



LICENCIATURA EM MATEMÁTICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

UM ESTUDO SOBRE LOGÍSTICA REVERSA NA COLETA DE
PNEUS DO ESTADO DE SÃO PAULO

GIOVANNA VERRONE

Sorocaba

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCar
LICENCIATURA EM MATEMÁTICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

UM ESTUDO SOBRE LOGÍSTICA REVERSA NA COLETA DE
PNEUS DO ESTADO DE SÃO PAULO

GIOVANNA VERRONE

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a conclusão do
Curso Licenciatura em Matemática, sob a
Orientação da Prof^a. Dr^a. Deisemara Ferreira



Folha de aprovação

GIOVANNA VERRONE

" UM ESTUDO SOBRE LOGÍSTICA REVERSA NA COLETA DE
PNEUS DO ESTADO DE SÃO PAULO"

Trabalho de Conclusão de Curso

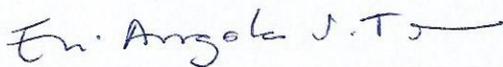
Universidade Federal de São Carlos – *Campus Sorocaba*

Aprovado em 10/09/2019

Orientadora


Prof.ª Dr.ª Deisemara Ferreira

Membro


Prof.ª Dr.ª Eli Ângela Vitor Toso

Membro


Prof. Dr. Renato Fernandes Cantão

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me sustentado até aqui, sem Sua graça eu nada seria.

Gostaria de agradecer meus pais, Jane e Marcelo, por toda a paciência e dedicação no decorrer dos anos, por sempre estarem dispostos a me ouvir e sempre me incentivarem. Agradeço meus irmãos, Samuel e Gabriel, que são meus companheiros desde a infância, o que não poderia ter sido diferente durante a graduação.

Agradeço a professora e orientadora tanto da iniciação científica quanto do TCC, Deisemara, por toda a paciência e auxílio durante esses anos de graduação.

Agradeço ao Jorge por ter cedido dados de sua pesquisa, assim como por sempre ter estado disposto a tirar minhas dúvidas.

Agradeço a todos os meus amigos que de forma direta e indireta me auxiliaram a terminar mais essa etapa. Aos amigos de longa data por sempre terem estado ao meu lado. Aos amigos que fiz durante os anos de faculdade, todos que passaram horas estudando na biblioteca, trocando mensagens para assim estudarmos para as muitas provas e também aliviando todo o stress que passamos nesse tempo.

Leandro, obrigada pelos anos de companheirismo na faculdade e na vida.

Agradeço a todos os professores que tive durante a graduação, vocês foram essenciais na minha formação acadêmica e profissional.

Muito obrigada a todos vocês!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo	11
2	CONTEXTUALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .	12
2.1	Descarte de pneus inservíveis no Brasil	12
2.2	Leis e normas de destinação de pneus inservíveis no Brasil . . .	14
2.3	Logística Reversa	15
3	MODELO MATEMÁTICO - MMPRLR-MI	18
3.1	Modelo Multiperíodo para Planejamento de Redes de Logística Reversa com Multi-itens (MMPRLR-MI)	18
4	ESTUDO COMPUTACIONAL	25
4.1	Parâmetros comuns ao MMPRLR e MMPRLR-MI	25
4.1.1	Parâmetros do modelo MMPRLR-MI	28
4.1.2	Solução das instâncias Δ MD1 à Δ MD10	33
4.2	Instâncias ilustrativas	39
4.2.1	Descrição das instâncias ilustrativas	39
4.2.2	Resultados instâncias ilustrativas	41
5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	47
	ANEXO A – MODELO MULTIPERÍODO PARA PLANEJA- MENTO DE REDES DE LOGÍSTICA REVERSA (MMPRLR)	49
	ANEXO B – DADOS REAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO	55
	APÊNDICE A – INSTÂNCIA ILUSTRATIVA	74

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fases da modelagem matemática.	10
Figura 2 – Rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.	16
Figura 3 – Agrupamentos de veículos.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de pneus em cada destinação e total de pneus coletados em 2017.	14
Tabela 2 – Custo de transporte de carga por tonelada	26
Tabela 3 – Capacidade dos centros intermediários	27
Tabela 4 – Custos de abertura dos centros intermediários	27
Tabela 5 – Meta de descarte de pneus entre 2009 e 2015	28
Tabela 6 – Porcentagem de pneus de cada categoria.	30
Tabela 7 – Valor de venda de pneus servíveis no mercado de segunda mão.	30
Tabela 8 – Porcentagem de aço para cada tipo de pneu.	31
Tabela 9 – Descrição do grupo de instâncias em relação a pneus descartados e metas.	32
Tabela 10 – Comparação entre os custos totais da rede do modelo MMPRLR e MMPRLR-MI da instância $\Delta MD5$	34
Tabela 11 – Comparação entre decisões táticas da instância $\Delta MD5$	35
Tabela 12 – Quantidade de pneus triturados de cada categoria.	35
Tabela 13 – Comparação das instâncias $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$ de MMPRLR e MMPRLR- MI.	37
Tabela 14 – Custos e rendas das instâncias $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$ de MMPRLR e MMPRLR-MI.	38
Tabela 15 – Total de pneus descartada nos ecopontos para cada período de tempo.	40
Tabela 16 – Descrição do grupo de instâncias em relação a pneus descartados e metas.	41
Tabela 17 – Decisões estratégicas da 1ª instância ilustrativa.	42
Tabela 18 – Detalhamento de custos e rendas da 1ª instância ilustrativa	43
Tabela 19 – Comparação dos resultados da 2ª instância ilustrativa.	44
Tabela 20 – Comparação dos resultados da 3ª instância ilustrativa	44

Tabela 21 – Capacidade dos centros intermediários	55
Tabela 22 – Capacidade de transporte de pneus inteiros e triturados.	55
Tabela 23 – Custos de abertura dos centros intermediários.	56
Tabela 24 – Custos de operação nos centros intermediários.	56
Tabela 25 – Custo de transporte de carga por tonelada.	56
Tabela 26 – Custo de destinação de pneus.	57
Tabela 27 – Valor de venda de aço e dos pneus servíveis.	57
Tabela 28 – Porcentagem aço de cada tipo de pneu.	57
Tabela 29 – Metas de destinação de pneus.	58
Tabela 30 – Localização dos ecopontos.	58
Tabela 31 – Locais candidatos a instalação de centros intermediários.	67
Tabela 32 – Localização das empresas de destinação final.	68
Tabela 33 – Quantidade (ton.)de pneus descartados consideradas.	69
Tabela 34 – Fator de variação para a distribuição dos pneus nos ecopontos.	69
Tabela 35 – Localização dos 20 ecopontos.	74
Tabela 36 – Candidatos a instalação de centros intermediários.	74
Tabela 37 – Localização das empresas de destinação final.	75
Tabela 38 – Capacidade dos centros intermediários.	75
Tabela 39 – Custos de abertura dos centros intermediários pequenos e grandes.	75
Tabela 40 – Custo de destinação de pneus nas empresas de processamento.	75

RESUMO

Pneus não são biodegradáveis e possuem baixa compressibilidade, portanto seu descarte não é um processo simples. No Brasil, os produtores e importadores de pneus são os responsáveis pelo descarte ambientalmente correto do material e eles utilizam a estratégia de Logística Reversa, que operacionaliza o retorno dos produtos descartados ao ambiente de negócios ou produtivos. A rede de logística utilizada atualmente no Brasil não considera vários pontos importantes para a otimização do processo, tais como a capacidade de estoque nos locais de descarte de pneus (ecopontos), nos locais de triagem e trituração (centros intermediários) e em empresas de destinação final, onde ocorrem os processos de reuso em diferentes áreas do processo produtivo. Há trabalhos na literatura que propõem modelos matemáticos que procuram planejar e auxiliar na tomada de decisões da rede de logística reversa de pneus inservíveis. Um destes trabalhos propõe um modelo para a rede do estado de São Paulo (Brasil), que não considera os diferentes tipos de pneus descartados (de carro, caminhão, moto e caminhonete). Pneus de moto tem restrição específica na rede, não podendo ser remoldados e revendidos como pneus servíveis, logo isso também é considerado. Sendo assim, no presente trabalho foi feita uma extensão deste modelo da literatura, diferenciando os pneus descartados, a fim de se descobrir se há uma diferença significativa nas decisões de planejamento.

