que 50% em 2 instâncias.

Tabela 19. Número de instâncias resolvidas segundo o *gap* obtido.

Classificação segundo o <i>Gap</i>	CPLEX (4 HORAS)	Heurística de Decomposição	RF-01	RF-02	RF-03	RF-04	RF-05	RO-01	RO-02	RO-03
Gap < 1%	9	21	8	9	19	14	9	8	8	10
1% < Gap < 5%	18	13	25	20	16	20	26	20	20	19
5% < Gap < 25%	10	3	4	8	2	3	2	9	9	8
25% < Gap < 50%	2	3	3	2	3	3	3	2	2	2
50% < Gap < 60%	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1

A Tabela 20 compila os resultados dos testes, mostrando o número de soluções obtidas em cada faixa de tempo de execução para os métodos heurísticos propostos. Note que os algoritmos que alcançaram os melhores resultados em termos de *gap*, foram os que alcançaram a maior quantidade de soluções em menos de 10 minutos, de fato, o tempo computacional médio foi de menos de 2 horas, no algoritmo de decomposição em duas fases e nas heurísticas RF-03 e RF-05

Tabela 20. Resultados dos algoritmos propostos segundo o tempo computacional.

Classificação segundo o tempo computacional	CPLEX	Heurística de Decomposição	RF-01	RF-02	RF-03	RF-04	RF-05	RO-01	RO-02	RO-03
Tempo < 600 s	0	13	13	6	13	5	8	0	0	0
600 s < Tempo < 3600 s	0	10	27	2	11	5	12	0	0	0
3600 s < Tempo < 7200 s.	0	3	0	32	1	1	14	0	0	0
7200 s < Tempo < 14400 s	40	14	0	0	15	29	6	40	40	40
Tempo de solução médio (s)	14.000	5.971	1.472	3.959	5.965	10.563	4.342	7.211	8.081	10.231

6.6 Análise dos resultados para diferentes cenários

Considerando que o método heurístico que obteve melhor desempenho foi a heurística de decomposição em duas fases, foram feitas análises da aplicação prática dos resultados das 40 instâncias obtidos por este método.

De forma geral, pode-se dizer que os resultados de todas as instâncias tiveram semelhanças em múltiplos aspectos. As proporções entre os custos são semelhantes, os custos de transporte são os mais representativos da rede, seguidos pelos custos de operação nos centros intermediários, e por último, os custos de abertura de instalações. Vale a pena

ressaltar que apenas em 9 casos os custos de abertura de instalações foram maiores que os custos de operação, e tais situações se caracterizam por envolver as menores porcentagens de utilização de centros intermediários, entre 90% e 92%.

Em relação à coleta, fluxo e destinação de pneus, e a porcentagem de utilização de centros intermediários e veículos de transporte, os resultados das 40 instâncias são similares aos resultados observados na instância detalhada na seção 6.2.

No relacionado à instalação de centros intermediários, a Tabela 21, detalha o número de vezes em que cada local candidato para a instalação de centros intermediários é escolhido nas 40 instâncias testadas.

Tabela 21. Resultados da escolha de locais candidatos para a instalação de CI.

REGIÃO DE GOVERNO	NOTAÇÃO	Número de vezes que a localização foi escolhida para abertura de CI	REGIÃO DE GOVERNO	NOTAÇÃO	Número de vezes que a localização foi escolhida para abertura de CI
Adamantina	C1	24	Jaú	C22	11
Andradina	C2	4	Jundiaí	C23	38
Araçatuba	C3	23	Limeira	C24	2
Araraquara	C4	38	Lins	C25	26
Assis	C5	10	Marília	C26	39
Avaré	C6	29	Ourinhos	C27	19
Barretos	C7	10	<i>Piracicaba</i>	<i>C28</i>	<i>0</i>
Bauru	C8	37	Presidente Prudente	C29	40
Botucatu	C9	11	Registro	C30	40
Bragança Paulista	C10	40	Ribeirão Preto	C31	38
Campinas	C11	40	<i>Rio Claro</i>	<i>C32</i>	<i>0</i>
<i>Caraguatatuba</i>	<i>C12</i>	<i>0</i>	<i>Santos</i>	<i>C33</i>	<i>0</i>
Catanduva	C13	3	São Carlos	C34	8
<i>Cruzeiro</i>	<i>C14</i>	<i>0</i>	São Joaquim da Barra	C35	37
Dracena	C15	11	São José do Rio Preto	C36	40
Fernandópolis	C16	9	São José dos Campos	C37	40
Franca	C17	13	Sorocaba	C38	40
<i>Guaratinguetá</i>	<i>C18</i>	<i>0</i>	Taubaté	C39	26
Itapetininga	C19	7	Tupã	C40	9
Itapeva	C20	10	Votuporanga	C41	10
Jales	C21	10	São Paulo	C42	40

As locações ressaltadas com **NEGRITO**, foram escolhidas em todas as instancias testadas.
As locações ressaltadas com *ITALICO*, não foram escolhidas em nenhuma das instancias testadas.

Conforme pode ser observado na Tabela 21, 8 locais candidatos (São Paulo, Sorocaba, São Jose dos Campos, São Jose de Rio Preto, Registro, Presidente Prudente, Campinas e Bragança Paulista) são escolhidos em todas as instâncias. Ou seja, independentemente dos valores de meta de destinação, da quantidade de pneus descartados e do fator de variação da distribuição de pneus entre os ecopontos. Estes resultados mostram quais são os locais menos sensíveis as alterações nestes parâmetros, podendo indicar que são os locais que se adaptam melhor a possíveis variações na rede logística.

Apesar das semelhanças existentes nos resultados das instâncias testadas, foi possível observar algumas diferenças, dependentes do fator de variação utilizado para a

distribuição de pneus nos ecopontos e da diferença existente entre o valor da meta e quantidade de pneus descartados.

Logo, para facilitar a análise das diferenças encontradas nos resultados das 40 instâncias, estes resultados são apresentados de forma agrupada, conforme a relação entre a quantidade de pneus descartados e a meta de destinação. Assim, apresenta-se uma análise dos testes computacionais realizados para os três grupos de instâncias: Cenário 1, quando a quantidade de pneus descartados é menor que meta estabelecida (instâncias de 1 a 12); Cenário 2, quando a quantidade de pneus descartados é igual a meta estabelecida (instâncias de 13 a 16), e finalmente, Cenário 3, quando a quantidade de pneus descartada é maior que a meta estabelecida (instâncias de 17 a 40).

6.6.1 Cenário 1: total de pneus descartados menor que a meta

A Tabela 22 apresenta os resultados dos testes para as instâncias em que a quantidade de pneus descartados ($\sum g_i$) é menor que a meta de destinação estabelecida (M). Os resultados deste grupo se caracterizam por incorrer em grandes custos com penalização / multa por não atendimento. Na maioria das instâncias todos os pneus descartados são enviados às empresas de destinação final, no entanto, estas quantidades não são suficientes para cumprir a meta estabelecida.

Tabela 22. Resultados Instâncias: Quantidade descartada menor que a meta.

INSTÂNCIA	DIFERENÇA M-D (%)	ABERTURA DE CI			(%) USO CI	OBJETIVO (\$)	CUSTO (\$)	MULTA (\$)	RENDA (\$)	NÚMERO VIAGENS		
		CIP	CIM	CIG						P-C	P-D	C-D
ΔMD5-A	2,55	14	2	4	92,42	41.168.313	18.242.090	24.133.575	2.994.289	9.264	3.160	2.258
ΔMD5-B	2,55	31	2	0	96,17	46.255.841	24.983.493	24.132.854	3.635.176	11.405	1.203	2.751
ΔMD5-C	2,55	9	2	5	93,50	40.758.870	17.395.320	24.133.856	2.827.540	8.745	3.676	2.130
ΔMD5-D	2,55	11	3	4	94,26	41.290.918	18.229.318	24.137.075	2.952.161	9.139	3.301	2.229
ΔMD6-A	2,70	14	2	4	91,04	40.654.058	17.663.832	24.414.685	2.949.763	9.152	2.715	2.228
ΔMD6-B	2,70	30	1	0	97,58	45.454.170	23.508.753	24.413.281	3.372.350	10.556	1.420	2.546
ΔMD6-C	2,70	10	1	5	92,78	40.240.088	16.603.181	24.413.511	2.705.508	8.390	3.475	2.043
ΔMD6-D	2,70	10	3	4	95,93	40.774.816	17.638.629	24.413.388	2.900.870	9.028	2.879	2.190
ΔMD7-A	3,30	13	2	5	95,05	53.894.051	20.263.744	34.890.506	3.284.986	10.251	3.601	2.488
ΔMD7-B	3,30	30	4	0	97,24	59.390.397	27.571.237	34.890.506	3.990.536	12.484	1.442	3.021
ΔMD7-C	3,30	9	1	6	95,21	53.452.365	18.958.689	34.891.610	2.982.066	9.260	4.539	2.249
ΔMD7-D	3,30	13	2	5	92,50	53.932.124	20.052.962	34.893.668	3.196.826	9.911	3.858	2.421
ΔMD8-A	7,16	14	2	4	91,01	84.088.844	17.677.903	67.829.599	2.948.778	9.160	2.722	2.233
ΔMD8-B	7,16	30	1	0	97,62	88.780.013	23.427.638	67.831.293	3.373.833	10.455	1.408	2.546
ΔMD8-C	7,16	10	1	5	92,91	83.659.864	16.618.641	67.828.081	2.709.188	8.410	3.459	2.045
ΔMD8-D	7,16	10	3	4	95,90	84.189.923	17.636.454	67.828.188	2.900.108	9.002	2.887	2.195
ΔMD9-A	12,71	14	2	4	92,48	151.625.608	18.270.586	134.567.482	2.996.270	9.296	3.160	2.267
ΔMD9-B	12,71	30	2	0	96,43	156.663.098	24.688.986	134.567.354	3.541.067	11.080	1.482	2.671
ΔMD9-C	12,71	9	2	5	94,47	151.243.406	17.498.262	134.568.283	2.856.706	8.865	3.580	2.157
ΔMD9-D	12,71	12	3	4	92,52	151.730.583	18.367.937	134.567.656	2.997.516	9.287	3.152	2.269
ΔMD10-A	16,84	14	2	4	91,06	194.533.013	17.691.236	178.265.104	2.950.277	9.169	2.712	2.236
ΔMD10-B	16,84	28	2	0	97,61	199.224.182	23.430.115	178.265.793	3.373.399	10.464	1.410	2.540
ΔMD10-C	16,84	10	1	5	93,69	194.144.478	16.709.870	178.264.776	2.732.144	8.504	3.384	2.062
ΔMD10-D	16,84	10	3	4	95,93	194.627.408	17.637.492	178.262.688	2.901.046	8.998	2.887	2.196

*CIP (centros intermediários pequenos), *CIM (centros intermediários médios), *CIG (centros intermediários grandes).

Conforme a Tabela 22, para este grupo de instâncias são observados 6 diferentes resultados para os custos de penalização, estes valores dependem das diferenças entre o valor da meta e a quantidade de pneus descartados (2,55%, 2,70%, 3,30%, 7,16%, 12,71%, e 16,84%). Este resultado era esperado pois, quando aumenta a diferença entre a meta e a quantidade de pneus descartados aumenta o valor da multa.

Também como esperado, os resultados destas instâncias não indicam a venda de pneus servíveis no mercado secundário. Isso porque é menos custoso cumprir a meta devido aos altos valores da penalização. Esta questão é importante para a avaliação geral dos órgãos reguladores em relação aos valores estabelecidos para a meta e políticas de incentivo à reutilização. Em um primeiro momento, os valores estabelecidos para as metas eram maiores que a quantidade total de pneus inserida no mercado de reposição. Isso porque era preciso considerar o passivo ambiental gerado no período anterior à legislação.

Finalmente, em relação à instalação de centros intermediários, observa-se que 13 dos 42 locais candidatos para a instalação sempre são utilizados, e 7 nunca são utilizados. A porcentagem média de utilização da capacidade de trituração dos centros intermediários é de 94,39% oscilando entre 91,01% e 97,62%. Também se observa que 13 das 24 instâncias consideraram estoques de pneus inteiros nos centros intermediários, em média 21 toneladas. Em relação aos estoques de pneus triturados, estes são utilizados em todos os períodos em todas as instâncias.

6.6.2 Cenário 2: total de pneus descartados igual a meta

A Tabela 23 apresenta os resultados dos testes para as instâncias em que a quantidade de pneus descartados ($\sum g_i$) é igual a meta de destinação estabelecida (M).

Os resultados apresentam baixos custos de penalização/multa, pois a quantidade de pneus descartados, coletados e enviados às empresas de destinação final, atinge a meta de destinação. Apenas em algumas instâncias foram deixadas pequenas quantidades de pneus em estoque, pois eram quantidades muito pequenas e seu transporte é mais custoso que a penalização.

Tabela 23. Resultados Instâncias: Quantidade descartada igual que a meta.

INSTÂNCIA	DIFERENÇA M-D (%)	ABERTURA DE CI			(% USO CI)	OBJETIVO (\$)	CUSTO (\$)	MULTA (\$)	RENDA (\$)	NÚMERO VIAGENS		
		CIP	CIM	CIG						P-C	P-D	C-D
ΔMD4-A	0,00	14	2	4	92,36	17.024.690	18.229.989	0	2.992.331	9.265	3.161	2.254
ΔMD4-B	0,00	31	2	0	96,16	22.137.091	24.998.551	0	3.634.981	11.388	1.203	2.761
ΔMD4-C	0,00	9	2	5	93,43	16.613.485	17.369.845	340	2.825.365	8.729	3.681	2.126
ΔMD4-D	0,00	11	3	4	94,33	17.150.235	18.232.290	375	2.954.526	9.154	3.299	2.233

*CIP (centros intermediários pequenos), *CIM (centros intermediários médios), *CIG (centros intermediários grandes).

No que se refere à instalação de centros intermediários neste grupo de instâncias, observa-se que 12 dos 42 locais candidatos para a instalação são utilizados. A porcentagem média de utilização da capacidade de trituração dos centros intermediários é de 94,07%, oscilando entre 92,36% e 96,16%. O resultado de nenhuma das instâncias considera estoques de pneus inteiros nos centros intermediários, no entanto, os estoques de pneus triturados são utilizados em cada um dos períodos de todas as instâncias.

6.6.3 Cenário 3: total de pneus descartados maior que a meta

A Tabela 24 apresenta os resultados dos testes para as instâncias em que a quantidade de pneus descartados ($\sum g_i$) é maior que a meta de destinação estabelecida (M). Conforme esperado, os resultados destas instâncias não incorrem em custos de penalização, a maioria dos pneus descartados nos ecopontos são coletados, e estas quantidades são suficientes para cumprir a meta de destinação e comercializar alguns no mercado secundário.

Tabela 24. Resultados Instâncias: Quantidade descartada maior que a meta.

INSTÂNCIA	DIFERENÇA M-D (%)	ABERTURA DE CI			(% USO CI	OBJETIVO (\$)	CUSTO (\$)	MULTA (\$)	RENDA (\$)	NÚMERO VIAGENS		
		CIP	CIM	CIG						P-C	P-D	C-D
ΔMD1-A	-13,15	14	2	4	91,04	-8.594.813	18.942.243	0	29.238.197	10.727	3.031	2.233
ΔMD1-B	-13,15	30	1	1	94,73	-3.801.826	25.400.982	0	29.866.196	12.637	1.106	2.689
ΔMD1-C	-13,15	11	1	5	90,59	-8.923.535	18.031.591	0	29.014.307	10.059	3.663	2.061
ΔMD1-D	-13,15	12	3	4	90,41	-8.424.161	19.046.317	0	29.212.413	10.628	3.104	2.211
ΔMD2-A	-7,97	14	2	4	91,71	1.339.764	18.992.079	0	19.664.674	10.221	3.550	2.247
ΔMD2-B	-7,97	30	1	1	97,70	6.311.950	25.877.138	0	20.384.788	12.458	1.331	2.782
ΔMD2-C	-7,97	9	2	5	93,26	974.097	18.228.788	0	19.505.500	9.718	4.016	2.125
ΔMD2-D	-7,97	12	3	4	91,28	1.478.914	19.079.013	0	19.648.998	10.140	3.603	2.232
ΔMD3-A	-2,13	14	2	4	90,94	12.460.696	17.937.831	0	7.200.952	9.348	3.041	2.219
ΔMD3-B	-2,13	30	2	0	97,16	17.408.188	24.502.322	0	7.829.215	11.399	1.155	2.700
ΔMD3-C	-2,13	10	1	5	93,35	12.075.339	16.957.859	0	6.979.336	8.661	3.739	2.049
ΔMD3-D	-2,13	10	3	4	95,55	12.548.010	17.847.739	0	7.140.526	9.152	3.227	2.169

*CI (Centros Intermediários), CIP (centros intermediários pequenos), *CIM (centros intermediários médios), *CIG (centros intermediários grandes).

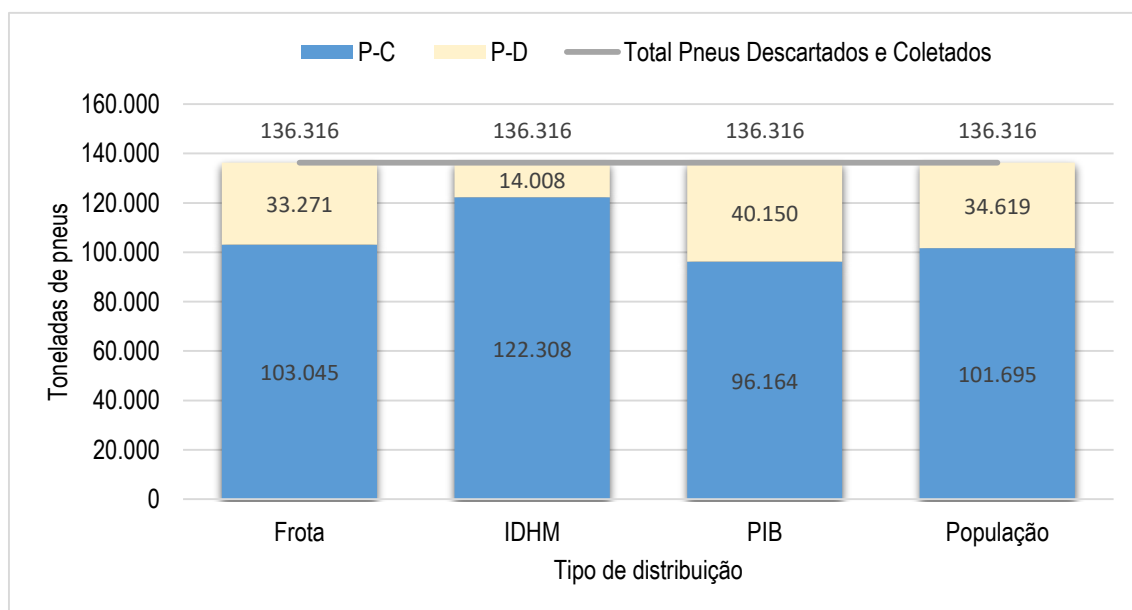
Conforme pode ser observado na Tabela 24, os resultados destas instâncias consideram a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário, dependendo da diferença existente entre a quantidade de pneus descartados e a meta de destinação. Observa-se, em média, 3 diferentes valores para as rendas decorrentes da comercialização de pneus no mercado secundário: R\$ 4.256.047, R\$ 16.690.412 e R\$ 26.282.931.