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

ABSTRACT

Tires aren't biodegradable and they have low compressibility, therefore their disposal isn't a simple process. In Brazil, the responsible for disposing tires in an environmentally friendly way are the producers and importers of the product. To do so they use the Reverse Logistics strategy, which operationalizes the reuse of waste products in the business or productive environment. There are some issues with the current tire reverse logistics network in Brazil, since it doesn't account for some important optimization topics of the process, such as the storage capacity in "ecopontos" (where tires are disposed), intermediate centers (where the tires are selected and separated) and in processing plants (where tires are reused in different productive processes). There are papers in the subject that suggest mathematical models which intend to plan and help in the decision making of the waste tires reverse logistics network. This research is based on one of those papers, in which a model for the São Paulo (Brazil) network is proposed. This model doesn't consider the different kinds of disposed waste tires (car tires, truck tires, motorcycle tires and pickup truck tires). Motorcycle tires have specific rules on the network, they can't be reshaped and sold on the secondary market, so this is also taken into consideration. Therefore a new model considering the different tires is proposed in this paper in order to find out if there is a significant difference in the decision planning of the problem or not.

Key words: Reverse logistic; Waste Tires; Mixed integer linear programming; Tire Recycling; Network Planning.

1 INTRODUÇÃO

Desde a Primeira Revolução Industrial, que mudou todo o processo de manufatura existente na época, o homem teve de aprender a lidar com o descarte de materiais excedentes do próprio processo de produção e com materiais que não mais seriam utilizados. Certamente no início do século XVIII, havia uma parcela bem pequena de lixo se comparado com o montante dos dias atuais, visto a escala de produção da época. (PELLEGRINI; DIAS; GRINBERG, 2010)

Com o imenso avanço dos métodos de produção e a velocidade com que tudo é feito, consumido e descartado, cientistas passaram a estudar o quão prejudicial para o meio ambiente e, conseqüentemente para a saúde humana, é o descarte inadequado de produtos manufaturados em rios, lagos e aterros sanitários. (MUCELIN; BELLINI, 2008) (RIBEIRO; LIMA, 2000) Lidar com todo o excedente de produtos que chegam ao fim da sua vida útil não é fácil por vários motivos. Muitas empresas não se importam com o fim dado aos produtos manufaturados por eles, então não tomam nenhuma posição para tratar do problema; o consumismo desenfreado faz com que existam toneladas de produtos descartados diariamente e a rede atual de coleta e descarte ainda não está preparada para isso. (JÚNIOR; AMARAL, 2006) Há também a questão de logística e de tomada de decisões, tais como "onde descartar?", "o que fazer com esse lixo?" e "como nos livrarmos disso de uma maneira ecológica e não prejudicial ao meio ambiente?"

O primeiro motivo citado acima tem sido corrigido através de políticas nacionais e internacionais, com a criação de leis e tratados que, caso não sejam cumpridos, geram multas de valores exorbitantes. Apesar disso não ser a solução, é um grande passo para a responsabilização de cada empresa, assim órgãos públicos não são os únicos responsáveis pelo problema. A questão da logística e tomada de decisões vêm sendo trabalhadas na literatura científica com modelagem matemática, ferramenta essencial para se estudar, entender, descrever e representar o problema que se quer resolver.

O processo de modelagem matemática busca representar situações reais, sejam elas fenômenos, processos ou sistemas dos mais diversos, tais como físicos, químicos, biológicos, econômicos, entre outros. Normalmente, é necessário que haja simplificações no

momento de se formular um modelo matemático, mas isso deve ser feito de maneira que a essência do fenômeno seja captada, sem simplificar a ponto de perder suas principais características, mas ao mesmo tempo, ele tem de ser tratável por métodos de resolução existentes. (ARENALES et al., 2007)

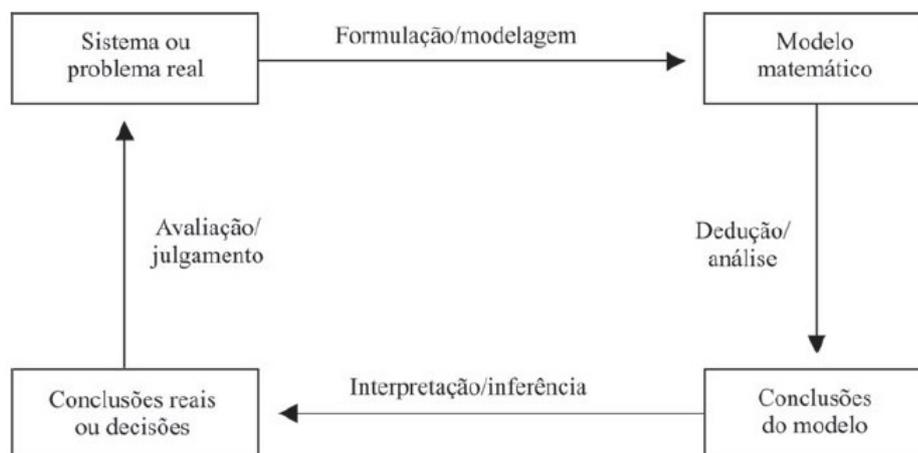
No momento da modelagem matemática, variáveis (incógnitas) são definidas e sentenças matemáticas escritas, as quais relacionam as incógnitas umas com as outras e com os parâmetros/dados do problema a fim de se descrever o comportamento do sistema ou da situação problema. O passo seguinte é o de se resolver o modelo matemático, ou seja, buscam-se valores para as incógnitas, produzindo assim soluções, que são dependentes dos dados do problema em questão. Com isso feito, é necessário validar o modelo obtido, isto é, ver se os resultados obtidos são condizentes com a realidade. É possível fazer isso modificando os dados de entrada do problema (alterando os custos e demandas, por exemplo), assim faz-se uma comparação entre as diferentes soluções, para observar se os resultados obtidos são condizentes com a realidade. (ARENALES et al., 2007)

A consistência de uma teoria ou sua própria validação tem sido dependente, muitas vezes, da linguagem matemática que a envolve. (...) Quando se propõe analisar um fato ou uma situação real cientificamente, isto é, com o propósito de substituir a visão ingênua desta realidade por uma postura crítica e mais abrangente, deve-se procurar uma linguagem adequada que facilite e racionalize o pensamento. (BASSANEZI, 2002)

Para se utilizar um modelo matemático na resolução de um problema ou situação, no entanto, é necessário muito estudo e seguir um certo “algoritmo” para a modelagem destes, o que na maioria das vezes não é tarefa simples, visto as inúmeras variáveis existentes e a dificuldade em reconhecer as limitações, restrições e exigências de um dado sistema. A Figura 1 contém as fases que devem ser desenvolvidas, desde a interpretação do problema até a avaliação de seus resultados.