Em relação à instalação de centros intermediários, observa-se que 13 dos 42 locais candidatos para a instalação são utilizados. A porcentagem média de utilização da capacidade de trituração dos centros intermediários é de 93,14%, oscilando entre 90,41% e 97,70%.

6.6.4 Análise da variação de distribuição da quantidade descartada

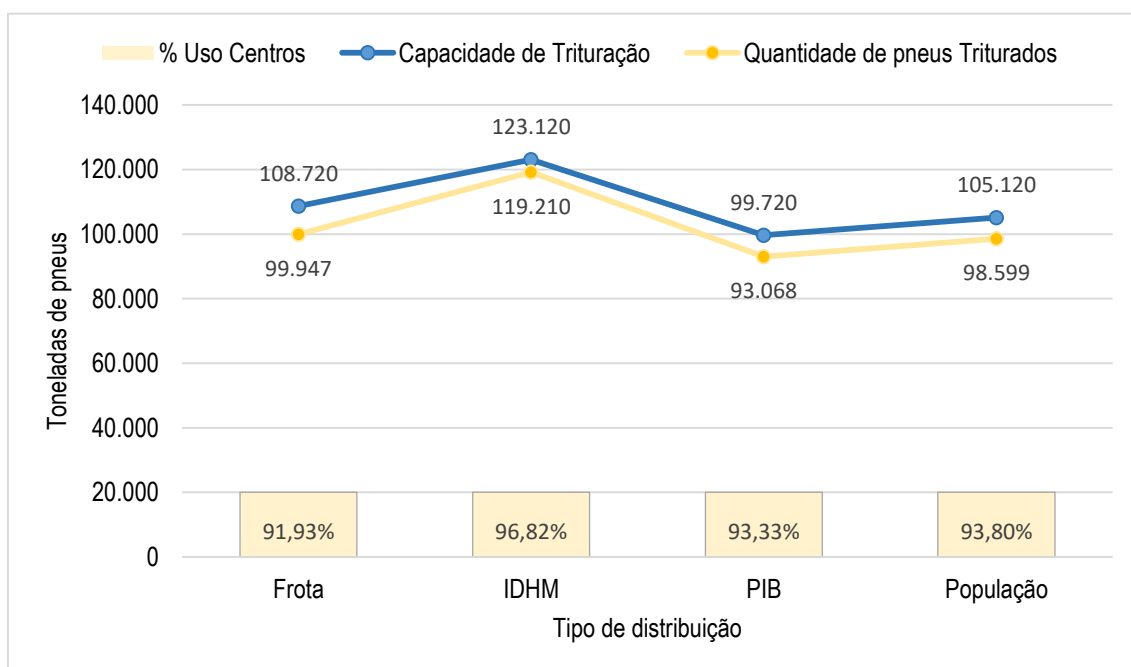
Como apresentado na seção 6.1, as 40 instâncias geradas para os testes computacionais variam em quanto a distribuição da quantidade de material descartado entre os ecopontos. Uma análise dos resultados com base nos diferentes fatores de variação utilizados mostra que a distribuição de pneus entre os ecopontos influencia diretamente o fluxo e processamento de pneus, afetando os custos logísticos da rede reversa. A Figura 18 mostra, para diferentes fatores de distribuição, o fluxo médio de pneus transportados dos ecopontos aos centros intermediários (P-C) e dos ecopontos para as plantas de destinação final (P-D).

Figura 18. Comparação: fluxo de pneus das instâncias segundo o tipo de distribuição.



Conforme pode ser observado na Figura 18, as instâncias com uma distribuição de pneus baseada no IDHM dos municípios tendem a enviar uma maior quantidade de pneus inservíveis a centros intermediários (P-C), em média 122.308 t., em comparação com as instâncias com outros tipos de distribuição. Para entender melhor estes resultados, na Figura 19 são apresentados os resultados referentes à capacidade média de trituração dos centros intermediários instalados, a quantidade média de pneus triturados e a porcentagem de utilização dos centros intermediários.

Figura 19. Comparação: trituração das instâncias segundo o tipo de distribuição.

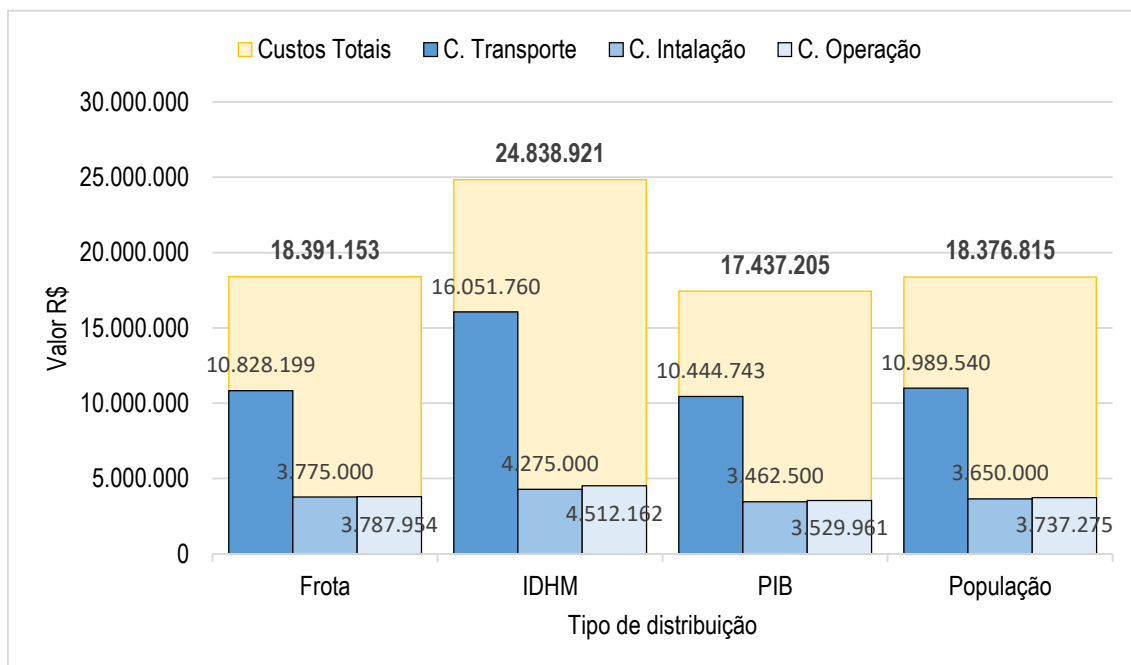


Na Figura 19, se observa que as instâncias com uma distribuição de pneus baseada no IDHM em média tendem a abrir uma maior quantidade de centros intermediários (maior capacidade de trituração) e a ter uma maior porcentagem média de utilização da capacidade de trituração destes centros 96,83%. Em relação às instâncias de distribuição baseada nos outros fatores de variação, é observado que as instâncias de distribuição baseada na ‘Frota de veículos’ apresentam porcentagem média de utilização dos centros de trituração de 91,91%. As instâncias com distribuição baseadas no ‘PIB’ apresentam uma porcentagem de utilização de 93,33%, e finalmente, as instâncias de distribuição baseada na ‘População’ apresentam uma porcentagem de utilização de 93,86%.

Os custos logísticos são aumentados proporcionalmente com o aumento da atividade de pré-processamento (trituração). A Figura 20 apresenta os custos médios de transporte,

instalação de centros intermediários e operação nos centros intermediários, das 40 instâncias consideradas agrupadas segundo o tipo de distribuição de pneus nos ecopontos.

Figura 20. Comparação: Custos das instâncias segundo o tipo de distribuição.



Nota-se na Figura 20 que os resultados das instâncias com distribuição baseada no fator de variação de *IDHM*, apresentam os maiores custos de transporte, instalação e operação. Esta situação pode ser explicada pelo fato de que, nas instâncias com este fator de variação, os pneus se encontram mais dispersos em comparação às outras instâncias, o que torna mais custosa sua coleta, sendo necessária a abertura de mais centros intermediários.

6.7 Testes com variação de parâmetros

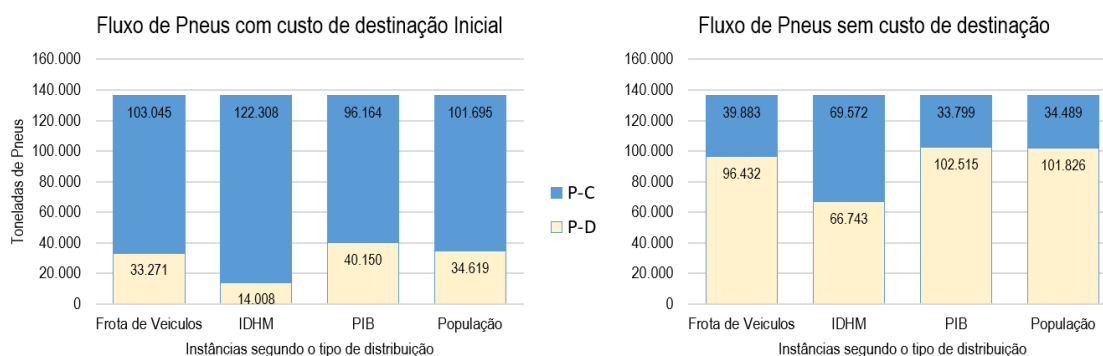
Com o objetivo de conseguir uma melhor compreensão do problema prático, foi feita uma análise de sensibilidade do modelo com alteração nos seguintes parâmetros: custo de destinação de pneus inservíveis, custo de transporte e valor dos pneus no mercado secundário.

6.7.1 Variação no custo de destinação de pneus

Atualmente, apesar dos pneus inservíveis adequadamente destinados serem matérias primas importantes para outros setores industriais, os produtores e importadores arcam com os custos da destinação. Foram realizados alguns testes supondo que esta condição de mercado seja alterada, ou seja, sem a consideração de custos de destinação de pneus inservíveis ($rp'_j = 0; rp_j = 0$), isso levando em conta que os pneus inservíveis em alguns sistemas de logística reversa como o de Japão, China, Irlanda, Reino Unido, Alemanha, Suíça, Áustria e Croácia, deixam de ser gastos e inclusive geram receita (SIENKIEWICZ et al., 2017). Assim, foram comparados os resultados das 40 instâncias geradas na seção 6.1, com e sem consideração de custos de destinação.

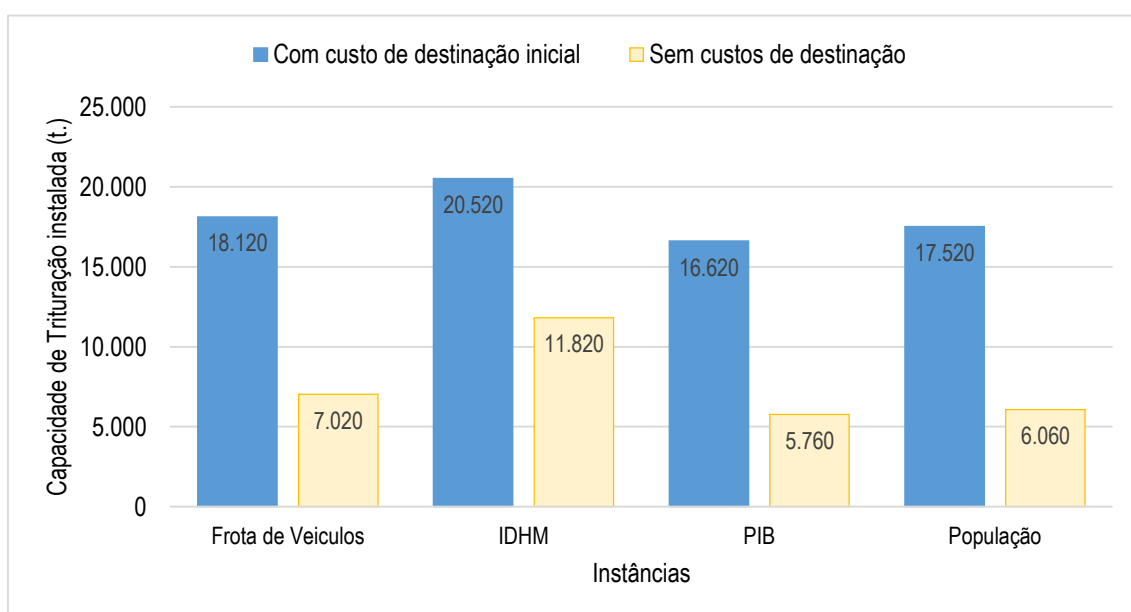
Os resultados obtidos mostraram mudanças em múltiplos aspectos, no entanto, os mais significativos estão relacionados ao fluxo de pneus entre os agentes da rede. A Figura 21 apresenta as diferenças observadas na quantidade média de pneus transportados dos ecopontos (P) aos centros intermediários (C) e às plantas de destinação final (D) com e sem custos de destinação.

Figura 21. Fluxo de pneus com e sem consideração de custos de destinação.



Conforme a Figura 21, se observa que ao não ter consideração de custos de destinação, o modelo tende a enviar diretamente uma maior quantidade de pneus inservíveis dos ecopontos (P) às plantas de destinação (D), em comparação com as instâncias que consideram o custo de destinação inicial. Esta situação indica que em alguns casos não é viável incorrer em gastos de triagem e trituração de pneus (pré-processamento) levando em conta que, estes teriam o mesmo custo de destinação independentemente de seu estado (inteiro ou triturado). Este resultado é importante para o planejamento da rede, pois uma das empresas de co-processamento, que necessita que os pneus sejam triturados, está em fase de alteração de seus processos (fornos). A Figura 22, mostra a capacidade média de trituração dos centros intermediários instalados nas instâncias com e sem consideração de custos de destinação.

Figura 22. Capacidade de trituração em instâncias com e sem custos de destinação.



Como pode ser observado na Figura 22, nas instâncias que não são considerados custos de destinação há uma diminuição na abertura de centros intermediários, corroborando os resultados apresentados na Figura 21, de que uma menor quantidade de pneus enviados para triagem e trituração nos centros intermediários resulta em uma menor quantidade de centros intermediários. No entanto, ainda é instalada uma quantidade de centros intermediários suficientes para pré-processar em média 29% dos pneus coletados nas instâncias com distribuição de pneus baseada na *Frota de Veículos*, o 51% dos pneus coletados nas instâncias com distribuição de pneus baseada no *IDHM*, o 24 % dos pneus

nas instancias com distribuição de pneus baseada no *PIB*, e 25% dos pneus nas instancias com distribuição de pneus baseada na *População*.

6.7.2 Variação no valor da venda de pneus no mercado secundário

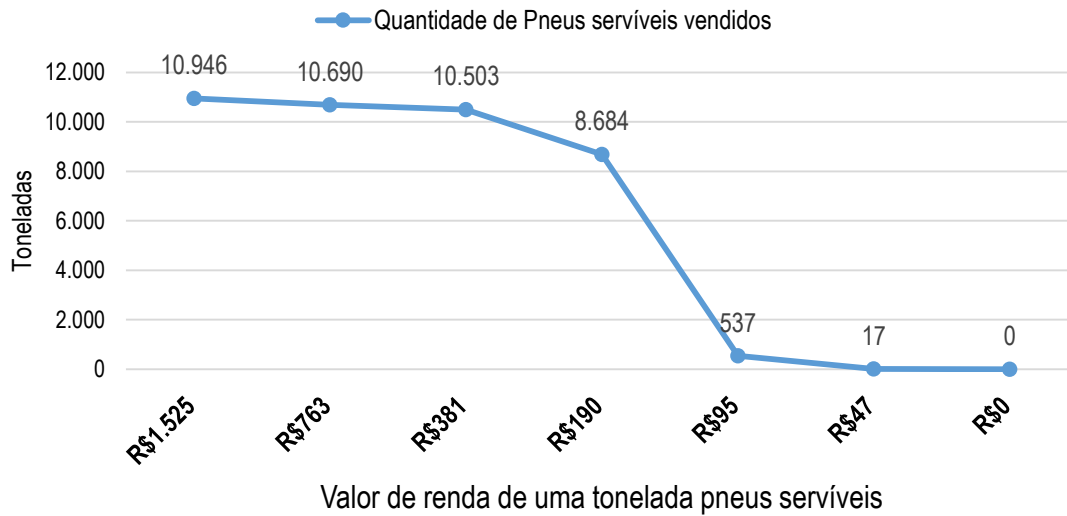
A renda obtida com a venda de pneus servíveis para reuso ocorre nas instâncias com quantidade de pneus descartados maior que a meta de descarte estabelecida (instâncias de 1 a 12). Logo, com o objetivo de observar o comportamento do modelo proposto frente a possíveis variações no preço de venda dos pneus servíveis, foram realizados testes computacionais com a instância Δ MD2-A. Esta instância considera uma meta de destinação de 137.380 toneladas, uma quantidade de pneus descartados de 148.328 toneladas e utiliza o fator de variação '*Frota de Veículos*' para a distribuição de pneus entre os ecopontos.

Foram feitos testes considerando os seguintes preços de venda de pneus servíveis: R\$762,5 (50% do valor original), R\$381 (25% do valor original), R\$190 (12,5% do valor original), R\$95 (6,25% do valor original) e R\$47 (3,125% do valor original).

Os resultados não apresentaram mudanças significativas em relação à configuração física da rede. De fato, a escolha de locais candidatos para abertura de centros intermediários foi quase a mesma nas diferentes considerações, 17 locais candidatos para abertura nunca são escolhidos e 11 sempre são escolhidos.

Em relação ao impacto da quantidade de pneus reutilizáveis comercializados, os resultados são diferentes. A Figura 23, mostra a variação da quantidade de pneus servíveis comercializados no mercado secundário, de acordo com seu valor de venda.

Figura 23. Quantidade de pneus de servíveis comercializados vs seu valor.



Conforme a Figura 23 indica e como era esperado, à medida que o preço de venda dos pneus servíveis é reduzido, a quantidade de pneus servíveis comercializados no mercado secundário diminui. No entanto, a diminuição mais significativa da venda destes pneus acontece quando o valor da renda de pneus de servíveis está abaixo de R\$ 190/t.

A Figura 24 detalha o comportamento das receitas totais da rede para a instância testada, considerando as variações no preço dos pneus servíveis. A Figura 25, por sua vez, detalha o comportamento dos custos totais do sistema de rede de logística reversa ao variar o preço de venda dos pneus servíveis, e mostra que a mudança dos valores dos pneus servíveis não tem um impacto significativo nos custos.

Figura 24. Relação da renda da rede vs valor dos pneus servíveis no mercado secundário.

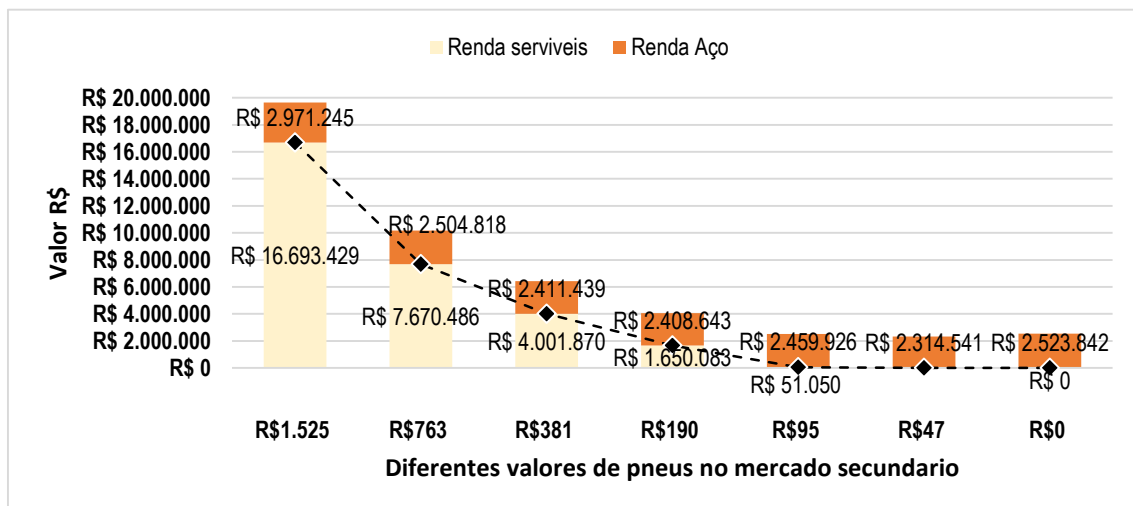
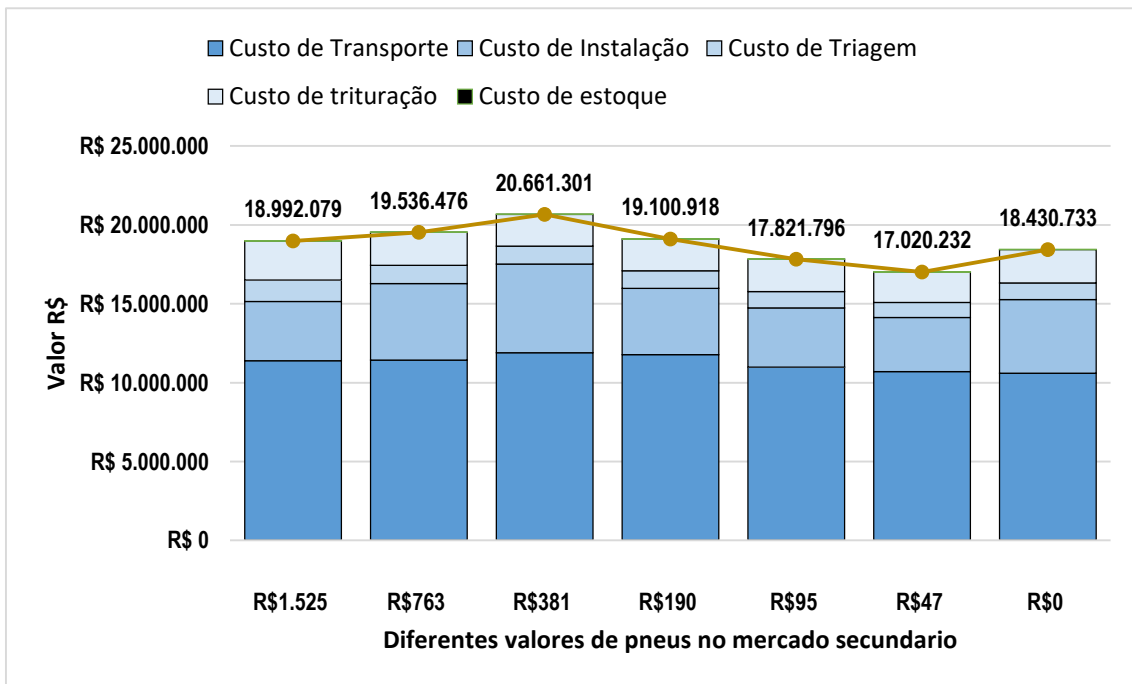


Figura 25. Relação dos custos vs valor dos pneus servíveis no mercado secundário.



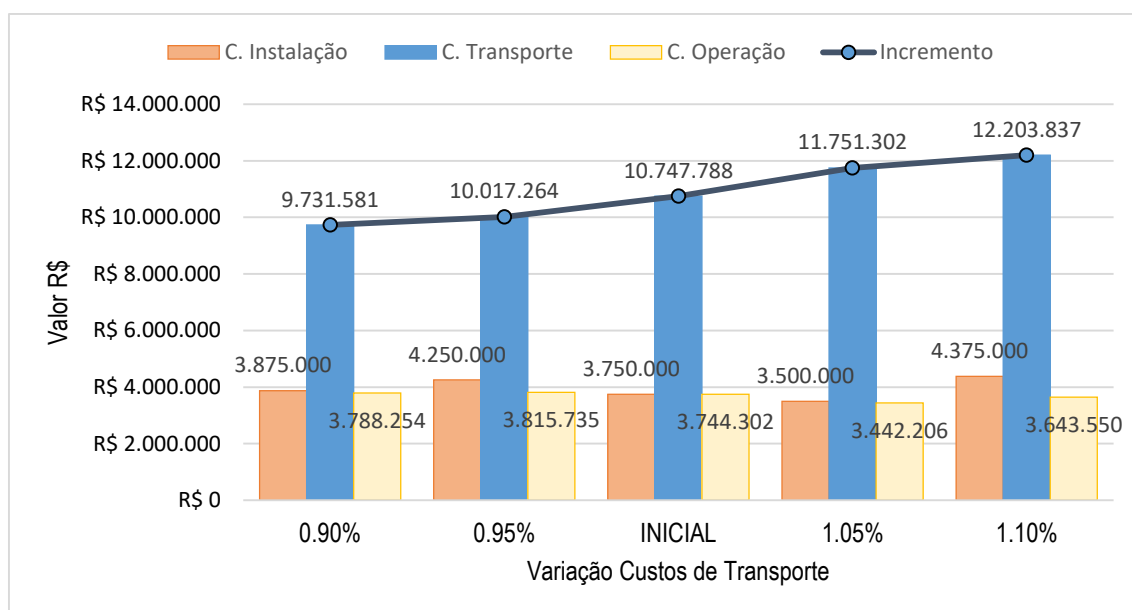
Pode ser observado nas Figuras 24 e 25, o impacto decorrente da mudança do valor do preço de venda dos pneus servíveis não é significativo nos custos totais do problema, no entanto, no que se refere à renda total, as alterações são significativas. Nas instâncias com quantidade de pneus descartados maior que a meta de descarte estabelecida ($D > M$), usualmente a renda depende em grande medida das receitas obtidas com a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário. Esse resultado já era esperado, pois o valor da multa pela não destinação é muito alta e faz com que o objetivo principal da rede reversa seja o cumprimento da meta.

6.7.3 Variação no custo de transporte de pneus

Considerando a trajetória do preço do combustível no Brasil nos últimos 16 anos (NEXOJORNAL, 2017; GLOBO, 2017), foram realizados experimentos computacionais variando os custos de transporte, com um aumento e uma redução de 5% e 10% em relação ao valor original.

A instância $\Delta MD5-A$ detalhada na seção 6.2, foi utilizada para esta análise. Os resultados obtidos mostram que as mudanças nos custos de transporte não têm um impacto significativo nas variáveis relacionadas à quantidade de pneus a coletar, transportar, classificar, estocar, triturar e destinar, ao número de viagens a realizar, e à quantidade de centros intermediários a instalar. A única mudança observada está na função objetivo. A Figura 26 apresenta de forma geral os resultados econômicos da instância $\Delta MD5-A$ considerando possíveis variações nos custos de transporte.

Figura 26. Variações nos custos totais frente a mudanças no transporte.



Também não foram observadas variações significativas relacionadas às quantidades dos centros intermediários a abrir. De fato, dos 42 locais candidatos para a abertura de centros intermediários há 12 que sempre são escolhidos e 9 que nunca são escolhidos, em todas as variações dos custos de transportes consideradas.

7 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudo aborda o problema de planejamento da rede de logística reversa de pneus no Brasil. Foi proposto um modelo de Programação Linear Inteira Mista para fornecer apoio às decisões estratégicas relacionadas à localização e dimensionamento de Centros Intermediários de triagem e trituração de pneus, e às decisões táticas relacionadas ao transporte, tais como a determinação do fluxo de pneus entre os pontos da rede, e dimensionamento do número de viagens; e decisões de processamento: quantidade de pneus a serem triados, estocados, triturados, e enviados para cada tipo de destinação final, além da quantidade enviada para o mercado secundário (reutilização). Adicionalmente, também foram desenvolvidas heurísticas baseadas em programação matemática como alternativas de métodos de solução.

Para os experimentos computacionais, foram consideradas 40 instâncias baseadas em dados reais do Estado de São Paulo (Brasil). As diferentes instâncias foram geradas considerando variações na relação entre a quantidade total de material descartado e a meta estabelecida e também diferentes formas de distribuição do total de material descartado entre os ecopontos (dispersão geográfica).

7.1 Verificação dos objetivos e respostas a questões da pesquisa

Os resultados mostraram que o objetivo geral deste trabalho se alcançou, propor um modelo que represente adequadamente os processos de planejamento da logística reversa de pneus e forneça soluções consistentes para o problema prático.

Com uma análise dos resultados se conseguiu responder a questão central da pesquisa, o planejamento da logística reversa pode ser melhorado com a instalação de mais centros intermediários. Também se conseguiu responder os outros questionamentos, com o modelo matemático proposto foi possível determinar em que locais e com que capacidade devem ser abertos os centros intermediários, como deve ser o fluxo de pneus entre as instalações da rede, a importância que tem a utilização de estoques nos ecopontos e nos centros intermediários, o impacto que tem a consideração de decisões de transporte e processamento de pneus no planejamento da logística reversa e na configuração da rede

física, e quais são os parâmetros externos que impactam significativamente a configuração da rede física e o planejamento da logística reversa de pneus no Brasil.

De forma geral, os resultados indicaram uma tendência de transportar mais pneus entre os ecopontos e os centros intermediários, que o transporte direto para as plantas de processamento (destinação). Isso corrobora a hipótese inicial de que o pré-processamento dos pneus pode reduzir significativamente os custos de transporte, mesmo considerando custos de abertura e operação destes centros.

Experimentos para comparação do modelo proposto com uma abordagem monopérido e um modelo da literatura, mostraram que a consideração simultânea de decisões estratégicas e táticas no planejamento da logística reversa, leva a decisões mais coerentes em termos do período de tempo em que se realizam as atividades de coleta, transporte, triagem, trituração, comercialização e destinação de pneus.

Neste sentido, a utilização de estoque nas instalações é fundamental, constantemente o modelo considera mais econômico deixar pneus em estoque, gerenciando melhor o envio para as empresas com capacidade disponível e considerando simultaneamente os custos de transporte e de destinação.

A resolução do modelo multipérido proposto é mais complexa que a resolução das abordagens monopérido, e, por conseguinte requer mais tempo computacional. No entanto, os métodos heurísticos propostos foram capazes de encontrar soluções de boa qualidade com baixo tempo computacional. Foram obtidos resultados com *gaps* menores que 5% na maioria dos experimentos computacionais.

Para analisar a aplicação do modelo em diferentes contextos do problema prático, os resultados foram analisados para os diferentes grupos de instâncias. Como era esperado o modelo prioriza o cumprimento da meta sobre a venda de pneus servíveis no mercado secundário, nas instâncias com meta de destinação maior e igual à quantidade de pneus descartados não se considera a venda de pneus no mercado secundário.

Por outro lado, nas instâncias com meta de destinação menor à quantidade de pneus descartados, se considerou a comercialização de pneus no mercado secundário além da destinação de pneus e do cumprimento da meta. Adicionalmente, observou-se que a distribuição de pneus entre os ecopontos está diretamente relacionada com a abertura de

centros intermediários. Nas instâncias com distribuições de pneus mais dispersas se indicou a instalação de uma maior quantidade de centros intermediários, um maior fluxo de pneus entre os ecopontos e os centros intermediários, e uma maior porcentagem de utilização destas instalações.

Uma análise de sensibilidade com variação dos parâmetros de preço de venda de pneus reutilizáveis, custos de transporte e custos de destinação mostra que:

- (i) As variações nos preços de venda dos pneus reutilizáveis não afetam significativamente as decisões do planejamento da rede física, nem os custos gerais da rede, apenas são alteradas a quantidade de pneus reutilizáveis comercializados e a renda total gerada pela rede;
- (ii) O acréscimo e decréscimo de até 10% nos custos de transporte, não têm um impacto significativo nas decisões de configuração da rede física e nas decisões de coleta, transporte, estoques, triagem, trituração e destinação;
- (iii) Se a destinação não gerar um custo para a rede de logística reversa, o modelo indica uma diminuição nas atividades de pré-processamento, ainda assim é indicada a abertura de centros intermediários suficiente para o pré-processamento de, em média, 32% do total de pneus descartados.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas propostas de pesquisas futuras são:

- Abordar a incerteza do problema decorrente do valor da meta de destinação e da quantidade de pneus descartados nos ecopontos, com modelos de programação estocástica, os quais tendem ser mais difíceis de resolver em termos computacionais, no entanto geram resultados possivelmente melhores.
- Considerar além dos objetivos de custos, objetivos relacionados com critérios ambientais e critérios associados ao impacto social da rede (postos de trabalho gerados, movimentação econômica local, etc.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDIP - Associação Brasileira dos Importadores e Distribuidores de Pneus. *Projeto Pontos de Coleta de Pneus Inutilizáveis*. 2017 Disponível em: <<http://www.abidip.com.br/>> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

ABR - Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus. *Dados do segmento*. 2013. Disponível em: <<http://www.abr.org.br/dados.html>> Acesso em: o 30 de maio de 2017.

AGRAWAL, S.; SINGH, R. K.; MURTAZA, Q. A literature review and perspectives in reverse logistics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, p. 76-92, 2015.

AKSEN, D.; ARAS, N.; KARAARSLAN, A. G. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns. **International Journal of Production Economics**, v. 119, n. 2, p. 308-327, 2009.

ALUMUR, S. A.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F.; VERTER, V. Multi-period reverse logistics network design. **European Journal of Operational Research**, v. 220, n 1, p. 67-78, 2012.

ANDRADE, C. I. A. R.; JESUS, R. M. de; CRUZ, J. de O. Análise da viabilidade de implantação de uma usina de reciclagem de pneus em teixeira de Freitas-ba. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 107–127, 2015.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. *Anip em Números*. 2017. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=conteudo>>. Acesso em: 31 de novembro de 2017.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. *Quase 200 Anos de Tecnologia*. 2013. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=anip>>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. *Livro branco da indústria de pneus – uma política industrial para o setor*. 2015. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/arquivos/f8201-white-book-versao-final.pdf>>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

ARAS, N.; KORUGAN, A.; BÜYÜKÖZKAN, G.; ŞERİFOĞLU, F. S.; EROL, İ.; VELİOĞLU, M. N. Locating recycling facilities for IT-based electronic waste in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 324-336, 2015.

AYVAZ, B.; BOLAT, B. Proposal of a stochastic programming model for reverse logistics network design under uncertainties. **International Journal of Supply Chain Management**, v. 3, no 3, p 33-42, 2014.

AYVAZ, B.; BOLAT, B.; AYDIN, N. Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. **Resources, conservation and recycling**, v. 104, p. 391-404, 2015.

BARKER, T. J.; ZABINSKY, Z. B. Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 1, n. 4, p. 250-260, 2008.

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

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

CHANINTRAKUL, P.; CORONADO MONDRAGON, A. E.; LALWANI, C.; WONG, C. Y. Reverse logistics network design: a state-of-the-art literature review. **International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling**, v. 1, n. 1, p. 61-81, 2009.

CHANG, Y. On pyrolysis of waste tire: degradation rate and product yields. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 17, n. 2, p. 125-139, 1996.

CODECA - Companhia de Desenvolvimento de Caxias do Sul. *CAPI - Central de Armazenamento de Pneus Inservíveis*. 2017. Disponível em: <http://www.codeca.com.br/servicos_capi.php> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução No. 416, de 30 de setembro de 2009*. 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 31 de maio de 2017.

DASKIN, Mark S.; MAASS, K. L. The p-median problem. In: *Location science*. Springer International Publishing, p. 21-45, 2015.

DAT, L.Q.; LINH, D.T.T.; CHOU, S.Y.; VINCENT, F.Y. Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 7, p. 6380-6387, 2012.

DEMIREL, E.; DEMIREL, N.; GÖKÇEN, H. A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2101-2113, 2016.

DEHGHANIAN, F; MANSOUR, S. Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 10, p. 559-570, 2009.