A primeira fase é a definição do problema, a qual precede toda e qualquer modelagem matemática e sua respectiva solução. O foco da próxima etapa é o de se traduzir a situação em relações matemáticas, lógicas ou também, a combinação de ambas. A solução do modelo busca resolvê-lo apresentado através de métodos de resolução e algoritmos. Na validação se verifica se o modelo proposto é de fato adequado para se representar o problema de maneira

Figura 1 – Fases da modelagem matemática.



Fonte: (ARENALES et al., 2007)

apropriada, ou seja, se ele de fato traduz o comportamento do sistema. A última etapa da modelagem matemática é a de implementação onde os resultados obtidos são traduzidos em decisões. É necessário ter em mente que o esquema acima é uma representação simples da modelagem de um problema. Muitas vezes é possível se traduzir uma situação real usando somente essas etapas, mas dependendo do grau de complexidade de um determinado sistema, novas fases podem existir entre as listadas acima. Analisar os dados obtidos é necessário para se identificar inconsistências no modelo e assim repará-las. (ARENALES et al., 2007)

Conforme mencionado acima, a produção industrial cada vez mais veloz, produz cada vez mais resíduos, que se não tiver um descarte adequado, traz enormes prejuízos ambientais e para a saúde humana. Assim, a motivação para a realização desse trabalho foi a de poder aliar a modelagem matemática com a logística reversa para auxiliar na tomada de decisões para o descarte de pneus inservíveis do estado de São Paulo.

Pneus inservíveis são pneus cuja vida útil acabou, ou seja, não podem mais ser reformados e reutilizados, devido aos danos irreparáveis em sua estrutura. É necessário se dar um descarte adequado a este tipo de material, pois seu descarte inadequado prejudica o meio ambiente e causa problemas de saúde pública. O descarte inadequado desses pneus é um grande problema enfrentado em todos os lugares. Se queimado, gera enormes quantidades de material particulado e gases tóxicos, contaminando o meio ambiente com carbono, enxofre e outros poluentes. Se for descartado em aterros sanitários, por

ter baixa compressibilidade, os lotam muito rapidamente tornando-os inutilizáveis. Caso sejam deixados em ambientes abertos e sujeitos a chuvas, viram criadouros de mosquitos transmissores de doenças, tais como dengue e febra amarela. Por esses e outros motivos, é extremamente necessário dar um descarte adequado para pneus. (NOHARA et al., 2006)

A modelagem matemática desse problema tem como objetivos: definir quantas viagens serão feitas entre os pontos de coleta e os centros intermediários ou as empresas de destinação final, assim como a quantidade de pneus transportada (inteiros ou triturados); definir a quantidade de pneus que será revendida no mercado de segunda mão e a quantidade que será reutilizada em outros processos de produção, assim como a quantidade destinada a cada tipo diferente de reutilização.

1.1 OBJETIVO

Segundo as leis que regulam a reutilização de pneus, alguns deles podem apresentar restrições quanto à destinação. Esse é o caso dos pneus de motos que não podem ser remoldados e conseqüentemente não podem ser vendidos no mercado secundário. Sendo assim, pretende-se estudar um modelo da literatura para considerar os vários tipos de pneus e suas respectivas restrições. Além disso, a partir de um modelo de programação linear inteira mista proposto para estudar o problema de configuração de rede de logística reversa de pneus inservíveis no estado de São Paulo, fez-se o questionamento se o tipo de pneu coletado (carros, caminhões, motos, caminhonetes) teria algum impacto na tomada de decisões do problema, entre elas definição da localização e dimensionamento de centros intermediários de triagem e trituração de pneus e também a quantidade de pneus a serem classificados, ou seja, se é melhor triturá-los, estocá-los, comercializá-los no mercado de segunda mão ou enviá-los para as empresas de destinação final. Outro aspecto importante que se deseja verificar é se a renda total do sistema é alterada ao se fazer a distinção entre os diferentes tipos de pneus. Assim, este trabalho tem por objetivo analisar as diferenças obtidas através da resolução do modelo matemático quando a classificação dos pneus não é levada ou não em conta.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Existem alguns fatores que têm mudado o modo com que as indústrias fabricam seus produtos. Além da mudança do perfil dos consumidores (que buscam saber não somente da procedência do produto em questão, mas também, quais são as medidas tomadas pela empresa para descartar o item após seu consumo), há anos pesquisas que ligam o descarte inadequado de produtos manufaturados a prejuízos ambientais têm sido realizadas, o que ocasionou a criação de leis que responsabilizam as próprias empresas a darem um destino ambientalmente correto a seus produtos após sua vida útil. Com isso, indústrias dos mais diversos ramos passaram a se preocupar com o destino do seu produto após seu consumo. A logística reversa é trata não somente de como descartar o produto de forma ambientalmente correta, mas busca retornar este ao ambiente de negócios ou produtivo. A seguir, encontra-se um breve histórico de pneus inservíveis no Brasil, citações a respeito da criação de órgãos reguladores e de leis de destinação do material e também do uso da Logística Reversa como ferramenta para se cumprir todas as metas estabelecidas.

2.1 DESCARTE DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL

Produtos manufaturados utilizados em nosso cotidiano, na maioria das vezes, sofrem modificações constantes, desde sua invenção, o seu processo de produção, quando novas alternativas para matéria prima são encontradas, até de modificações que são feitas para um melhor desempenho dos mesmos. O mesmo processo ocorreu com os pneus. Desde a sua criação, durante o século XIX, ele foi alterado e melhorado até atingir os níveis de estabilidade e segurança vistos atualmente.

Apesar dos pneus terem sido criados na metade do século XIX, no Brasil sua produção só se iniciou na década de 1930, com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha (Pneus Brasil) no Rio de Janeiro. Nas décadas seguintes, mais e mais empresas se instalaram no país, sendo necessária a fundação de algum órgão para manejar a crescente indústria de pneus no país. Logo, em 1960 foi criada a ANIP, Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Desde sua criação a ANIP defende os interesses do setor, sendo de suma importância na identificação e denúncia de empresas importadoras

que não cumprem as regras de logística reversa aplicadas na coleta e destinação de pneus inservíveis, conforme o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. (ANIP, 2011)

Em 2007, a ANIP criou o Reciclanip, entidade sem fins lucrativos que é a gerenciadora do processo de logística reversa para a indústria nacional. (ANIP, 2018)

Os pontos de coleta de pneus inservíveis são chamados de Ecopontos, locais de iniciativa público-privada, que tem por intuito receber e armazenar provisoriamente os pneus. Após a coleta dos pneus, existem duas opções: levá-los aos Centros-Intermediários ou a empresas de destinação final. Se forem levados aos Centros-Intermediários uma triagem é feita, a fim de se decidir se há possibilidade de revender os pneus servíveis no mercado de segunda mão, ou se é melhor transportá-los (inteiros ou triturados) para as empresas de destinação final. Se os pneus forem transportados diretamente para as empresas destinadoras, existem as seguintes opções de fim dos pneus inservíveis:

- **Coprocessamento:** Utilização dos pneus como fonte de combustível e como fonte de elementos metálicos em indústrias que requerem grande quantia de calor para fabricar seus produtos.
- **Laminação:** Fabricação de artefatos de borracha (solas de sapatos, borracha de vedação, pisos para quadras poliesportivas, etc.)
- **Granulação:** Processo de trituração da borracha, com separação e aproveitamento do aço.
- **Pirólise:** Obtenção de produtos com alto poder energético.