DE BRITO, M. P.; DEKKER, R. A framework for reverse logistics. In: *Reverse logistics*. Springer Berlin Heidelberg, p. 3-27, 2004.

ENE, S.; ÖZTÜRK, N. Network modeling for reverse flows of end-of-life vehicles. **Waste Management**, v. 38, p. 284-296, 2015.

FAZENDARJ – Secretaria de estado de fazenda e planejamento do Rio de Janeiro. *Legislação financeira ANEXO 1*. 2017. Disponível em: <http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/content/conn/UCMServer/path/Contribution%20Folders/site_fazenda/Legislacao/financeira/portarias/cge/2014/ANEXO%20DA%20PORTARIA%20CGE%20179.pdf> Acesso em: 08 de setembro de 2017.

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 4, p. 684-691, 2010.

FONSECA, M. C.; GARCÍA-SÁNCHEZ, Á.; ORTEGA-MIER, M.; SALDANHA-DAGAMA, F. A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. **Top**, v. 18, n. 1, p. 158-184, 2010.

FORREST, M. Recycling and re-use of waste rubber. Smithers Rapra, 2014.

FLEISCHMANN, M.; KRIKKE, H. R.; DEKKER, R.; FLAPPER, S. D. P. A characterisation of logistics networks for product recovery. **Omega**, v. 28, n. 6, p. 653-666, 2000.

FLORIANI, M. A.; FURLANETTO, V. C.; SEHNEM, S. Descarte sustentável de pneus inservíveis. **Navus-Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 6, n 2, p. 37-51, 2016.

GHADERI, A.; JABALAMELI, M. S. Modeling the budget-constrained dynamic uncapacitated facility location–network design problem and solving it via two efficient heuristics: a case study of health care. **Mathematical and Computer Modelling**, vol. 57, no 3-4, p. 382-400, 2013.

GLOBO - ECONOMIA. *Petrobras faz novo reajuste e gasolina já sobe mais de 10% em setembro*. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/petrobras-faz-novo-reajuste-e-gasolina-ja-sobe-mais-de-10-em-setembro.ghtml>> Acesso em: 17 de dezembro de 2017.

HELBER, S.; SAHLING, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Economics**, v. 123, n. 2, p. 247-256, 2010.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2011. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 11, 2011.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2012. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 14, 2012.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2013. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 20, 2013.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2014. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 76, 2014.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2015. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 75, 2015.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório pneumáticos 2016. Relatório de Pneumáticos: Resolução CONAMA No. 416/09, p. 75, 2016. Disponível em: <http://ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2016.pdf> >. Acesso em: 30 de maio de 2017.

IMP – Informação dos municípios paulistas. *Series históricas*. 2017. Disponível em: <http://www.imp.seade.gov.br/frontend/#/>> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

JABBOUR, A. B. S.; JABBOUR, C. J. C.; SARKIS, J.; GOVINDAN, A. Brazil's new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 16, n. 1, p. 7-9, 2014.

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

KANNAN, D.; DIABAT, A.; ALREFAEI, M.; GOVINDAN, K.; YONG, G. A carbon footprint based reverse logistics network design model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, p. 75-79, 2012.

KARA, S. S.; ONUT, S. A stochastic optimization approach for paper recycling reverse logistics network design under uncertainty. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 7, n. 4, p. 717-730, 2010.

KILIC, H.S.; CEBECI, U.; AYHAN, M.B. Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 95, p. 120-132, 2015.

KRIKKE, H. R.; KOOI, E. J.; SCHUUR, P. C. Network design in reverse logistics: a quantitative model. In: *New trends in distribution logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 45-61, 1999.

KUMAR, S.; PUTNAM, V.. Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. **International Journal of Production Economics**, v. 115, n. 2, p. 305-315, 2008.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Logística reversa dos pneus usados no Brasil. **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 49-58, 2013.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Reciclagem de pneus: discussão do impacto da política brasileira. **Engevista**, v. 11, n. 1, p. 32-49, 2010.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J.A.S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

LAGARINHOS, C. A. F. Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo.

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

LEITE, P. R. Logística reversa: meio ambiente e competitividade. **Pearson Prentice Hall**, 2003.

LIBERA, F. V. D.; ZANINI, M. A.; ROSSATO, M. V.; GUSE, J. C.; DÖRR, A. C. Parâmetros operacionais para implantação de uma recicladora de pneus inservíveis em santa maria-rs. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 6, n. 6, p. 1049–1065, 2012.

LIN, C.; HUANG, C.; SHERN, C. Recycling waste tire powder for the recovery of oil spills. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 10, p. 1162-1166, 2008.

INCT-L - Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística. *Índice Nacional de Custo do Transporte Carga Lotação | INCT-L*. 2017. Disponível em: <<http://www.ntctec.org.br>> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management—A review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 401-412, 2009.

MILANEZ, B.; BÜHRS, T. Extended producer responsibility in Brazil: the case of tyre waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 6, p. 608-615, 2009.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. **Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**, v. 8, p. 165-194, 2010

MORENO, A.; ALEM, D.; FERREIRA, D. Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. **Computers & Operations Research**, v. 69, p. 79-96, 2016.

NEXOJORNAL. *A trajetória do preço do combustível no Brasil nos últimos 16 anos*. 2017. Disponível em: <<https://www.nexojournal.com.br/grafico/2017/10/16/A-trajet%C3%B3ria-do-pre%C3%A7o-do-combust%C3%ADvel-no-Brasil-nos-%C3%BAltimos-16-anos>> Acesso em: 17 de dezembro de 2017.

OICA - Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles. *Production Statistics*. 2017. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

OLIVEIRA, O. J. de; CASTRO, R. de. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. Em: **XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DA PRODUÇÃO**, 17. 2007, Foz de Iguaçu.

PISHVAEE, M. S.; KIANFAR, K.; KARIMI, B. Reverse logistics network design using simulated annealing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 47, n. 1, p. 269-281, 2010.

POCHET, Y.; WOLSEY, L. A. Production planning by mixed integer programming. Springer Science & Business Media, 2006.

PORTAL BRASIL – Economia e Emprego. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/12/politica-de-valorizacao-garante-salario-minimo-de-r-937-em-2017>> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

RECICLANIP. Principais Destinações. 2015. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-principais-destinacoes>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

RECICLANIP. Ciclo do pneu. 2015. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-ciclo-do-pneu>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

RESCHNER, K. Scrap tire recycling. A summary of prevalent disposal and recycling methods. Entire-Engineering, Berlin, p. 1-16, 2008.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. **University of Nevada, Reno - Center for Logistics Management**, 1999.

SAAVEDRA, Y. M. B.; BARQUET, A. P.; ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; OMETTO, A. R. Remanufacturing in Brazil: case studies on the automotive sector. **Journal of Cleaner production**, v. 53, p. 267-276, 2013.

SASIKUMAR, P.; KANNAN, G.; HAQ, A. N. A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery - a case of truck tire remanufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, n. 9, p. 1223-1234, 2010.

SEBRAE – O Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. *Sebrae em São Paulo 2017*. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/sp?codUf=26>> Acesso em: 17 de agosto de 2017.

SCOPUS – Analyze Search Results. *Recycling, Reverse Logistic, Solid Waste*. 2018. Disponível em: <<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=363d718f267cc848056fd6a2a55d5f0b&origin=resultslist&src=s&s=ALL%28recycling%2c+reverse+logistic+and+solid+waste%29&sort=plf->>

<f&sdt=b&sot=b&sl=48&count=891&analyzeResults=Analyze+results&txGid=ac5cdf36002446c1968e9c30ce543a07>>Acesso em: 23 de fevereiro de 2018.

SEEANNER, F.; ALMADA-LOBO, B.; MEYR, H. Combining the principles of variable neighborhood decomposition search and the fix & optimize heuristic to solve multi-level lot-sizing and scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 303-317, 2013.

SILVA, J. P. da; DAMO, J. Plano de negócios para implantação de uma usina recicladora de pneus. **INNOVARE**, v. 1, n. 1, p 69-91, 2016.

SHERIFF, K. M.; GUNASEKARAN, A.; NACHIAPPAN, S. Reverse logistics network design: a review on strategic perspective. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 12, n. 2, p. 171-194, 2012.

SIENKIEWICZ, M.; KUCINSKA-LIPKA, J.; JANIK, H.; BALAS, A. Progress in used tyres management in the European Union: a review. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1742-1751, 2012.

SIENKIEWICZ, M.; JANIK, H.; BORZĘDOWSKA-LABUDA, K.; KUCIŃSKA-LIPKA, J. Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 560-571, 2017.

SINDUSCONSP – o Sindicato da Construção SP. *Encargos Sociais e Boletim Econômicos*. 2017. Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br/cub/>>Acesso em: 17de agosto de 2017.

SINPEC - Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback. *História do Pneu*. 2011.Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/>>. Acesso em: 30 de maio de 2017.

SOUZA, C. D. R.; D'AGOSTO, M. D. A. Análise dos custos logísticos aplicada à cadeia logística reversa do pneu inservível. **TRANSPORTES**, v. 21, n. 2, p. 38-47, 2013.

STARK, F. Configuração da Rede de Logística Reversa de Pneus Inservíveis no Estado de São Paulo. 2015. **Dissertação de Mestrado**, Engenharia da Produção da Universidade Federal de São Carlos.

SUYABATMAZ, A. Ç. ; ALTEKIN, F. T.; ŞAHIN, G. Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider. **Computers & Industrial Engineering**, v. 70, p. 74-89, 2014.

TOSO, E. A. V.; MORABITO, R.; CLARK, A. R. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 813-821, 2009.

VERTER, V. Uncapacitated and capacitated facility location problems. In: Foundations of location analysis. Springer, p. 25-37, 2011.

WOLSEY, L. A. Integer programming. Wiley, 1998.

YU, H.; SOLVANG, W. D. A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, p 2693–2711, 2016.

YU, H.; SOLVANG, W.D. A stochastic programming approach with improved multi-criteria scenario-based solution method for sustainable reverse logistics design of Waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Sustainability MDPI, Open Access Journal**, v. 8, n 12, p. 1331, 2016.

ZANDIEH, M.; CHENSEBLI, A. Reverse logistics network design: a water flow-like algorithm approach. **OPSEARCH**, v. 53, n. 4, p. 667-692, 2016.

APÊNDICES

A Validação com instância ilustrativa

Para a validação do modelo, foram realizados testes com uma instância ilustrativa, composta por 4 períodos de tempo, 20 Ecopontos, 4 Empresas de Destinação Final e 10 locais candidatos para a instalação dos Centros Intermediários. Na Figura 27 são apresentados os valores dos custos, rendas, capacidades e demais parâmetros desta instância. Vale a pena ressaltar que foram considerados dois tipos de veículos de transporte, dois possíveis tamanhos de instalação de centros intermediários, uma porcentagem de pneus ainda servíveis nos pneus descartados nos ecopontos de 20% e de aço nos pneus de 10% e, finalmente, uma quantidade de pneus descartados de 20.000 toneladas distribuída aleatoriamente entre os ecopontos e os períodos de tempo.

A Figura 28 mostra a distribuição espacial dos agentes envolvidos nesta instância ilustrativa. A Tabela 25, por outro lado, detalha a quantidade de pneus descartados nos ecopontos para cada período de tempo. A instância ilustrativa, caracteriza-se por estar representada no modelo matemático por 2.187 restrições, 20 variáveis binárias, 3.680 variáveis inteiras e 2.161, e variáveis contínuas.

Figura 27. Dados da instância ilustrativa

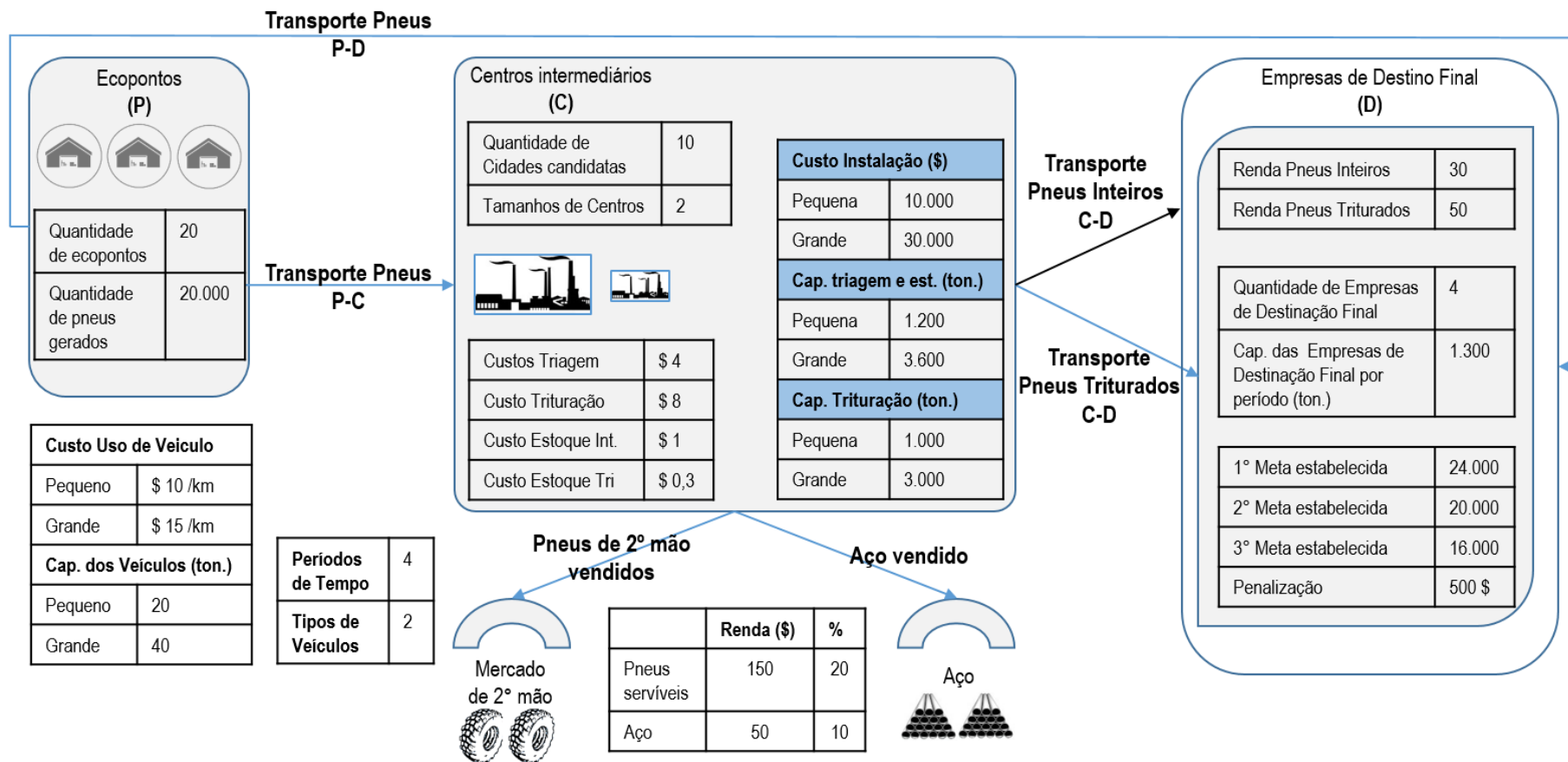


Figura 28. Distribuição espacial dos agentes nas instâncias ilustrativas.

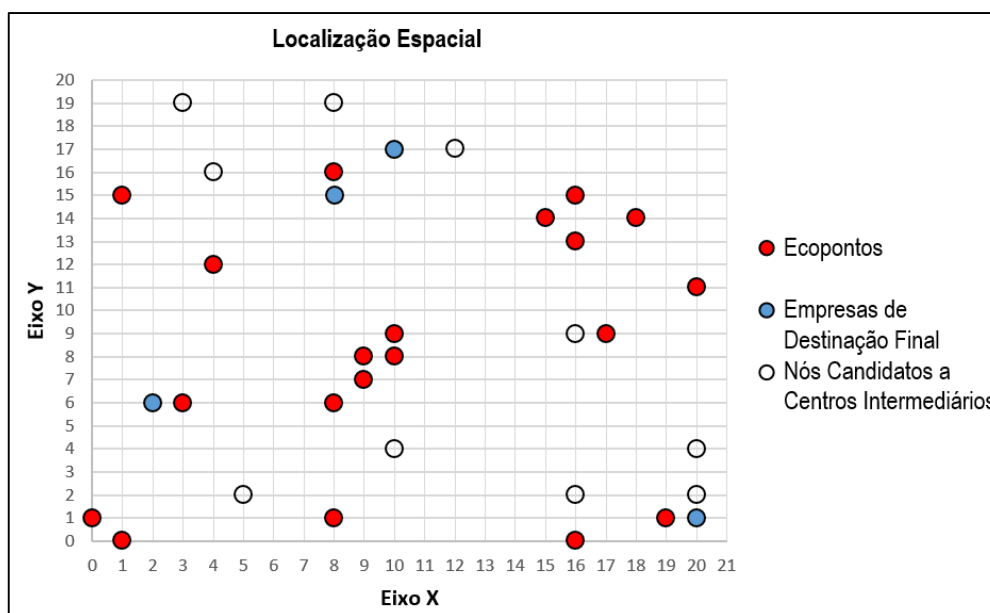


Tabela 25. Descarte de pneus nos ecopontos por período (instância ilustrativa)

ECOPONTO	LOCALIZAÇÃO	Quantidade de pneus descartados por período de tempo			
		1º período (t.)	2º período (t.)	3º período (t.)	4º período (t.)
P1	(4 , 12)	116	144	165	378
P2	(8 , 6)	449	379	185	179
P3	(16 , 0)	294	448	495	289
P4	(10 , 8)	69	247	201	198
P5	(1 , 0)	325	13	338	204
P6	(19 , 1)	365	199	455	326
P7	(9 , 7)	420	303	40	70
P8	(9 , 8)	290	325	163	57
P9	(8 , 1)	443	263	403	97
P10	(18 , 14)	110	192	451	284
P11	(20 , 11)	207	388	205	19
P12	(15 , 14)	181	440	169	168
P13	(16 , 15)	7	429	448	493
P14	(3 , 6)	161	196	111	53
P15	(10 , 9)	387	451	286	4
P16	(1 , 15)	310	9	147	77
P17	(0 , 1)	169	302	55	370
P18	(8 , 16)	428	108	22	246
P19	(17 , 9)	372	305	213	505
P20	(16 , 13)	52	366	318	451

Foram realizados testes com uma meta maior (24.000 t.), igual (20.000 t.) e menor (16.000 t.) que a quantidade de pneus descartados, considerando uma penalização de \$500 por tonelada de pneus abaixo da meta estabelecida. A Tabela 26 detalha os fluxos de

pneus existentes entre os agentes da rede reversa, ecopontos (P), Centros intermediários (C) e Empresas de destinação final (D), a quantidade de pneus triturados e vendidos como servíveis no mercado secundário, o aço vendido, e a quantidade e tipo de veículos de transporte utilizados, para a instância ilustrativa com cada uma das metas estabelecidas.

Tabela 26. Fluxos de pneus dos resultados da instância ilustrativa.

Meta (t.)	Fluxo Pneus (t.)			Pneus para reuso (t.)	Pneus Triturados	Total Aço (t.)	Pendentes da Meta (t.)	Veículos Tipo 1	Veículos Tipo 2
	P-D	P-C	C-D						
24.000	19	19.981	17.982.9	0	19.981	1.998,1	4000	21	721
20.000	1	19.999	17.999.1	0	19.999	1.999,9	0	25	719
16.000	1	19.999	14.399.28	3.999,8	15.999	1.599,9	0	11	680

Os resultados obtidos para a instância com meta de destinação maior e igual à quantidade de pneus descartados foram muito semelhantes, pois o modelo prioriza o envio de pneus para destinação final ao invés da comercialização de pneus servíveis no mercado secundário, já que a penalização pelo não cumprimento da meta é maior que o valor de venda de pneus servíveis.

Desta forma, ao resolver a instância ilustrativa com as metas de 24.000 toneladas e 20.000 toneladas, os resultados mostram que é adequado instalar 5 centros intermediários de tamanho pequeno nos pontos (20;2), (16;9), (12;17), (4;16) e (5;2), com uma porcentagem média de utilização de 83% no relacionado com a recepção e triagem de pneus, e de 100% no relacionado com a trituração de pneus, em ambos casos.

Além disso, as quantidades de pneus enviados às empresas intermediárias, o aço e os pneus servíveis vendidos nos mercados secundários, e até a quantidades de veículos de transporte utilizados nestes casos foram muito semelhantes. Na instância ilustrativa com meta de 24.000 toneladas, são enviadas 19.981 toneladas de pneus para as empresas intermediárias, são vendidas 1.998 toneladas de aço e não são reutilizados pneus servíveis. Para o transporte são necessárias 21 viagens com veículos do tipo 1 e 721 viagens com veículos do tipo 2.

Na instância ilustrativa com meta de 20.000 toneladas, são enviadas 19.999 toneladas de pneus para as empresas intermediárias, são vendidas 1.999 toneladas de aço, sem reutilização (venda de pneus servíveis). Para o transporte são realizadas 25 viagens com veículos do tipo 1 e 719 viagens com veículos do tipo 2.

Por outro lado, ao resolver a instância ilustrativa com uma meta de 16.000 toneladas, os resultados foram um pouco diferentes, o modelo também indicou a instalação de 5 centros intermediários de tamanho pequeno, no entanto, nos pontos (20;2), (16;9), (12;17), (10;4) e (5;2), e com uma porcentagem média de utilização de 83% para recepção e triagem de pneus, e de 80% para a trituração de pneus.

São enviadas 19.999 toneladas de pneus para as empresas intermediárias, destas toneladas 3.999 são comercializadas no mercado secundário (pneus servíveis), 1.599 toneladas são vendidas como aço e a quantidade restante é enviada as empresas de destinação final como subproduto triturado, finalmente, são realizadas 11 viagens com veículos tipo 1 e 680 viagens com veículos tipo 2.

A Tabela 27 mostra os custos e rendas dos resultados da instância ilustrativa com cada uma das metas estabelecidas.

Tabela 27. Custos e rendas dos resultados da instância.

Meta (t.)	Custos				Penalização	Renda				
	Total	Transporte	Instalação	Operação		Total	Aço	Pneus servíveis	Pneus inteiros	Pneus triturados
24.000	2.343.112	53.254	50.000	239.858	2.000.000	999.619	99.904	0	570	899.144
20.000	343.427	53.341	50.000	240.085	0	999.980	99.995	0	30	899.955
16.000	305.044	47.032	50.000	208.012	0	1.399.960	79.996	599.970	29	719.964

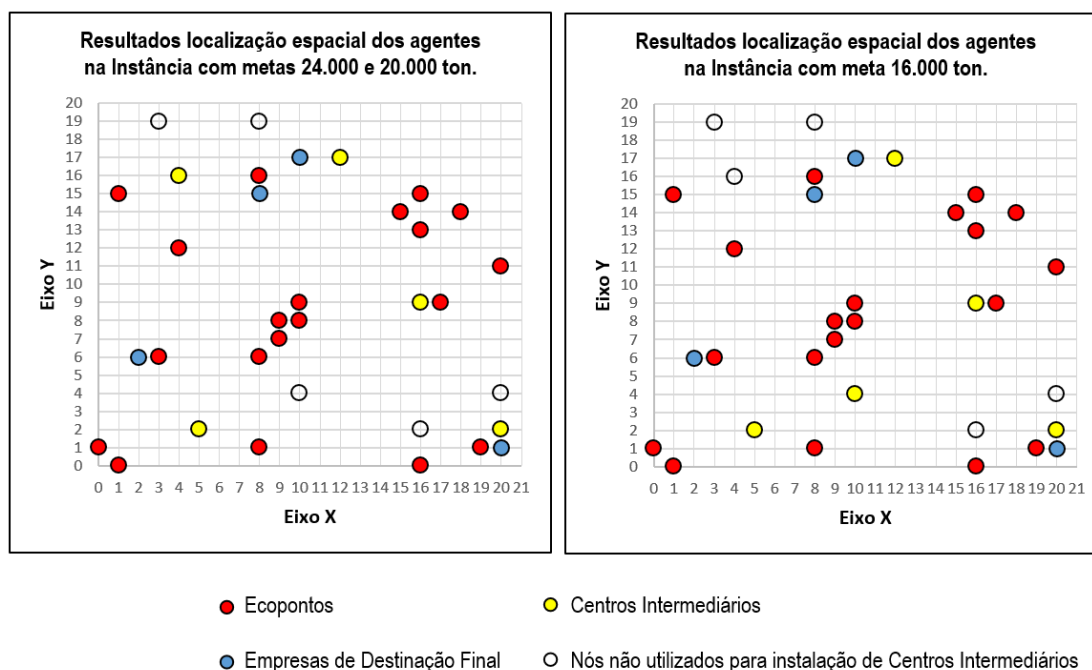
Os resultados obtidos em termos de fluxos e custos se comportaram como esperado. Os fluxos, custos e rendas dos testes da instância ilustrativa, dependem notavelmente da relação existente entre a meta de descarte e a quantidade de pneus descartados.

Quando a quantidade de pneus descartados nos ecopontos é maior que a meta de descarte estabelecida o modelo tende, após o cumprimento da meta, a aumentar os lucros da rede reversa por meio da venda de pneus reusáveis no mercado secundários, como pode ser observado nos resultados na instância ilustrativa com meta de 16.000 t. Caso contrário, o modelo foca o cumprimento da meta com a quantidade de pneus existente, não deixando material para a venda de pneus servíveis no mercado secundário. Ou seja, todos os pneus enviados aos centros intermediários estão direcionados ao aumento de seu valor com a trituração e não com a triagem, como se evidencia nas instâncias ilustrativas com metas de 20.000 e 24.000 t., onde todas as quantidades de pneus enviados aos centros

intermediários foram trituradas e a porcentagem de utilização das atividades de trituração dos centros intermediários foi de 100%.

A Figura 29 mostra a localização dos Centros Intermediários abertos na instância ilustrativa, com os diferentes valores de meta de descarte. Vale a pena ressaltar, que dos 10 locais candidatos para instalação de centros intermediários, 4 sempre foram escolhidos nos 3 casos testados, o que pode ser explicado pelo fato de que estes se encontram muito próximos a vários ecopontos com grande quantidade de pneus descartados, e apenas houve diferença na instalação de um quinto centro intermediário, (4;16) nos casos de metas de 24.000 e 20.000 toneladas e (10;4) no caso de meta de 16.000 toneladas.

Figura 29. Localização dos Centros Intermediários nas instâncias ilustrativas



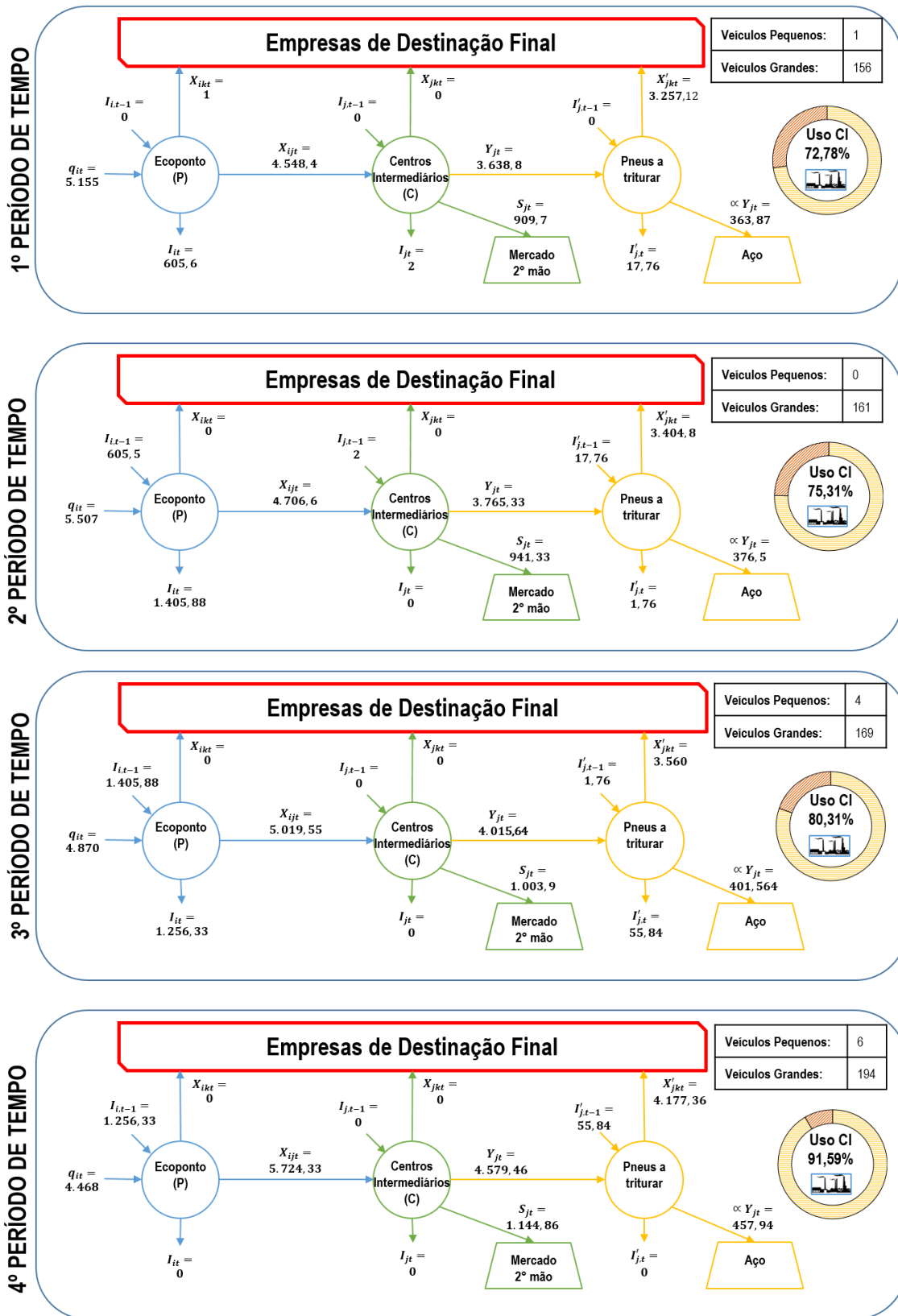
A Figura 30 detalha o balanço de fluxo de pneus inservíveis entre os diferentes agentes da rede reversa da instância ilustrativa de 16.000 ton e diferentes períodos de tempo. A Figura 30 se divide em 4 partes, uma para cada período de tempo, mostrando o fluxo de pneus inteiros nos ecopontos (azul), o fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários (verde) e o fluxo de pneus triturados nos centros intermediários (amarela).

Além dos fluxos de pneus entre agentes, na Figura 30 estão o número de viagens com cada tipo de veículo para transportar os pneus e a porcentagem de utilização dos centros intermediários, em cada período.

A Figura 30 mostra que nas relações de fluxo entre os agentes da rede em cada período, os pneus que são deixados em estoque ao final de qualquer período de tempo (I_{jt} ou I'_{jt}), são considerados no período seguinte ($I_{j,t-1}$ ou $I'_{j,t-1}$).

No caso do primeiro período, são deixados em estoque nos ecopontos 605,6 toneladas de pneus inteiros (I_{p1}), e nos centros intermediários 2 toneladas de pneus inteiros (I_{c1}) e 17,76 toneladas de pneus triturados (I'_{c1}). Logo, para o segundo período da mesma instância estas quantidades são incluídas como estoques do período anterior ($I_{p,2-1}$, $I_{c,2-1}$) e ($I'_{c,2-1}$).

Figura 30. Fluxos de pneus para a instância ilustrativa com meta de 16.000 t



B Testes preliminares para parametrização do Solver

Os testes preliminares foram realizados com o objetivo de determinar a melhor configuração do pacote CPLEX para abordar o problema e o modelo da forma mais eficiente. Desta forma, a instância baseada na meta de descarte e quantidade de pneus destinados no ano 2015 foi resolvida considerando diferentes configurações do pacote CPLEX, no referente ao algoritmo usado na resolução do subproblema MIP inicial: *default* (escolha automática), *primal simplex*, *dual simplex*, *barrier* e *concurrent* (vários algoritmos de uma só vez, se é possível). A Tabela 28, mostra os resultados obtidos com as diferentes configurações do algoritmo usado na resolução do subproblema MIP inicial do CPLEX, como pode ser evidenciado a melhor opção é a estratégia do uso de uso de vários algoritmos de uma só vez se é possível para resolver o MIP inicial (*concurrent*), seguida da estratégia *default* (escolha automática) do pacote de CPLEX.

Tabela 28. Resultados das diferentes estratégias para a solução do problema MIP inicial.

Configuração	Estratégia	Objetivo (\$)	Limitante inferior (\$)	GAP (%)	Tempo (seg.)
<i>Default</i>	Default	41.560.788	40.699.316	2,07	7.200
<i>Mipstarlag 1</i>	Primal simplex	41.717.032	40.735.521	2,35	7.200
<i>Mipstarlag 2</i>	Dual simplex	42.238.277	40.719.692	3,60	7.200
<i>Mipstarlag 4</i>	barrei	42.616.337	40.697.305	4,50	7.200
<i>Mipstarlag 6</i>	Concurrent	41.505.640	40.716.122	1,90	7.200

Do mesmo modo, foram realizados testes considerando diferentes estratégias para abordar o problema MIP no CPLEX. Foram consideradas as estratégias de geração agressiva de cortes (*mircuts 2*), de utilização de heurística de ramificação local (*lbheur 1*), de não utilização da heurística de busca de vizinhança induzida por relaxamento (*rinsheur -1*) e de escolha do próximo nó a testar quando é o nó do melhor limitante (*nodeselect 2*). A Tabela 29, mostra os resultados obtidos com as diferentes configurações usadas para abordar o problema MIP no CPLEX. Como pode ser evidenciado a melhor opção destas estratégias é a utilização da configuração *mircuts 2* (geração agressiva de cortes) do pacote de CPLEX.

Tabela 29. Resultados das diferentes estratégias para a solução do problema MIP.

Configuração	Estratégia	Objetivo (\$)	Limitante inferior (\$)	GAP (%)	Tempo (seg.)
<i>Default</i>	Default	41.560.788	40.699.316	2,07	7.200
<i>Mircuts 2</i>	Cortes agressivos	41.452.487	40.812.627	1.54	7.200
<i>Nodeselect 2</i>	Escolha nó do melhor limitante	41.475.689	40.689.657	1.90	7.200
<i>Rinsheur -1</i>	Sem heurística de busca de vizinhança induzida por relaxamento	42.530.929	40.807.340	4.05	7.200
<i>Lbheur 1</i>	Uso de heurística de ramificação local	41.859.010	40.702.965	2.76	7.200

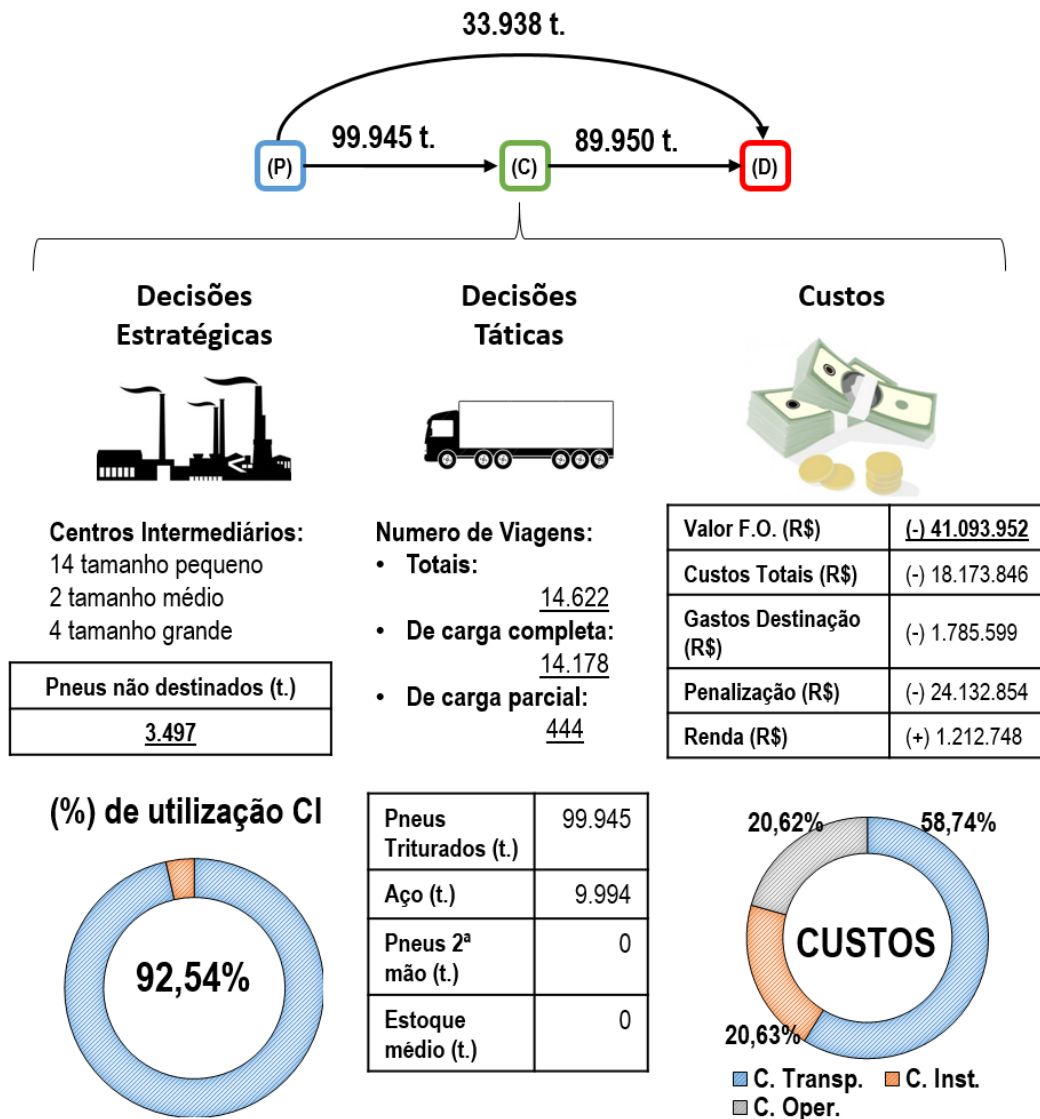
Com os resultados obtidos nestes testes preliminares, optou-se por realizar os testes computacionais das 40 instâncias com os 8 algoritmos propostos, utilizando a estratégia do uso de vários algoritmos de uma só vez para resolver o MIP inicial (*Mipstarlag 6*), e em relação às estratégias para abordar o problema MIP do CPLEX, será utilizada a configuração *mircuts 2*.