Todos os métodos descritos acima são licenciados e homologados pelo IBAMA e são considerados destinações ambientalmente corretas dos pneus cuja vida útil acabou. Além disso, todas essas decisões são tomadas de maneira que as metas exigidas nas leis e normas sejam cumpridas. A Tabela 1 apresenta o total de pneus destinados para cumprimento da meta de destinação nacional, em toneladas e por tecnologia, para o período de janeiro a dezembro de 2017. (IBAMA, 2016)

Tabela 1 – Quantidade de pneus em cada destinação e total de pneus coletados em 2017.

Tecnologia	Destinação (ton.)	Percentual/País
Coprocessamento	274.815,07	46,96%
Granulação	215.604,04	36,84%
Laminação	81.625,74	13,95%
Pirólise	13.208,46	2,26%
Total	585.252,32	100,00%

Fonte: (IBAMA, 2016).

2.2 LEIS E NORMAS DE DESTINAÇÃO DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL

O Brasil já possui empresas produtoras de pneumáticos há muitas décadas, mas só nos anos finais do século XX é que leis foram criadas para que o descarte desse tipo de material fosse gerenciado de maneira correta. Entre 1996 e 1998, o Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA, criou resoluções sobre a importação de pneus reformados, que passou a ser proibida e frisou que os pneus deveriam ser preferencialmente reutilizados, reformados e reciclados antes de sua destinação final adequada.

A partir de 2008, empresas que importam pneus usados ou reformados são multadas, uma vez que a legislação define que seja realizado o processo de reforma ou dado o devido fim aos pneus produzidos no país ou aos pneumáticos novos que foram importados e utilizados no Brasil. Na Resolução Conama nº 416/09 criada no ano de 2009, é dito que é responsabilidade dos fabricantes de pneus e importadores dar o devido fim a pneus com peso unitário acima de 2 kg. O processo de coleta dos pneus inservíveis do país é feito em uma parceria entre os fabricantes, distribuidores e também com o Poder Público. (BRASIL, 2009)

Segundo o artigo de número três desta nova resolução, a cada novo pneu comercializado no mercado de reposição, é necessário dar um fim adequado a um pneu inservível. O mercado de reposição de pneus é obtido a partir da seguinte fórmula.

Seja,

MR = Mercado de reposição de pneus;

P = total de pneus produzidos;

I = total de pneus importados.

E = total de pneus exportados;

EO = total de pneus que equipam veículos novos;

Tem-se,

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

Para que se tenha o controle da quantia de pneus inservíveis descartados de forma correta e assim garantir o cumprimento dessa resolução, é de responsabilidade das empresas produtoras e importadoras declarem essa quantia ao IBAMA, que disponibiliza relatório anual com todos os números, estatísticas e características do descarte de pneus inservíveis de cada ano.

2.3 LOGÍSTICA REVERSA

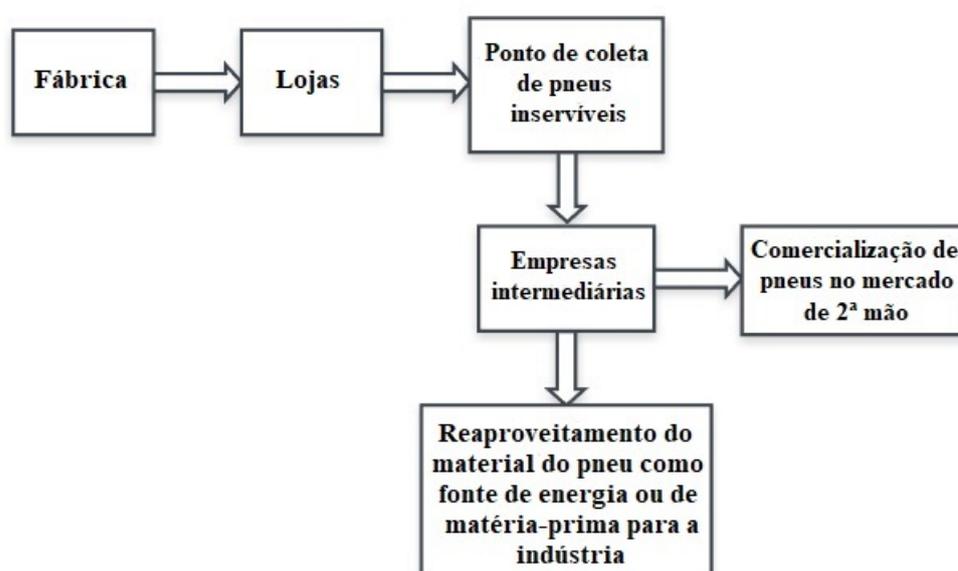
A logística reversa entra como aliada fundamental das empresas das mais diversas áreas, pois ela é uma excelente ferramenta para tomar as decisões cabíveis da maneira mais ecológica e menos nociva ao meio ambiente possível, além claro, de ter um valor de marketing positivo, já que os consumidores exigem produtos com processos cada vez mais "limpos". (GUARNIERI, 2011)

Muito além de simplesmente dar o fim ambientalmente adequado a estes resíduos, esse tipo de logística foca em reutilizar esse material de alguma forma, seja reciclando-o, fazendo com que se torne algum outro tipo de produto ou também, em alguns casos, reformando-os para serem vendidos no mercado de segunda mão. Esse é um dos motivos que torna a logística reversa atrativa para as empresas, pois além do marketing já mencionado, ela pode gerar algum retorno econômico.

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

Muitas empresas utilizam a logística já que existem leis e decretos que responsabilizam os fabricantes para dar o devido destino aos resíduos pós-consumo. Alguns países já possuem uma regulamentação acerca do assunto há muitos anos, outros países como o Brasil passaram a se preocupar com isso mais recentemente. A Lei nº 12.305/10 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que auxilia na resolução dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos gerados a partir do indevido fim dos resíduos sólidos. (MMA, 2011)

Figura 2 – Rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil.



Fonte: Adaptado de (RECICLANIP, 2018)

A PNRS prevê uma redução na geração de resíduos com uma proposta de consumo sustentável e instrumentos que aumentem a reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, além da destinação ambientalmente correta daquilo que não se pode reciclar ou reutilizar. A responsabilidade do fim adequado dos resíduos é compartilhada entre os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e o próprio cidadão. A Logística Reversa é um dos instrumentos citados nessa lei. (MMA, 2011)

Como existe uma imensa frota de carros no Estado de São Paulo é mandatório se pensar no destino de milhares de pneus inservíveis descartados anualmente, a fim de que eles não sejam queimados, despejados em aterros sanitários, nem que sejam deixados a céu aberto ou em rios/córregos, para que não ocasionem a prorrogação de transmissores de

doenças como dengue, febre amarela ou leptospirose. A tomada de decisões desse problema não é simples, devido as diversas variáveis e restrições que devem ser consideradas, tais como a capacidade máxima dos veículos de transporte, capacidade de recebimento nos ecopontos e capacidade de triagem nos centros intermediários. Tendo isso em mente, escolheu-se fazer uma extensão do modelo proposto por Menezes, 2017, levando em consideração os pneus de diferentes tipos de automóveis (carros, caminhões, motos, caminhonetes).