C Resultados detalhados da abordagem monopériodo do modelo proposto

De forma semelhante à abordagem multiperíodo, o modelo sugere a coleta de todos os pneus descartados nos ecopontos, não indica a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário, todos os pneus enviados aos centros intermediários são triturados e não são enviados pneus inteiros dos centros às empresas de destinação final. A multa pelo não cumprimento da meta também é igual à abordagem multiperíodo, R\$ 24.132.854.

A Figura 31 sintetiza os resultados gerais obtidos pela abordagem monopériodo do modelo proposto para a instância com informação agregada em um ano, e mostra os fluxos entre agentes, as decisões táticas e estratégicas, e os custos totais do sistema.

Figura 31. Síntese: Resultados da abordagem monopériodo para a instância agregada.



Vale a pena ressaltar, que apesar da coleta de pneus e a multa ser a mesma em ambas as abordagens, o fluxo de pneus entre agentes é um pouco diferente, dos ecopontos (P) às empresas de destinação final (D), foram enviadas 33.938 toneladas de pneus, dos ecopontos (P) aos centros intermediários (C) 99.945 toneladas, e dos centros intermediários (C) às empresas de destinação final (D) 89.950 toneladas.

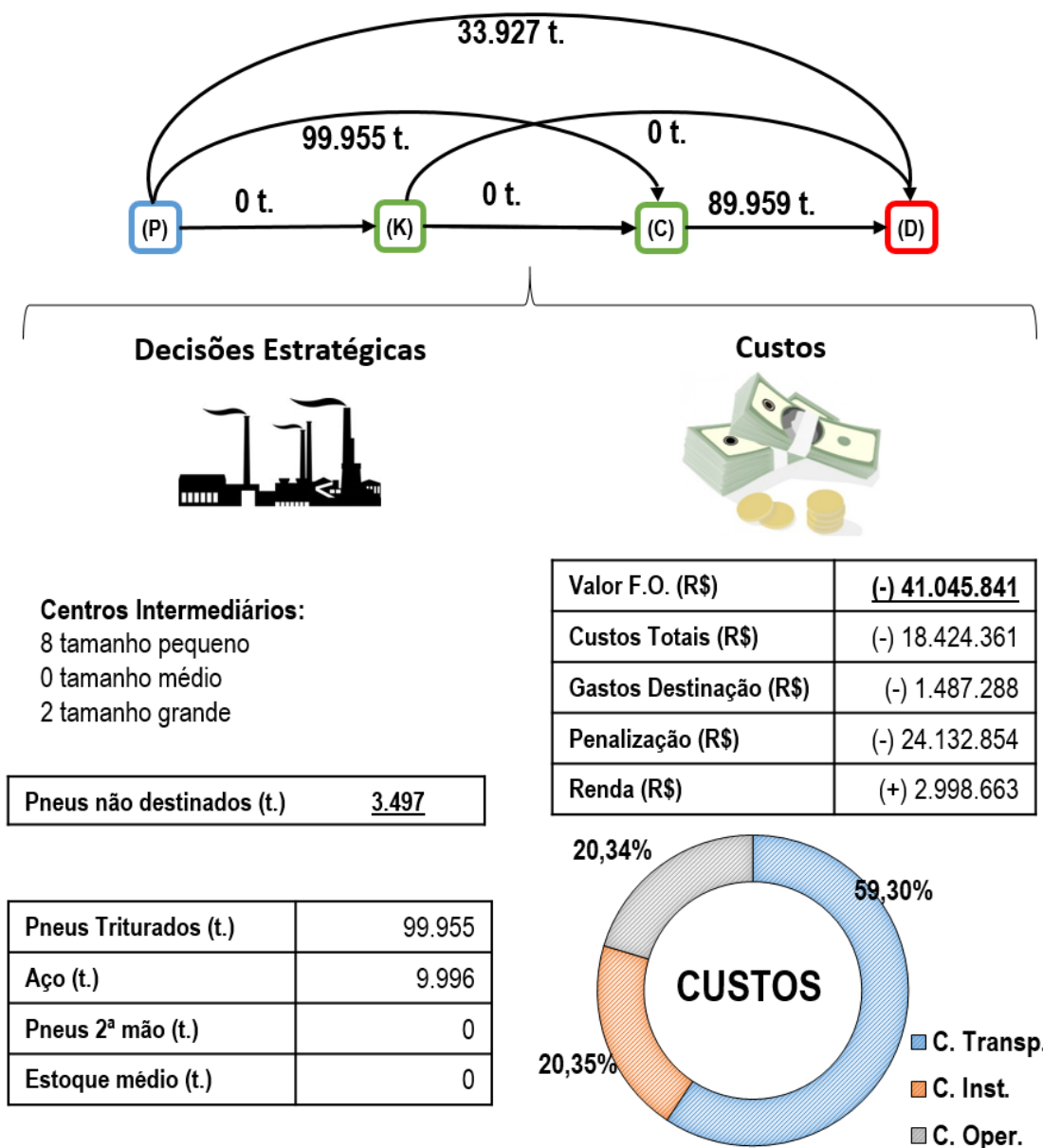
No que se refere aos custos totais do sistema, os custos de transporte (58,74%) foram os mais representativos, seguidos por os custos de abertura dos centros intermediários (20,63%), e por último, os custos de operação (20,62%). Os custos de transporte foram de R\$ 10.675.911, sendo R\$ 5.708.178 correspondente às 9.232 viagens no trecho P-C, R\$ 1.946.854 correspondente às 3.138 viagens no trecho P-D e R\$ 3.020.879 correspondente às 2.252 viagens no trecho C-D.

D Resultados detalhados do modelo Stark (2015)

De forma semelhante à abordagem multiperíodo e monoperíodo do modelo proposto neste estudo, o modelo de Stark (2015) sugere a coleta de todos os pneus descartados nos ecopontos e não indica a comercialização de pneus servíveis no mercado secundário. A multa pelo não cumprimento da meta também é similar, R\$ 24.132.854.

A Figura 32 sintetiza os resultados gerais obtidos pelo modelo para a 1ª instância com informação agregada em um ano, e mostra os fluxos entre agentes, as decisões táticas e estratégicas, e os custos totais do sistema.

Figura 32. Síntese: Resultados do modelo Stark (2015) para a instância agregada.



O fluxo de pneus entre agentes foi o seguinte: dos ecopontos (P) às plantas de destinação final (D), são enviadas 33.927 toneladas de pneus, dos ecopontos (P) aos centros intermediários (C) 99.955 toneladas, dos ecopontos (P) aos centros de armazenagem (K) 0 toneladas, dos centros de armazenamento às demais facilidades (C-D) 0 toneladas, e dos centros intermediários (C) às empresas de destinação final (D) 89.959 toneladas. Todos os pneus enviados aos centros intermediários (C) são triturados, por tanto, não há envio de pneus inteiros dos centros intermediários (C) às plantas de destinação final (D).

No que se refere aos custos totais do sistema, os custos de transporte (59,30%) foram os mais representativos, seguidos por os custos de abertura dos centros intermediários (20,35%), e por último, os custos de operação (20,34%).

ANEXOS

I Dados reais do Estado do São Paulo

Os dados coletados foram obtidos em sua maioria dos relatórios do IBAMA (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016) e de trabalhos da literatura focados na reciclagem de pneus (LIBERA et al., 2009; LAGARINHOS, 2011; ANDRADE; JESUS; CRUZ, 2015; STARK, 2015; SILVA e DAMO,2016). A seguir se apresentam os dados utilizados para a realização dos testes computacionais:

- **Capacidades de triagem, trituração e estoque dos centros intermediários:**

Tabela 30. Anexos: Capacidades dos centros intermediários.

Tipo de Centro Intermediário	Capacidade de trituração Mensal (t.)	Capacidade de triagem Mensal (t.)	Capacidade de estoque Mensal (t.)
Pequeno	300	375	75
Médio	600	750	150
Grande	900	1125	225

- **Capacidade dos veículos de carga:**

Tabela 31. Anexos: Capacidades dos Veículos de Carga.

Tipo de veículo de carga	Capacidade de transportar pneus inteiros (t.)	Capacidade de transportar pneus triturados (t.)
Único	11	40

- **Custos de abertura:**

Tabela 32. Anexos: Custos de Instalação dos Centros Intermediários.

Tipo de Centro Intermediário	Custo de instalação para cada ano (BRL)
Pequeno	125.000
Médio	250.000
Grande	375.000

- **Custos de operação:**

Tabela 33. Anexos: Custos de Operação nos Centros Intermediários.

	Valor R\$/t.
Custos de Triagem	12,5
Custos de Trituração	25,00
Custos de Estocagem pneus inteiros	7,50
Custos de Estocagem pneus triturados	1,875

- **Custos de destinação de pneus:**

Tabela 34. Anexos: Custos de Destinação de pneus.

Empresa de destinação Final	Custo de destinação (R\$)		Capacidade anual (t.)	Capacidade bimestral (t.)
	Pneus Inteiros	Pneus Triturados		
D1	101.65	0	47.847	7.974,50
D2	50.83	0	23.732	3.955,33
D3	50.83	0	25.937	4.322,83
D4	50.83	0	20.855	3.475,83
D5	50.83	0	3.787	631,17
D6	50.83	0	14.047	2.341,17
D7	50.83	0	15.725	2.620,83
D8	50.83	0	4.794	799,00
D9	50.83	0	2.062	343,67
D10	50.83	0	5.370	895,00
D11	50.83	0	479	79,83
D12	203.31	Não se aplica	1.966	327,67
D13	50.83	0	863	143,83
D14	50.83	0	719	119,83
D15	50.83	0	431	71,83
D16	203.31	Não se aplica	431	71,83
D17	117.7	18	336	56,00
D18	203.31	Não se aplica	23.731	3.955,17
D19	203.31	Não se aplica	431	71,83
D20	203.31	Não se aplica	431	71,83
TOTAL	-	-	193.974	32.329

- **Renda de Produtos:**

Tabela 35. Anexos: Preço de venda do aço e dos pneus reutilizáveis.

	Valor R\$/t.
Renda de Aço	300,00
Renda de pneus servíveis	1525,00

- **Meta Estabelecida:**

Tabela 36. Anexos: Metas de destinação de pneus consideradas.

Meta estabelecida em 2015 no Brasil		560.337,64 t.
Meta de descarte de Pneus a Utilizar no Estudo	1°	137.380 t.
	2°	153.385 t.
	3°	131.088 t.

- **Penalização:** No relatório do IBAMA (2016) consta o valor da multa aos importadores pelo não cumprimento da meta de descarte no ano de 2015. A quantidade de pneus pendentes para esse ano foi de 18.360,61 toneladas e cinco empresas foram multadas com o valor de R\$ 25.086.000,00, por tal incumprimento. Desta forma, considerou-se que a penalização pelo não cumprimento da meta de coleta é de R\$ 6.900 por tonelada pendente (valor médio).
- **Volume dos pneus:** Estimou-se que uma tonelada de pneus triturado, ocupa um quarto do espaço de uma tonelada de pneus inteiro, isso com base nas capacidades dos veículos de transporte que podem carga cerca de 4 vezes mais toneladas de pneus quando se encontram em estado triturado.
- **Porcentagem:**

Tabela 37. Anexos: Porcentagem de aço e dos pneus reutilizáveis.

Fração de aço nos pneus	10%
Quantidade de pneus servíveis nos pneus descartados	20%

- **Capacidade de Transporte:** Na informação fornecida por RECICLANIP (2015) consta que a quantidade de pneus inteiros transportados dos ecopontos refere-se a 2.000 pneus de passeio ou 300 pneus de caminhões, ou seja, cerca de 11 toneladas. No relacionado à quantidade de pneus triturados que podem ser transportados considerou-se a capacidade total destes veículos de carga 40 toneladas.

Tabela 38. Anexos: Capacidade de carga dos veículos.

Capacidade de transporte: Pneus Inteiros	11 toneladas
Capacidade de transporte: Pneus triturados	40 toneladas

- **Localização:** O relatório de pneus IBAMA (2016) descreve a localização dos pontos de coleta de pneus e das empresas de destinação final de pneumáticos inservíveis presentes em todo Brasil. No caso particular do estado de São Paulo foram encontrados 412 ecopontos e 20 empresas de destinação final. Em relação aos potenciais candidatos para instalação de centros intermediários, foram consideradas as cidades principais das 41 regiões administrativas do estado.

Tabela 39. Anexos: Localização dos ecopontos do estado de São Paulo (Brasil).

Ecoponto	Município	Localização Ecopontos	
		Latitude	Longitude
1	Adamantina	-21.6761	-51.0663
2	Agudos	-22.4684	-48.9880
3	Altinópolis	-21.0155	-47.3997
4	Alvares Machado	-22.0797	-51.4687
5	Americana	-22.7360	-47.3264
6	Americana	-22.7649	-47.3262
7	Americana	-22.7461	-47.3264
8	Americana	-22.7453	-47.3572
9	Américo Brasiliense	-21.7287	-48.1043
10	Andradina	-20.8962	-51.3873
11	Angatuba	-23.5161	-48.4103
12	Araçatuba	-21.2233	-50.4373
13	Araçatuba	-21.1887	-50.4408
14	Araçatuba	-21.1736	-50.4202
15	Araçatuba	-21.2150	-50.4557
16	Araçatuba	-21.1930	-50.4425
17	Araraquara	-21.7681	-48.1702
18	Araraquara	-21.7793	-48.1711
19	Araraquara	-21.7974	-48.1734
20	Araraquara	-21.8132	-48.1745
21	Araras	-22.3601	-47.3910
22	Araras	-22.3604	-47.3886
23	Araras	-22.3568	-47.3927
24	Arealva	-22.0315	-48.9140
25	Arujá	-23.3936	-46.3036

26	Assis	-22.6733	-50.4212
27	Atibaia	-23.1156	-46.5626
28	Atibaia	-23.1463	-46.5991
29	Atibaia	-23.1211	-46.5624
30	Avanhandava	-21.4613	-49.9487
31	Avaré	-23.1103	-48.9386
32	Balsamo	-20.7346	-49.5832
33	Bariri	-22.0692	-48.7276
34	Barra Bonita	-22.4743	-48.5654
35	Barra Bonita	-22.4958	-48.5588
36	Barretos	-20.5665	-48.5669
37	Barretos	-20.5552	-48.5847
38	Barretos	-20.5702	-48.5765
39	Barretos	-20.5576	-48.5869
40	Barretos	-20.5621	-48.5888
41	Barueri	-23.4998	-46.8596
42	Barueri	-23.4977	-46.8554
43	Barueri	-23.5048	-46.8644
44	Barueri	-23.4952	-46.8931
45	Barueri	-23.4064	-46.8645
46	Barueri	-23.5138	-46.8912
47	Bastos	-21.9216	-50.7275
48	Bauru	-22.3284	-49.0611
49	Bauru	-22.2722	-49.0977
50	Bauru	-22.3338	-49.0483
51	Bauru	-22.3254	-49.0334
52	Bauru	-22.3294	-49.0320
53	Bebedouro	-20.9395	-48.4643
54	Birigui	-21.2931	-50.3525
55	Birigui	-21.2950	-50.3435
56	Birigui	-21.2916	-50.3283
57	Bocaina	-22.1400	-48.5223
58	Boituva	-23.2799	-47.6653
59	Borborema	-21.6191	-49.0911
60	Botucatu	-22.8806	-48.4417
61	Botucatu	-22.9151	-48.4485
62	Bragança Paulista	-20.5439	-47.3973
63	Bragança Paulista	-22.9399	-46.5225
64	Brotas	-22.4275	-48.0372
65	Buritama	-21.0722	-50.1466
66	Cachoeira Paulista	-22.6644	-45.0096
67	Cajobi	-20.8748	-48.9872
68	Cajuru	-21.2754	-47.3035
69	Campinas	-22.8766	-47.0448
70	Campinas	-22.9424	-47.1743

71	Campinas	-22.9155	-47.0713
72	Capivari	-23.0055	-47.5081
73	Caraguatatuba	-23.6195	-45.4098
74	Caraguatatuba	-23.6278	-45.4242
75	Caraguatatuba	-23.6156	-45.4333
76	Carapicuíba	-23.5579	-46.8374
77	Carapicuíba	-23.5624	-46.8353
78	Carapicuíba	-23.5246	-46.8157
79	Catanduva	-21.1466	-48.9739
80	Catanduva	-21.1298	-48.9726
81	Cerqueira Cesar	-23.0435	-49.1833
82	Conchal	-22.3445	-47.1622
83	Conchas	-23.0167	-48.0134
84	Cordeirópolis	-22.4835	-47.4541
85	Cosmópolis	-22.6489	-47.1972
86	Cosmorama	-20.4772	-49.8142
87	Cotia	-23.5981	-46.8414
88	Cotia	-23.6063	-46.9427
89	Cotia	-23.6066	-46.9155
90	Cotia	-23.6027	-46.8483
91	Cotia	-23.5923	-46.8355
92	Cubatão	-23.6346	-46.4994
93	Diadema	-23.6755	-46.5857
94	Diadema	-23.7008	-46.6050
95	Dracena	-21.4848	-51.5355
96	Duartina	-22.4007	-49.5415
97	Embu	-23.6669	-46.8007
98	Embu	-23.6716	-46.8459
99	Embu	-23.6494	-46.8500
100	Fernandópolis	-20.2629	-50.2350
101	Ferraz de Vasconcelos	-23.5506	-46.3792
102	Franca	-20.5528	-47.4426
103	Franca	-20.5486	-47.4177
104	Franca	-20.5424	-47.4219
105	Franca	-20.5330	-47.4092
106	Francisco Morato	-23.2830	-46.7473
107	Francisco Morato	-23.2947	-46.7520
108	Franco da Rocha	-23.3255	-46.7538
109	Franco da Rocha	-23.3339	-46.7264
110	Franco da Rocha	-23.3306	-46.7297
111	Franco da Rocha	-23.3320	-46.7319
112	Garça	-22.1877	-49.6557
113	Guaira	-22.5111	-51.6629
114	Guaraçai	-21.0319	-51.2052
115	Guararapes	-21.2549	-50.6458

116	Guaratinguetá	-22.8160	-45.2018
117	Guaratinguetá	-22.8151	-45.1981
118	Guaratinguetá	-22.7922	-45.2037
119	Guaratinguetá	-22.8195	-45.1961
120	Guarei	-23.3728	-48.1863
121	Guariba	-21.3142	-48.1615
122	Guarujá	-23.9673	-46.2768
123	Guarulhos	-23.4569	-46.5378
124	Guarulhos	-23.4836	-46.5417
125	Guarulhos	-23.4649	-46.5132
126	Guarulhos	-23.4358	-46.4628
127	Guarulhos	-23.4568	-46.4728
128	Guarulhos	-23.5058	-46.5578
129	Guarulhos	-23.4707	-46.4803
130	Herculândia	-22.0005	-50.3981
131	Iaras	-22.8717	-49.1638
132	Ibaté	-21.9588	-47.9887
133	Ibira	-21.0835	-49.2453
134	Ibitinga	-21.7602	-48.8208
135	Igaraçu do Tietê	-22.5095	-48.5601
136	Ilha Solteira	-20.4291	-51.3440
137	Indaiatuba	-23.0932	-47.1929
138	Indaiatuba	-23.1013	-47.1975
139	Indaiatuba	-23.1308	-47.2504
140	Irapuru	-21.5723	-51.3541
141	Itaí	-23.4057	-49.0919
142	Itajobi	-21.3128	-49.0633
143	Itapeçerica da Serra	-23.7126	-46.8528
144	Itapeçerica da Serra	-23.6880	-46.8618
145	Itapeçerica da Serra	-23.6909	-46.8631
146	Itapeçerica da Serra	-23.6895	-46.8559
147	Itapetininga	-23.5976	-48.0397
148	Itapetininga	-23.5689	-48.0305
149	Itapeva	-23.9820	-48.9172
150	Itapevi	-23.5422	-46.9351
151	Itapevi	-23.5479	-46.9420
152	Itapevi	-23.5464	-46.9422
153	Itapira	-22.4289	-46.8213
154	Itápolis	-21.6004	-48.8258
155	Itaquaquecetuba	-23.4572	-46.3304
156	Itararé	-24.1080	-49.3442
157	Itatiba	-23.0026	-46.8440
158	Itatinga	-23.0957	-48.6202
159	Itu	-23.2556	-47.3234
160	Itu	-23.2608	-47.2957

161	Jaboticabal	-21.2593	-48.3130
162	Jaboticabal	-21.2599	-48.3134
163	Jacareí	-23.2977	-45.9673
164	Jacareí	-23.2632	-45.9560
165	Jacareí	-23.3075	-45.9258
166	Jaguariúna	-22.7397	-47.0206
167	Jales	-20.2745	-50.5477
168	Jales	-20.2618	-50.5442
169	Jandira	-23.5185	-46.9224
170	Jandira	-23.5256	-46.9026
171	Jandira	-23.5214	-46.9259
172	Jau	-22.3034	-48.5866
173	Jau	-22.2973	-48.5651
174	Jau	-22.2974	-48.5652
175	Jose Bonifácio	-21.0378	-49.6630
176	Jundiaí	-23.1608	-47.0029
177	Jundiaí	-23.1909	-46.9021
178	Junqueirópolis	-23.1748	-46.8849
179	Leme	-22.1774	-47.4006
180	Lençóis Paulista	-22.5653	-48.8172
181	Limeira	-22.5551	-47.3810
182	Limeira	-22.5617	-47.4082
183	Limeira	-22.5614	-47.4125
184	Louveira	-23.0765	-46.9547
185	Lucélia	-21.7203	-51.0193
186	Macatuba	-22.4978	-48.7173
187	Mairiporã	-23.2922	-46.6040
188	Manduri	-23.0017	-49.3303
189	Marília	-22.2104	-49.9517
190	Marília	-22.2281	-49.9290
191	Marília	-22.2255	-49.9625
192	Marília	-22.2264	-49.9240
193	Martinópolis	-22.1439	-51.1683
194	Matão	-21.5877	-48.3922
195	Mauá	-23.6653	-46.4384
196	Mauá	-23.6622	-46.4308
197	Mirandópolis	-21.1329	-51.0977
198	Mirante do Paranapanema	-22.3453	-52.2656
199	Mogi das Cruzes	-23.5390	-46.2280
200	Mogi das Cruzes	-23.5256	-46.2024
201	Mogi Guaçu	-22.3638	-46.9452
202	Mogi Guaçu	-22.3577	-46.9091
203	Mogi Guaçu	-22.3746	-46.9397
204	Mogi Mirim	-22.4248	-46.9482
205	Mogi Mirim	-22.4379	-46.9544

206	Mogi Mirim	-22.4455	-46.9754
207	Monte Alto	-21.2616	-48.4607
208	Monte Aprazível	-20.7603	-49.7000
209	Monte Aprazível	-20.7618	-49.7135
210	Monte Castelo	-21.3008	-51.5692
211	Monte Mor	-22.9421	-47.3188
212	Nova Europa	-21.7798	-48.5627
213	Nova Granada	-20.5396	-49.3229
214	Nova Independência	-21.1044	-51.4929
215	Nova Luzitana	-20.8650	-50.2831
216	Nova Odessa	-22.7721	-47.3083
217	Olímpia	-20.7379	-48.8922
218	Osasco	-23.5367	-46.7806
219	Osasco	-23.5382	-46.7882
220	Osasco	-23.5649	-46.7923
221	Osasco	-23.5582	-46.7868
222	Oswaldo Cruz	-21.7901	-50.8852
223	Ourinhos	-22.9791	-49.8680
224	Ourinhos	-22.9836	-49.8663
225	Ourinhos	-22.9599	-49.8855
226	Ouroeste	-19.9992	-50.3718
227	Pacaembu	-23.5471	-46.6674
228	Palmeira D'Oeste	-20.4152	-50.7637
229	Palmital	-22.7816	-50.2108
230	Panorama	-21.3626	-51.8555
231	Paraguaçu Paulista	-22.4195	-50.5796
232	Paraíso	-21.0164	-48.7766
233	Paranapuã	-20.0640	-50.5901
234	Paulínia	-22.7762	-47.1603
235	Pederneiras	-22.3431	-48.7592
236	Penápolis	-21.4158	-50.0795
237	Pereira Barreto	-20.6357	-51.0996
238	Piacatu	-21.5926	-50.6008
239	Piedade	-23.7055	-47.4271
240	Pindamonhangaba	-22.9196	-45.4557
241	Pindamonhangaba	-22.9377	-45.4292
242	Piracicaba	-22.7293	-47.6479
243	Piracicaba	-22.7091	-47.6612
244	Piracicaba	-22.7476	-47.6449
245	Piracicaba	-22.6827	-47.6833
246	Piraju	-23.2136	-49.3750
247	Pirangi	-21.0891	-48.6612
248	Pirassununga	-21.9985	-47.4438
249	Pitangueiras	-23.6981	-46.6402
250	Poa	-23.5334	-46.3512

251	Poa	-23.5333	-46.3542
252	Pompéia	-22.1054	-50.1955
253	Pontalinda	-20.4401	-50.5262
254	Porto Feliz	-23.2183	-47.4867
255	Praia Grande	-24.0065	-46.4268
256	Pratânia	-22.8083	-48.6650
257	Presidente Epitácio	-21.7703	-52.1389
258	Presidente Prudente	-22.1352	-51.3894
259	Presidente Prudente	-22.1372	-51.3965
260	Presidente Prudente	-22.1386	-51.3828
261	Presidente Prudente	-22.1686	-51.3699
262	Presidente Venceslau	-21.8769	-51.8494
263	Promissão	-21.5365	-49.8596
264	Regente Feijó	-22.2238	-51.3118
265	Ribeirão dos Índios	-21.8386	-51.6042
266	Ribeirão Pires	-23.7140	-46.3973
267	Ribeirão Pires	-23.6785	-46.4220
268	Ribeirão Preto	-21.1603	-47.7943
269	Ribeirão Preto	-21.1841	-47.7994
270	Ribeirão Preto	-21.1750	-47.8033
271	Ribeirão Preto	-21.1993	-47.8082
272	Ribeirão Preto	-21.2071	-47.8113
273	Ribeirão Preto	-21.1651	-47.7561
274	Ribeirão Preto	-21.1367	-47.7881
275	Rinópolis	-21.7202	-50.7148
276	Rio Claro	-22.4055	-47.5732
277	Rio Claro	-22.3652	-47.5566
278	Rio Claro	-22.4045	-47.5736
279	Rosana	-22.5810	-53.0588
280	Sales Oliveira	-20.7696	-47.8374
281	Salto	-23.2063	-47.2932
282	Salto	-23.1904	-47.3115
283	Santa Adélia	-21.3178	-48.8138
284	Santa Bárbara D'Oeste	-22.7567	-47.4074
285	Santa Bárbara D'Oeste	-22.7234	-47.4239
286	Santa Clara d'Oeste	-20.0951	-50.9308
287	Santa Cruz do Rio Pardo	-22.9011	-49.6288
288	Santa Fé do Sul	-20.1962	-50.9354
289	Santa Gertrudes	-22.4572	-47.5047
290	Santa Isabel	-23.3166	-46.2314
291	Santa Mercedes	-21.3508	-51.7501
292	Santana de Parnaíba	-23.4057	-46.8785
293	Santo Anastácio	-21.9736	-51.6465
294	Santo André	-23.6370	-46.5333
295	Santo André	-23.6248	-46.5407

296	Santo André	-23.6267	-46.5396
297	Santo André	-23.6814	-46.4892
298	Santos	-23.9449	-46.3265
299	Santos	-23.9489	-46.3256
300	Santos	-23.9352	-46.3312
301	Santos	-23.9327	-46.3622
302	Santos	-23.9467	-46.3256
303	Santos	-23.9339	-46.3351
304	São Bernardo do Campo	-23.7148	-46.5519
305	São Bernardo do Campo	-23.6683	-46.5792
306	São Bernardo do Campo	-23.6695	-46.5564
307	São Bernardo do Campo	-23.7485	-46.5883
308	São Caetano do Sul	-23.6228	-46.5487
309	São Caetano do Sul	-23.6229	-46.5587
310	São Caetano do Sul	-23.6393	-46.5672
311	São Caetano do Sul	-23.6056	-46.5754
312	São Caetano do Sul	-23.6178	-46.5703
313	São Caetano do Sul	-23.6230	-46.5607
314	São Carlos	-22.0330	-47.8835
315	São Carlos	-22.0078	-47.8910
316	São Carlos	-22.0215	-47.8852
317	São Carlos	-21.9914	-47.8958
318	São Joaquim da Barra	-20.5907	-47.8752
319	São José do Rio Preto	-20.8142	-49.3784
320	São José do Rio Preto	-20.8234	-49.4019
321	São José do Rio Preto	-20.5907	-47.8752
322	São José do Rio Preto	-20.8153	-49.3668
323	São José do Rio Preto	-20.7988	-49.3675
324	São José do Rio Preto	-20.8432	-49.3703
325	São José do Rio Preto	-20.8229	-49.3943
326	São José dos Campos	-23.1928	-45.8852
327	São José dos Campos	-23.1991	-45.8860
328	São José dos Campos	-23.2613	-45.8710
329	São Manuel	-22.7326	-48.5728
330	São Miguel Arcanjo	-23.8876	-48.0013
331	São Paulo	-23.6109	-46.6646
332	São Paulo	-23.4575	-46.5846
333	São Paulo	-23.5267	-46.5568
334	São Paulo	-23.6411	-46.6415
335	São Paulo	-23.5021	-46.6664
336	São Paulo	-23.5589	-46.6815
337	São Paulo	-23.4682	-46.5822
338	São Paulo	-23.6212	-46.6899
339	São Paulo	-23.5975	-46.6099
340	São Paulo	-23.6116	-46.6850

341	São Paulo	-23.5284	-46.6838
342	São Paulo	-23.5813	-46.7119
343	São Paulo	-23.6359	-46.7130
344	São Paulo	-23.5997	-46.4692
345	São Paulo	-23.5231	-46.8435
346	São Paulo	-23.5058	-46.6936
347	São Paulo	-23.6381	-46.6718
348	São Paulo	-23.5207	-46.6045
349	São Paulo	-23.5655	-46.4647
350	São Paulo	-23.5149	-46.5776
351	São Paulo	-23.5357	-46.6533
352	São Paulo	-23.5267	-46.5568
353	São Paulo	-23.5198	-46.6102
354	São Paulo	-23.5267	-46.5568
355	São Paulo	-23.5159	-46.5634
356	São Paulo	-23.6627	-46.6615
357	São Paulo	-23.5888	-46.5974
358	São Paulo	-23.5256	-46.5524
359	São Paulo	-23.5084	-46.4433
360	São Pedro	-22.5534	-47.9229
361	São Roque	-23.5419	-47.1313
362	São Vicente	-23.9463	-46.3881
363	Sarapuí	-23.6216	-47.8283
364	Sertãozinho	-21.1345	-47.9992
365	Sertãozinho	-21.1365	-47.9980
366	Sertãozinho	-21.1281	-48.0003
367	Severinia	-20.8112	-48.8058
368	Sorocaba	-23.4097	-47.3857
369	Sorocaba	-23.5117	-47.4941
370	Sorocaba	-23.5155	-47.4737
371	Sorocaba	-23.4907	-47.4394
372	Sorocaba	-23.5124	-47.4312
373	Sorocaba	-23.4357	-47.4863
374	Sorocaba	-23.4041	-47.3824
375	Sumaré	-22.8188	-47.2660
376	Sumaré	-22.8170	-47.2763
377	Sumaré	-22.8356	-47.2628
378	Sumaré	-22.8170	-47.2763
379	Suzano	-23.5477	-46.3071
380	Suzano	-23.5503	-46.3072
381	Suzano	-23.5040	-46.3082
382	Suzano	-23.5285	-46.3190
383	Tabatinga	-21.7271	-48.6206
384	Taboão da Serra	-23.6123	-46.7712
385	Taboão da Serra	-23.6166	-46.7943

386	Tanabi	-20.6296	-49.6591
387	Taquaritinga	-21.4071	-48.4963
388	Taquaritinga	-21.4106	-48.4828
389	Taquarituba	-23.5245	-49.2441
390	Tatuí	-23.6123	-46.7734
391	Tatuí	-23.3553	-47.8629
392	Taubaté	-23.0225	-45.5582
393	Taubaté	-23.0270	-45.5356
394	Teodoro Sampaio	-22.5325	-52.1679
395	Tietê	-23.1213	-47.7139
396	Torrinha	-22.4214	-48.2148
397	Três Fronteiras	-20.2345	-50.8840
398	Tupã	-21.9201	-50.5203
399	Tupi Paulista	-21.3880	-51.5737
400	União Paulista	-20.8877	-49.8950
401	Urânia	-20.2469	-50.6443
402	Urupês	-21.2037	-49.2936
403	Valinhos	-22.9594	-47.0173
404	Valinhos	-22.9630	-46.9876
405	Valparaíso	-21.1871	-50.9449
406	Vargem Grande Paulista	-23.6317	-47.0576
407	Várzea Paulista	-23.2332	-46.8457
408	Vinhedo	-23.0414	-46.9662
409	Viradouro	-20.8739	-48.2934
410	Votorantim	-23.5324	-47.4269
411	Votorantim	-23.5393	-47.4491
412	Votuporanga	-20.4195	-49.9783

Tabela 40. Anexos: Localização das plantas de processamento.