O problema a ser tratado é então: decidir o que fazer com os pneus descartados nos ecopontos, se eles devem ficar em estoque, se devem ser enviados aos centros intermediários ou as empresas de destinação final, se devem ser transportados inteiros ou triturados, se devem ser remoldados e vendidos ou se devem ser reutilizados em diferentes processos de produção tais como o de coprocessamento, laminação, granulação ou pirólise.

3 MODELO MATEMÁTICO - MMPRLR-MI

Conforme explicado no capítulo 2, o problema estudado no presente texto consiste em tomar diferentes decisões táticas tais como decidir o meio que os pneus inservíveis serão transportados (inteiros ou triturados), definir a quantia de pneus a ser enviada para os centros intermediários ou às empresas de destinação final, decidir qual atividade econômica e ambientalmente correta é a melhor para se reutilizar os pneus. Modelos matemáticos são utilizados para auxiliar na tomada de inúmeras decisões envolvidas no problema. A seguir está descrito o Modelo Multiperíodo para Planejamento de Redes de Logística Reversa Multi-item (MMPRLR-MI) proposto por Meneses (2017), que considera diferentes tipos de pneus inservíveis.

3.1 MODELO MULTIPERÍODO PARA PLANEJAMENTO DE REDES DE LOGÍSTICA REVERSA COM MULTI-ITENS (MMPRLR-MI)

O modelo proposto por Meneses (2017) não leva em consideração os diferentes tipos de pneus inservíveis descartados (de carro, moto, caminhão, etc.). O objetivo desse trabalho é então avaliar se há alteração nos resultados se os diferentes tipos de pneus fossem considerados. Do ponto de vista da modelagem, adicionou-se mais um índice às variáveis, parâmetros e restrições do modelo MMPRLR ($m \in M$ - tipos de pneus). A seguir, o modelo MMPRLR-MI será descrito.

Conjuntos

P : Ecopontos;

C : Centros intermediários;

D : Empresas de destinação final;

L : Tamanho dos centros intermediários;

T : Períodos de tempo;

B : Tipos de veículos;

M : Tipos de pneus;

Índice

i, j : Nós da rede;

l : Tamanho das instalações, com $l \in L$;

t : Períodos de tempo, com $t \in T$;

b : Tipo de veículos de transporte, com $b \in B$;

m : Tipo de pneu coletado, com $m \in M$;

Parâmetros

g_{mit} Quantidade de pneus do tipo m descartados no ecoponto i no período t ;

d_j Capacidade de processamento no centro de destinação final j (ton.);

U_{mb} Capacidade de transporte de pneus inteiros do tipo m no veículo tipo b (ton.);

U'_b Capacidade de transporte de pneus triturados no veículo tipo b (ton.);

qr_l Capacidade de triagem de pneus em um centro intermediário de tamanho l (ton.);

qp_l Capacidade de trituração de um centro intermediário de tamanho l (ton.);

qe_l Capacidade de estoque de um centro intermediário de tamanho l (ton.);

vp_m Volume de pneus inteiros;

vp' Volume de pneus triturados;

α_m Fração média de aço do pneu do tipo m separado no processo de trituração;

σ Fração média de pneus servíveis no total coletado;

ci_l Custo de instalação de um centro intermediário de tamanho l ;

cs_m Custo de triagem por tonelada de pneus do tipo m nos centros intermediários;

cp_m Custo trituração por tonelada de pneus do tipo m nos centros intermediários;

ce_m Custo de estoque de pneus inteiros nos centros intermediários (ton.);

ce' Custo de estoque de pneus triturados nos centros intermediários;

cv_{mijb} Custo de transportar pneus inteiros do tipo m de i até j utilizando o veículo tipo b (ton.);

cv'_{ijb} Custo de transportar pneus triturados de i até j utilizando veículo tipo b ;

rs_m Preço de venda de 1 tonelada de pneus do tipo m servíveis no mercado de segunda mão;

ra Preço de venda de 1 tonelada de aço obtido após trituração;

rp_{mj} Preço de venda de pneu inteiro do tipo m para a empresa de destino final j ;

rp'_j Preço de venda de pneu triturado para a empresa de destino final j ;

β Penalização unitária por não cumprimento da meta;

M Meta para a quantidade de pneus a serem coletados (ton.);

Variáveis de decisão

X_{mijt} Quantia de pneus inteiros do tipo m transportados no arco (i, j) no período t ;

X'_{ijt} Quantia de pneus triturados transportados no arco (i, j) no período t ;

I_{mjt} Quantia de pneus inteiros do tipo m em estoque no nó $j \in C$, ao final do período t ;

I'_{jt} Quantia de pneus triturados em estoque no nó $j \in C$, ao final do período t ;

Y_{mjt} Quantia de pneus do tipo m a serem triturados no nó $j \in C$ no período t ;

S_{mjt} Quantia de pneus servíveis do tipo m a comercializar no nó j no período t ;

G Quantia de pneus faltantes para atingir a meta de coleta estabelecida (ton.);

Z_{jl} Indica se um centro intermediário com capacidade l é instalado no nó j ($Z_{jl}=1$) ou não ($Z_{jl}=0$);

F_{mbijt} Número de viagens feitas com um veículo de tamanho b para o transporte de pneus inteiros do tipo m 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 (F.O) do problema busca minimizar os custos totais do processo e a renda obtida no processo de rede reversa.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in [CUD], i \neq j} \sum_{b \in B} \sum_{m \in M} (cv_{mbij} F_{mbijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{b \in B} (cv'_{bij} F'_{bijt}) \right\} + \sum_{j \in C} \sum_{l \in L} c_{jl} Z_{jl} \\ + \sum_{t \in T} \left[\sum_{m \in M} \sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs_m X_{mijt} + \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} (cp_m Y_{mjt} + ce_m I_{mjt} + ce' I'_{jt}) \right] + \beta G \\ - \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{m \in M} rs_m S_{mjt} + r\sigma \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} \alpha_m Y_{mjt} + \sum_{m \in M} \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in D} rp_{mj} X_{mijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \end{aligned}$$

Essa função pode ser dividida em 5 termos, que serão descritos a seguir.

O primeiro termo trata sobre os custos de transporte totais:

$$\sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in [CUD], i \neq j} \sum_{b \in B} \sum_{m \in M} (cv_{mbij} F_{mbijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{b \in B} (cv'_{bij} F'_{bijt}) \right\} \quad (3.1)$$

O segundo diz respeito aos custos de instalação dos centros intermediários:

$$\sum_{j \in C} \sum_{l \in L} c_{jl} Z_{jl} \quad (3.2)$$

A terceira divisão, mostra os custos de triagem, trituração e estoques incorridos nos centros intermediários:

$$\sum_{t \in T} \left[\sum_{m \in M} \sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs_m X_{mijt} + \sum_{j \in C} (cp_m Y_{mjt} + ce_m I_{mjt} + ce' I'_{jt}) \right] \quad (3.3)$$

O quarto termo é a penalização pelo não cumprimento da meta estabelecida:

$$\beta G \quad (3.4)$$

Já o último termo trata da renda total obtida pela venda de pneus de cada tipo no mercado de segunda mão, aço e subprodutos.

$$- \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{m \in M} rs_m S_{mjt} + ra \sum_{j \in C} \sum_{m \in M} \alpha_m Y_{mjt} + \sum_{m \in M} \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in D} rp_{mj} X_{mijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \quad (3.5)$$

Abaixo estão as restrições do problema. Tendo em vista os transportes dos diferentes tipos de pneus entre os Ecopontos e Centros Intermediários, é necessário garantir o balanço do fluxo entre esses nós. A restrição (3.6) é a que garante o balanço de fluxo nos ecopontos

(P), ou seja, a quantia de pneus de cada tipo descartada no ecoponto i no período t (g_{mit}) somada a quantia de pneus de cada tipo em estoque do período anterior ($t - 1$) no ecoponto ($I_{m,i,t-1}$) tem de ser igual a quantidade de pneus transportados para os centros intermediários e para as empresas de destinação final ($\sum X_{mijt}$), mais os pneus nos estoques no período atual (I_{mit})

$$\sum_{j \in [CUD]} X_{mijt} + I_{mit} = g_{mit} + I_{m,i,t-1}, \quad i \in P; t \in T; m \in M. \quad (3.6)$$

A restrição (3.7) garante a conservação do fluxo de pneus inteiros de cada tipo nos centros intermediários (C). Em outras palavras, a quantidade de pneus de cada tipo dos ecopontos ($\sum X_{mijt}$) mais o estoque de pneus do período anterior ($I_{m,j,t-1}$) devem ser iguais a quantia de pneus servíveis de cada tipo que serão vendidos no mercado de segunda mão (S_{mjt}), somada ao número de pneus inteiros inservíveis enviados para as empresas de destinação final ($\sum X_{mjit}$), mais a quantidade de pneus inteiros destinados a trituração no período atual (Y_{mjt}), mais os estoques de pneus do período atual (I_{mjt}).

$$\sum_{i \in P} X_{mijt} + I_{m,j,t-1} = S_{mjt} + \sum_{i \in D} X_{mjit} + Y_{mjt} + I_{mjt}, \quad m \in M; j \in C; t \in T. \quad (3.7)$$

A restrição (3.8) assegura a conservação de fluxo dos pneus triturados nos centros intermediários (C), isto é, a quantia de pneus de cada tipo triturados no período atual (Y_{mjt}) mais o estoque de pneus triturados no período anterior ($I'_{j,t-1}$) deve ser igual a fração de aço obtida dos pneus triturados no período atual ($\alpha_m Y_{mjt}$), mais a quantia de pneus triturados enviados para as empresas de destinação final ($\sum X'_{jtit}$), mais a quantia de pneus triturados deixados em estoque no período atual (I'_{jt}).

$$Y_{mjt} + I'_{j,t-1} = \alpha_m Y_{mjt} + \sum_{i \in D} X'_{jtit} + I'_{jt}, \quad m \in M; j \in C; t \in T. \quad (3.8)$$

A restrição (3.9) limita a quantidade de pneus que podem ser considerados para comercialização no mercado de segunda mão, enquanto que a restrição (3.10) limita a quantia de pneus que podem ser recebidos e triturados em cada centro em cada período de tempo. Em relação as restrições (3.11) e (3.12), a primeira limita a quantia de pneus que podem ser triturados nos centros intermediários em cada período de tempo, enquanto que a segunda limita a quantia de pneus inteiros e triturados que podem ser estocados

nos centros intermediários. As três últimas restrições descritas dependem diretamente da variável binária Z_{jl} que determina se um centro intermediário de tamanho l será aberto no nó j ou não.

$$S_{mjt} \leq \sigma \sum_{i \in P} X_{mijt}, \quad j \in C; t \in T; m \in M. \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in P} \sum_{m \in M} X_{mijt} \leq \sum_{l \in L} qr_l Z_{jl}, \quad j \in C; t \in T. \quad (3.10)$$

$$Y_{mjt} \leq \sum_{l \in L} qp_l Z_{jl}, \quad j \in C; t \in T; m \in M. \quad (3.11)$$

$$vp_m I_{mjt} + vp'_m I'_{jt} \leq \sum_{l \in L} qe_{ml} Z_{jl}, \quad j \in C; t \in T; m \in M. \quad (3.12)$$

A condição (3.13) garante que a capacidade das empresas de destinação final seja respeitada, enquanto a (3.14) garante que um único centro intermediário pode ser aberto nos pontos candidatos. O que garante que a quantia de pneus destinados seja no mínimo igual a meta estabelecida é a restrição (3.15). As restrições (3.16) e (3.17) associam a quantia de pneus inteiros e triturados, respectivamente, com a quantidade de veículos usados para tal transporte, levando em conta a capacidade de cada tipo de veículo.

$$\sum_{i \in [P \cup C]} X_{mijt} + \sum_{i \in C} X'_{ijt} \leq d_j, \quad j \in D; t \in T; m \in M. \quad (3.13)$$

$$\sum_{l \in L} Z_{jl} \leq 1, \quad j \in C. \quad (3.14)$$

$$\sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [P \cup C]} \sum_{j \in D} \sum_{m \in M} X_{mijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} X'_{ijt} + \alpha_m \sum_{j \in C} Y_{mjt} \right\} + G \geq M. \quad (3.15)$$

$$X_{mijt} \leq \sum_{b \in B} U_{mb} F_{mbijt} \quad m \in M, i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; i \neq j; t \in T. \quad (3.16)$$

$$X'_{ijt} \leq \sum_{b \in B} U'_b F'_{bijt} \quad i \in C; j \in D; t \in T. \quad (3.17)$$

Por fim, as restrições (3.18), (3.19), (3.20), (3.21), (3.22), (3.23), (3.24), (3.25) e (3.26) tratam do domínio das variáveis.

$$G \geq 0 \quad (3.18)$$

$$X'_{ijt} \geq 0, \quad i \in C; j \in D; t \in T. \quad (3.19)$$

$$I_{mjt} \geq 0, \quad m \in M; j \in [P \cup C]; t \in T. \quad (3.20)$$

$$I'_{jt} \geq 0, \quad j \in C; t \in T. \quad (3.21)$$

$$X_{mijt} \geq 0, \quad m \in M; i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; t \in T; i \neq j. \quad (3.22)$$

$$Z_{jl} \in \{0, 1\}, \quad j \in C; l \in L. \quad (3.23)$$

$$S_{mjt} \geq 0, \quad m \in M; j \in C; t \in T. \quad (3.24)$$

$$F_{mbijt} \in Z^+ \quad m \in M; b \in B; i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; t \in T; i \neq j. \quad (3.25)$$

$$F'_{bjt} \in Z^+, \quad i \in C; j \in D; b \in B; t \in T. \quad (3.26)$$

O modelo MMPRLR-MI se difere do modelo MMPRLR nas variáveis X_{mijt} , I_{mjt} , Y_{mjt} , S_{mjt} , F_{mbijt} e restrições (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.13), (3.15), (3.16), (3.20), (3.22), (3.24) e (3.25), pois adicionou-se o índice para cada tipo de pneu. O modelo MMPRLR está descrito no Anexo A.

4 ESTUDO COMPUTACIONAL

Um dos intuitos desse trabalho é avaliar se a inclusão de diferentes tipos de pneus é vantajosa para a rede de logística reversa de pneus inservíveis no estado de São Paulo. Assim, a partir do modelo proposto por Meneses (2017), MMPRLR, um novo modelo foi proposto diferenciando os pneus coletados nos ecopontos, o modelo MMPRLR-MI. Abaixo, segue a descrição de cada um dos testes realizados.

4.1 PARÂMETROS COMUNS AO MMPRLR E MMPRLR-MI

Os parâmetros utilizados no presente trabalho são baseados nos dados de Meneses (2017). A diferença consiste na separação da quantia de pneus em diferentes categorias e parâmetros relacionados a isso, como por exemplo, a fração média do aço de cada pneu e o preço de venda de 1 tonelada de cada tipo de pneu. Abaixo serão descritas as instâncias utilizadas no trabalho de Meneses (2017) e no presente trabalho.