EMPRESAS DE DESTINAÇÃO FINAL			
NOTAÇÃO	MUNICÍPIO	Latitude	Longitude
D1	Utep do Brasil Ltda.	-23.5054993	-46.9734709
D2	CBL Comércio e Reciclagem de Borrachas Ltda.	-23.7488919	-46.592255
D3	Intercement Brasil S.A.	-23.6977272	-46.6684326
D4	Policarpo & Cia Ltda.	-22.9406443	-46.528486
D5	Roseli Fialho de Lana Emerich – Me	-21.1756604	-50.4724232
D6	Vila Nova Energia Ltda	-24.9627031	-49.5721615
D7	Votorantim Cimentos S.A	-23.472367	-48.1816857
D8	Intercement Brasil S/A	-23.697727	-46.668433
D9	Sukako Fabricação de Artefatos de Borracha Ltda.	-23.6021349	-46.5791559
D10	CBL Comércio E Reciclagem De Borrachas Ltda.	-23.7488919	-46.592255
D11	Borcol Indústria de Borracha Ltda.	-23.411055	-47.3890217

D12	Laminação de Pneus Nicoletti Ltda.	-21.7930328	-50.8966696
D13	CBL Comércio e Reciclagem de Borrachas Ltda.	-23.7488919	-46.592255
D14	Gonçalves & Bressan Ltda.	-21.1873532	-50.4651262
D15	Morales & Silva Recuperação de Materiais Ltda.	-20.6202648	-49.6615293
D16	Barão Comércio de Pneus Ltda	-22.3751732	-46.973133
D17	Torre Engenharia e Pesquisa Tecnológica Ltda	-23.694821	-46.4669907
D18	Interag Reciclagem de Pneus e Comércio de Peças EM	-23.500481	-47.4625007
D19	Pneus Sarapuí Com. Reciclagem Borrachas Eireli Epp	-23.6215386	-47.8282894
D20	Pneus Sarapuí Com. Reciclagem Borrachas Eireli Epp	-23.621539	-47.828289

Tabela 41. Anexos: locais candidatos para abertura de centros Intermediários.

Centro Intermediário	Capital da Região Administrativa	Localização	
		Latitude	Longitude
C1	Adamantina	-21.685062	-51.067485
C2	Andradina	-20.873064	-51.307618
C3	Araçatuba	-21.198786	-50.461192
C4	Araraquara	-21.77946	-48.156239
C5	Assis	-22.657106	-50.411992
C6	Avaré	-23.100193	-48.928564
C7	Barretos	-20.557321	-48.57716
C8	Bauru	-22.287857	-49.090549
C9	Botucatu	-22.840404	-48.545639
C10	Bragança Paulista	-22.929056	-46.562027
C11	Campinas	-22.895125	-47.030261
C12	Caraguatatuba	-23.63866	-45.363738
C13	Catanduva	-21.148876	-48.975961
C14	Cruzeiro	-22.572512	-44.962985
C15	Dracena	-21.48478	-51.535513
C16	Fernandópolis	-20.279466	-50.254812
C17	Franca	-20.593752	-47.424168
C18	Guaratinguetá	-22.792241	-45.203652
C19	Itapetininga	-23.591578	-48.029943
C20	Itapeva	-23.981984	-48.882203
C21	Jales	-20.269716	-50.544654
C22	Jaú	-22.299711	-48.558113
C23	Jundiá	-22.580934	-47.411829
C24	Limeira	-21.6466	-49.69431
C25	Lins	-22.204621	-49.939328
C26	Marília	-22.714636	-47.621832
C27	Ourinhos	-22.133253	-51.402197
C28	Piracicaba	-24.506764	-47.842532
C29	Presidente Prudente	-21.214065	-47.818133

C30	Registro	-22.39605	-47.566034
C31	Ribeirão Preto	-23.863893	-46.289291
C32	Rio Claro	-21.879237	-47.905261
C33	Santos	-21.96592	-46.79606
C34	São Carlos	-20.581633	-47.859763
C35	São João da Boa Vista	-20.816814	-49.382356
C36	São José do Rio Preto	-23.189506	-45.863013
C37	São José dos Campos	-23.682412	-46.595299
C38	Sorocaba	-23.469915	-47.436631
C39	Taubaté	-23.044878	-45.577817
C40	Tupã	-21.936305	-50.508807
C41	Votuporanga	-20.446186	-50.00458
C42	São Paulo	-23.54	-46.63

- **Custo de transporte:**

Tabela 42. Anexos: Custo de transporte de carga por tonelada.

PERCURSO	DISTÂNCIA (km)	R\$/t.
Muito curto	50	72.88
Curto	400	133.39
Médio	800	205.33
Longo	2,400	476.79
Muito longo	6,000	1075.37

- **Pneus descartados nos ecopontos:**

Tabela 43. Anexos: Quantidade de pneus descartados consideradas.

Pneus descartados 2015 no Brasil		518,924.36 t.
Quantidade de Pneus Descartados a Utilizar no Estudo	1°	133,882 t.
	2°	148,328 t.
	3°	127,550 t.

Quatro fatores de variação foram utilizados para a distribuição dos pneus entre os ecopontos, estes dados foram obtidos do site web do portal de estatística do estado de São Paulo do SEADE: <http://www.imp.seade.gov.br/frontend/#/>.

Tabela 44. Anexos: Fatores de variação para a distribuição dos pneus nos ecopontos.

LOCALIDADES	ECOPONTOS	FROTA 2015	PIB 2014	IDHM 2010	POPULAÇÃO 2016
Adamantina	1	24839	883055.34	0.79	33882
Agudos	1	18770	2096342.18	0.745	35525
Altinópolis	1	8673	397890.54	0.73	15560
Álvares Machado	1	13209	389859.19	0.758	23639
Americana	4	166462	10727868.54	0.811	225183
Américo Brasiliense	1	22455	701489.63	0.751	38030
Andradina	1	40370	2131965.26	0.779	55831
Angatuba	1	11379	765382.46	0.719	23586
Araraquara	4	167855	7975226.52	0.815	221205
Araras	3	92277	4431291.08	0.781	126338
Araçatuba	5	159204	6622807.75	0.788	187313
Arealva	1	3813	136500.43	0.744	8060
Arujá	1	51549	3759210.48	0.784	83849
Assis	1	71832	2637083.19	0.805	99001
Atibaia	3	101801	5420788.05	0.765	134652
Avanhandava	1	5208	182349.28	0.705	11787
Avaré	1	57248	2135621.4	0.767	85810
Bálsamo	1	5421	156157.84	0.756	8397
Bariri	1	22813	886685.94	0.75	33093
Barra Bonita	2	27013	1103599.45	0.788	35029
Barretos	5	84483	3790875.19	0.789	115907
Barueri	6	162118	46151952.39	0.786	255276
Bastos	1	14295	711653.85	0.751	20267
Bauru	5	263304	12137133.75	0.801	356769
Bebedouro	1	57614	2336312.85	0.78	74593
Birigui	3	91142	2721174.36	0.78	116637
Bocaina	1	6392	386317.45	0.742	11646
Boituva	1	37668	2587854	0.78	54017
Borborema	1	9262	320686.35	0.73	15045
Botucatu	2	90193	4186985.82	0.8	136091
Bragança Paulista	2	114782	4840392.41	0.776	157759
Brotas	1	14500	629690.48	0.74	23003
Buritama	1	10036	369668.83	0.763	16160
Cachoeira Paulista	1	14450	505805	0.764	31423
Cajobi	1	4904	116041.19	0.734	9987
Cajuru	1	13264	488168.12	0.713	24758
Campinas	3	857029	57673308.99	0.805	1142620
Capivari	1	32520	1639873.08	0.75	51993
Caraguatatuba	3	57851	2885242.92	0.759	110384
Carapicuíba	3	176988	4719835.34	0.749	385474
Catanduva	2	99963	3577634.55	0.785	115669
Cerqueira César	1	10292	507785.91	0.729	18553

Conchal	1	15827	530527.82	0.708	26484
Conchas	1	9270	292579.91	0.736	16799
Cordeirópolis	1	14922	1678842.96	0.758	23123
Cosmópolis	1	36650	1227129.44	0.769	66478
Cosmorama	1	4959	241035.88	0.722	7079
Cotia	5	129528	10118347.62	0.78	229300
Cubatão	1	53491	9304123.3	0.737	125047
Diadema	2	193533	13910516.89	0.757	397868
Dracena	1	32990	1095197.45	0.776	44396
Duartina	1	6794	199258.7	0.748	12088
Embu	3	104936	7412776.57	0.735	258917
Fernandópolis	1	53894	1686206.18	0.797	65663
Ferraz de Vasconcelos	1	63860	2747745.99	0.738	183163
Franca	4	239025	8069331.62	0.78	333405
Francisco Morato	2	42287	1268410.28	0.703	166077
Franco da Rocha	4	48757	2563524.62	0.731	144159
Garça	1	26567	998348.78	0.769	42712
Guaira	1	25921	1546205.96	0.753	38473
Guararapes	1	20042	782521.62	0.763	31570
Guaratinguetá	4	65536	4471713.41	0.798	116020
Guaraçai	1	5083	192117.93	0.719	8434
Guareí	1	5055	196295.62	0.687	15279
Guariba	1	18695	760060.69	0.719	37679
Guarujá	1	127288	7456001.46	0.751	305938
Guarulhos	7	618976	51389523.62	0.763	1300708
Herculândia	1	4377	212013.14	0.727	9036
Iaras	1	1613	110865.81	0.674	6677
Ibaté	1	16302	619797.63	0.703	33192
Ibirá	1	6157	206932.2	0.74	11627
Ibitinga	1	37018	1189076.92	0.747	56538
Igarapu do Tietê	1	11529	252015.26	0.727	23817
Ilha Solteira	1	16789	505621.53	0.812	25539
Indaiatuba	3	169345	12058634.24	0.788	229256
Irapuru	1	2995	75028.22	0.712	7502
Itaí	1	11859	464036.25	0.713	25505
Itajobi	1	10216	434904.69	0.73	14619
Itapeçerica da Serra	4	71458	2943707.31	0.742	162907
Itapetininga	2	88377	3935738.41	0.763	153861
Itapeva	1	54634	1995532.08	0.732	89992
Itapevi	3	87178	8867669.26	0.735	222501
Itapira	1	51375	2989267.19	0.762	70571
Itápolis	1	29332	1167131.67	0.744	40978
Itaquaquetuba	1	106547	5742348.07	0.714	350610
Itararé	1	21529	715153.07	0.703	48504
Itatiba	1	75518	5147533.3	0.778	111835

Itatinga	1	7821	246969.01	0.706	19528
Itu	2	114206	7551445.39	0.773	163775
Jaboticabal	2	53259	2324571.9	0.778	73315
Jacareí	3	124024	9414192.52	0.777	221650
Jaguariúna	1	36707	6821447.2	0.784	51248
Jales	2	41411	1094150.25	0.776	47187
Jandira	3	50943	2941506.43	0.76	117518
Jaú	3	96824	4002111.12	0.778	141344
José Bonifácio	1	25451	1004708.58	0.777	34726
Jundiaí	2	302775	36339234.53	0.822	394185
Junqueirópolis	1	11345	457178.43	0.745	19534
Leme	1	64339	2505532.43	0.744	97403
Lençóis Paulista	1	42321	2117395.49	0.764	64470
Limeira	3	199644	11261334.12	0.775	288741
Louveira	1	26142	9244650.6	0.777	44269
Lucélia	1	11280	370914.97	0.752	20596
Macatuba	1	9505	336415.09	0.77	16672
Mairiporã	1	48572	1500945.27	0.788	91745
Manduri	1	5601	134982.17	0.739	9328
Marília	4	152482	7041950.5	0.798	226005
Martinópolis	1	12339	433800.33	0.721	25102
Matão	1	61256	3266004.1	0.773	78890
Mauá	2	202327	11329503.4	0.766	443910
Mirandópolis	1	16453	618028.84	0.751	28232
Mirante do Paranapanema	1	7597	356100.71	0.724	17498
Mogi das Cruzes	2	218535	13367335.34	0.783	415107
Mogi Guaçu	3	103637	5048998.67	0.774	144106
Moji Mirim	3	67004	4017408.09	0.784	89042
Monte Alto	1	37447	1520054.59	0.768	47811
Monte Aprazível	2	15160	602662.52	0.785	22909
Monte Castelo	1	2024	71804.9	0.741	4011
Monte Mor	1	25827	2950248.14	0.733	55313
Nova Europa	1	4817	273362.29	0.765	10184
Nova Granada	1	11902	341010.44	0.739	20245
Nova Independência	1	1477	84592.64	0.735	3488
Nova Luzitânia	1	1564	36769.94	0.743	3830
Nova Odessa	1	39673	2480005.07	0.791	55523
Olímpia	1	34831	1587458.39	0.773	51598
Osasco	4	403787	58566199.37	0.776	674552
Oswaldo Cruz	1	21781	832885.35	0.762	31159
Ourinhos	3	69933	2847364.32	0.778	107616
Ouroeste	1	5196	354321.32	0.77	9259
Pacaembu	1	6429	160670	0.725	13122
Palmeira d'Oeste	1	6454	154537.06	0.753	9276
Palmital	1	13508	503483.2	0.746	21446

Panorama	1	8403	254502.4	0.722	14957
Paraguaçu Paulista	1	27127	902878.64	0.762	43447
Paraíso	1	3725	183421.68	0.749	6135
Parapuã	1	5527	257125.45	0.737	10631
Paulínia	1	68678	14655384.11	0.795	96955
Pederneiras	1	28785	1908599.46	0.739	43993
Penápolis	1	46247	1334820.96	0.759	59953
Pereira Barreto	1	15028	577263.09	0.766	25237
Piacatu	1	2712	76512.21	0.732	5656
Piedade	1	30880	1129675.02	0.716	52927
Pindamonhangaba	2	83230	6227819.98	0.773	157459
Piracicaba	4	284544	22040590	0.785	380494
Piraju	1	17900	558719.58	0.758	28568
Pirangi	1	6925	198264.28	0.756	10760
Pirassununga	1	53002	2231866.53	0.801	72356
Pitangueiras	1	18330	722814.64	0.723	37295
Poá	2	48524	3940620.19	0.771	111929
Pompéia	1	12364	1045773.56	0.786	20775
Pontalinda	1	1561	56129.25	0.702	4333
Porto Feliz	1	29843	1429706.2	0.758	50607
Praia Grande	1	125362	5512843.73	0.754	295928
Pratânia	1	2765	87668.62	0.701	4926
Presidente Epitácio	1	25860	961855.11	0.75	41947
Presidente Prudente	4	156862	6878961.74	0.806	216044
Presidente Venceslau	1	25669	664455.83	0.763	37995
Promissão	1	22684	1604252.26	0.743	38094
Regente Feijó	1	10935	583152.12	0.768	19109
Ribeirão dos Índios	1	1095	33277.17	0.721	2156
Ribeirão Pires	2	64514	2606481.25	0.784	116875
Ribeirão Preto	7	498066	28087396.98	0.8	654893
Rinópolis	1	5672	208691.34	0.723	9795
Rio Claro	3	155523	8455119.93	0.803	195490
Rosana	1	8373	1230761.02	0.764	18791
Sales Oliveira	1	6403	285160.36	0.772	11169
Salto	2	67827	5695363.77	0.78	111492
Santa Adélia	1	10077	260049.42	0.76	14683
Santa Bárbara d'Oeste	2	132749	5202728.73	0.781	185487
Santa Clara d'Oeste	1	1118	43632.13	0.733	2044
Santa Cruz do Rio Pardo	1	30501	1571372.51	0.762	45235
Santa Fé do Sul	1	23170	865951.95	0.784	30204
Santa Gertrudes	1	14558	1556583.54	0.737	24376
Santa Isabel	1	25991	1450356.14	0.738	53310
Santa Mercedes	1	1363	48340.67	0.739	2815
Santana de Parnaíba	1	75411	8065196.68	0.814	126747
Santo Anastácio	1	12551	332546.38	0.753	20231

Santo André	4	500585	28119591.06	0.815	687250
Santos	6	271390	20147781.95	0.84	424599
São Bernardo do Campo	4	567178	47551620.3	0.805	795541
São Caetano do Sul	6	139063	16153418.64	0.862	150732
São Carlos	4	167621	9796012.91	0.805	235096
São Joaquim da Barra	1	32842	1395155.78	0.762	48874
São José do Rio Preto	7	361933	15802009.9	0.797	433779
São José dos Campos	3	405042	30927049.98	0.807	680008
São Manuel	1	25020	1004515.38	0.744	39080
São Miguel Arcanjo	1	14719	556844.9	0.71	31745
São Paulo	29	7590181	628064882.1	0.805	11638802
São Pedro	1	22417	578245.98	0.755	33249
São Roque	1	44298	2272457.77	0.768	84281
São Vicente	1	129386	4940871.13	0.768	347733
Sarapuí	1	5284	124870.35	0.707	9675
Sertãozinho	3	82738	4360401.75	0.761	117916
Severínia	1	7522	271198.39	0.715	16492
Sorocaba	7	440444	32662451.57	0.798	630550
Sumaré	4	147333	11969865.56	0.762	267313
Suzano	4	120175	10130267.77	0.765	279626
Tabatinga	1	8960	189697.25	0.704	15423
Taboão da Serra	2	121138	7326979.05	0.769	268325
Tanabi	1	15709	763863.4	0.748	24750
Taquaritinga	2	35908	1308795.61	0.748	54262
Taquarituba	1	13096	425595.16	0.701	22865
Tatuí	2	76307	3417705.5	0.752	115049
Taubaté	2	199951	15436985.01	0.8	296449
Teodoro Sampaio	1	10515	497214.58	0.741	22026
Tietê	1	25522	1640139.15	0.778	39431
Torrinha	1	6632	167115.67	0.744	9558
Três Fronteiras	1	3397	85488.96	0.753	5503
Tupã	1	50021	1554497.18	0.771	63057
Tupi Paulista	1	9094	248336.64	0.769	14783
União Paulista	1	1013	36025.71	0.749	1686
Urânia	1	6119	155532.06	0.746	8710
Urupês	1	8855	276296.16	0.745	12997
Valinhos	2	90860	5338649.51	0.819	118947
Valparaíso	1	10702	693267.97	0.725	23438
Vargem Grande Paulista	1	26644	1532990.65	0.77	48905
Várzea Paulista	1	60817	2344124.38	0.759	115562
Vinhedo	1	59144	7306489.55	0.817	72287
Viradouro	1	10539	253586.88	0.739	17952
Votorantim	2	62592	4708770.05	0.767	115495
Votuporanga	1	78179	2462572.96	0.79	89124

Para distribuir da quantidade de pneus descartados nos ecopontos em quantidades bimensais foi utilizada uma porcentagem de variação estimado com base na informação de venda de pneus mostrada no Livro Branco da Indústria de Pneus ANIP (2015).

Tabela 45. Anexos: Porcentagens da venda de pneus no Brasil no ano 2015.

Porcentagem para a distribuição do descarte de pneus em meses					
Janeiro Fevereiro	Março Abril	Maió Junho	Julho Agosto	Setembro Outubro	Novembro Dezembro
16.30%	16.36%	16.48%	15.74%	17.18%	17.93%