Localização dos agentes de rede: No relatório de pneus feito pelo IBAMA no ano de 2016 consta que existiam 412 ecopontos e 20 empresas de destinação final no Estado de São Paulo. Os 42 possíveis candidatos de abertura de Centros Intermediários foram obtidos considerando-se as principais cidades do estado.

Distância entre os agentes da rede: Para se estimar a distância entre esses locais foi utilizada a fórmula de Haversine, a qual relaciona o diâmetro da Terra, a latitude e longitude de locais, assim como de relações trigonométricas. Ela calcula a menor distância entre dois pontos da superfície terrestre, ignorando montanhas, morros, ou qualquer obstáculo que possa estar entre esses locais.

$$d = 2r \operatorname{sen}^{-1} \left(\sqrt{\operatorname{sen}^2\left(\frac{\delta_b - \delta_a}{2}\right) + \cos(\delta_a) \times \cos(\delta_b) \times \operatorname{sen}^2\left(\frac{\tau_b - \tau_a}{2}\right)} \right) \quad (4.1)$$

Onde d é a distância (em quilômetros) entre dois pontos a e b , δ_a e δ_b são as latitudes de a e b , enquanto τ_a e τ_b são as longitudes. Já r é o raio da Terra, 6371 km.

Vale ressaltar que esta fórmula não considera a malha rodoviária no cálculo da distância entre dois pontos.

Quantia de pneus descartados nos ecopontos (g_{mit}): Como não existem registros acerca da quantidade de pneus coletados em cada um dos ecopontos, uma estimativa desse valor foi feita tomando-se como referência a quantia de pneus destinados dentre os anos de 2009 – 2015 descritos nos relatórios do IBAMA.

Custos transporte (cv_{mijb} e cv'_{ijb}): Utilizando-se do *Índice Nacional de Custo do Transporte Carga Lotação / INCT-L*, disponível em: <http://www.ntctec.org.br/> foram calculados os custos de transporte entre os nós da rede (ecopontos, centros intermediários e empresas de destinação final). Abaixo segue tabela com os valores base dos custos de transporte correlacionados à distância por tonelada:

Tabela 2 – Custo de transporte de carga por tonelada

PERCURSO	DISTÂNCIA (km)	R\$/ton.
Muito curto	50	72.88
Curto	400	133.39
Médio	800	205.33
Longo	2400	476.79
Muito Longo	6000	1075.37

Fonte: (MENESES, 2017).

Capacidade dos centros intermediários (qr_i , qp_i e qe_i): Foram considerados três possíveis tamanhos de centros intermediários: pequeno, médio e grande. Meneses (2017) baseou a capacidade de trituração na capacidade das máquinas de trituração das usinas de reciclagem de pneus propostas por (LIBERA et al., 2012), (ANDRADE; JESUS; CRUZ, 2015) e (SILVA; DAMO, 2016) que em é média de 300 t/mês. Estimou-se uma capacidade de triagem 25% maior que a capacidade de trituração, já que existe a possibilidade de pneus servíveis serem encontrados durante a triagem. Estabeleceu-se que pneus processados (triados e triturados) podem ser mantidos em estoque nos CI por uma semana. A tabela a seguir detalha as capacidades estabelecidas para os CI.

Tabela 3 – Capacidade dos centros intermediários

Tamanho CI	Trituração mensal	Triagem mensal	Estoque mensal
Pequeno	300	375	75
Médio	600	750	150
Grande	900	1125	225

Fonte: (MENESES, 2017).

Custos de abertura (c_i): Para se estimar os custos de abertura dos Centros Intermediários Meneses (2017) utilizou de diversas fontes, considerando vários fatores, tais como: custos de construção/galpão, mobiliário, equipamentos e máquinas, veículos e capital de giro. Abaixo segue tabela com os custos de instalação dos CI:

Tabela 4 – Custos de abertura dos centros intermediários

Tamanho CI	Custo de abertura (BRL)
Pequeno	125.000
Médio	250.000
Grande	375.000

Fonte: (MENESES, 2017)

Custos de operação (cs_m , cp_m e ce_m): Os custos relativos à triagem e trituração de pneus foram estimados através do rendimento médio por funcionário/hora de trabalho, enquanto que para os custos relativos à armazenagem de pneus tomou-se como base os custos de armazenagem de uma Central de Armazenamento de Pneus Inservíveis (CAPI) localizada em Caxias do Sul/RS, que eram de R\$7,5/t.

Renda de Produtos (rs_m , ra , rp_{mj} e rp'_j): Existe lucro e alguns custos para enviar pneus ao mercado secundário, para se vender o aço dos pneus, destinar pneus inteiros e também o subproduto de borracha (pneus triturados). Esses valores foram obtidos nos trabalhos de Lagarinhos (2011), Stark (2015) e Andrade, Jesus e Cruz (2015), mas foi feita uma atualização nos mesmos utilizando o Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) devido a inflação.

Meta estabelecida para a destinação de pneus (M): Como descrito no capítulo 2, existe uma fórmula para se determinar a quantia de pneus que deve ser destinada e coletada para se dar um destino correto a pneus inservíveis no Brasil. Nos relatórios de pneumáticos do IBAMA existem os registros das metas estabelecidas anualmente. Na tabela abaixo encontram-se as metas de descarte e coleta estabelecidas entre 2009 e 2015.

Tabela 5 – Meta de descarte de pneus entre 2009 e 2015

	2009-2010	2011	2012	2013	2014	2015
Coletado Fabricantes (ton.)	378.774	285.138	317.15	377.212	404.491	417.132
Coletado Importadores (ton.)	176.333	177.318	177.318	114.44	140.203	101.791
Total Pneus Coletados (ton.)	555.107	462.457	462.457	491.653	544.695	518.924
Variação (%)	*	*	-0.74%	7.11%	10.79%	-4.73%

Fonte: (IBAMA, 2016).

Penalização (β): Não existe um valor específico para a multa dada a empresas que não cumprem as leis e normas de coleta de pneus, já que essa multa depende de algumas variáveis como o porte da indústria que não cumpriu a meta e também a quantia de pneus faltantes para o seu cumprimento. Assim, o valor da multa varia, cabendo ao fiscal determinar a quantia cabível a ser paga. Deste modo, através do relatório do IBAMA (2016), o qual contém a quantia de pneus pendentes no ano de 2015 que foi de 18.360,61 toneladas e também o valor da multa aplicadas à cinco empresas somando o total de R\$ 25.086.000,00, considerou-se que a penalização pelo não cumprimento da meta de coleta é de R\$ 6.900 por tonelada pendente (valor médio).

Os demais valores relacionados aos parâmetros utilizados se encontram disponíveis no Anexo B.

4.1.1 Parâmetros do modelo MMPRLR-MI

Conforme mencionado na descrição do problema os tipos de pneus foram considerados no problema, sendo assim os parâmetros relativos a quantia de pneus descartados nos ecopontos, fração média de aço dos pneus, custo de triagem, de trituração, de estoque e de transporte de pneus, preço de venda de uma tonelada de pneu no mercado de segunda mão, preço de venda de pneus inteiros para as empresas de destinação final devem ser indicados pelos diferentes tipos de pneus.

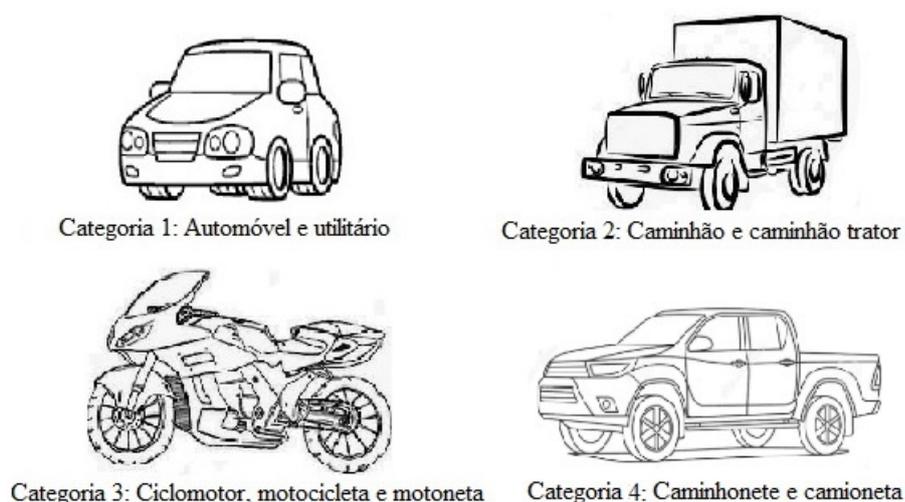
Para se obter a quantia de cada tipo de pneu, considerou-se a Frota Total de Veículos do ano de 2015 (DENATRAN, 2016). Este ano foi o escolhido pois foi o ano base para a realização dos testes de Meneses (2017). No documento encontrado haviam as seguintes categorias de veículos:

- automóvel
- caminhão
- caminhonete
- bonde
- caminhão trator
- camioneta

- chassi plataforma
- ciclo motor
- micro-ônibus
- motocicleta
- motoneta
- ônibus
- quadriciclo
- reboque
- semi-reboque
- side-car
- trator esteira
- trator rodas
- triciclos
- utilitário

Já que as quantidades de veículos dos tipos bonde, chassi pataforma, quadriciclo, side-car, trator esteira, trator rodas, triciclo, micro-ônibus, ônibus, reboque e semi-reboque não eram significativas, eles não foram considerados nesse trabalho. Agrupou-se os diferentes tipos de veículos restantes de acordo com suas semelhanças, tanto em tamanho quanto em número de rodas gerando assim quatro categorias, 1 à 4, sendo a categoria 1 de carros e utilitários que têm 4 rodas de aproximadamente o mesmo tamanho; categoria 2 é referente a caminhão e caminhão trator que podem ter de 6 à 18 rodas; categoria 3 é de motos, motonetas e ciclomotor, o qual pode ter três rodas, mas os mais comuns têm duas rodas; categoria 4 que é de caminhonetes e camionetas que possuem 4 rodas, as quais utilizam pneus maiores que as utilizadas no carro.

Figura 3 – Agrupamentos de veículos.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Com a quantia de veículos de cada categoria do estado de São Paulo a ser considerada, calculou-se a porcentagem de cada uma delas, para que então a quantia total de pneus obtida da literatura (Meneses,2017) fosse dividida de acordo, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Porcentagem de pneus de cada categoria.

Categoria	Quantia (%)
1 - carros	66%
2 - caminhões	3%
3 - motos	20%
4 - caminhonetes	11%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Muitos parâmetros permaneceram os mesmos, como capacidade dos centros intermediários, capacidade dos veículos de carga, custos de abertura, entre outros que foram mantidos e estão descritos no Anexo B. Portanto, os testes realizados levam em consideração os diferentes tipos de pneus, o preço de suas respectivas vendas no mercado de segunda mão, assim como a porcentagem de aço de cada uma das categorias de pneus.

(STARK, 2015) consideram que o preço unitário de um pneu de passeio de segunda mão custa R\$ 7,50 e sua tonelada custa R\$ 1500,00. Meneses (2017), por conta da inflação, ajusta o valor da tonelada do pneu para R\$ 1525,00. Como no trabalho deles não há diferenciação entre os tipos de pneus, eles consideraram que esse valor dizia respeito a venda de pneus de automóveis, já que é o veículo com a maior frota nas cidades.

Para o presente trabalho, a fim de se obter os valores de venda dos demais tipos de pneus, durante dois meses buscou-se contactar lojas que adquirem pneus inservíveis para remoldá-los e revendê-los, porém isso não foi possível já que não houve resposta desses comércios, logo, fez-se uma pesquisa em lojas revendedoras de pneus remoldados na cidade de Itapetininga, interior de São Paulo, para se obter a margem de lucro dessas lojas. A média da margem de lucro dos estabelecimentos contactados era de 30% do preço de venda utilizado por eles, com isso estimou-se o preço de venda de uma tonelada de cada tipo de pneu. A Tabela 7 descreve os valores por tonelada de pneus de segunda mão de cada tipo considerado no presente trabalho.

Tabela 7 – Valor de venda de pneus servíveis no mercado de segunda mão.

Categoria pneu	Venda segunda mão (R\$/ton.)
1 - carros	1525
2 - caminhões	4468
3 - motos	945
4 - caminhonetes	3568

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Segundo a Resolução nº158, de 22 de abril de 2004, é proibido usar pneus reformados em motos, porém para fins de comparação com o modelo MMPRLR esse tipo de pneu foi considerado em algumas das instâncias; logo, o valor base descrito na tabela foi obtido utilizando-se o do valor médio de pneus de moto novos (BRASIL, 2004). Como o intuito deste trabalho é o de se observar se há diferença na tomada de decisões feitas através de uma modelagem matemática e os resultados obtidos por consequência disso considerando-se diferentes tipos de pneus coletados no ecopontos ou não, somente um teste será realizado pré-determinando que a venda de pneus de motos no mercado secundário é proibida, do contrário todos os testes levarão em conta esse valor estimado obtido com base no preço de venda de um pneu de moto novo.

Em média 7% do peso de um pneu de automóvel (categoria 1) é aço, enquanto que em pneus de caminhões (categoria 2), 20% de seu peso é constituído de aço. (LAGARINHOS, 2011) Para se obter então a porcentagem de aço nos pneus de motos e caminhonetes (categorias 3 e 4), considerou-se que a relação entre o peso dos pneus e a porcentagem de aço deles eram diretamente proporcionais aos de categorias 1 e 2, obtendo assim dois valores por categoria, com os quais fez-se a média dos valores encontrados, obtendo-se assim que 4% do peso do pneu de moto é de aço e 10% do peso do pneu de caminhonete é aço. A Tabela 8 apresenta a porcentagem do peso do pneu constituída de aço

Tabela 8 – Porcentagem de aço para cada tipo de pneu.

Categoria pneu	Porcentagem de aço em um pneu
1 - carros	7%
2 - caminhões	20%
3 - motos	4%
4 - caminhonetes	10%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Para a geração das instâncias foram consideradas três diferentes metas e três diferentes quantias de pneus descartados no estado de São Paulo. Tanto a meta quanto a quantia de pneus recebidas nos ecopontos foram estimadas com base nos valores do ano de 2015. A meta de destinação desse ano foi de 137.380 ton. e foram considerados o valor com a maior porcentagem de aumento observado nos três anos precedentes, 153.385 ton. e o valor com a menor porcentagem de decréscimo observado nos três últimos anos, 131.088 ton.. De modo semelhante, a quantia de pneus descartados nos ecopontos foi de

133.882 ton., além dos valores obtidos observando-se a maior porcentagem de aumento nos três anos precedentes, 148.328 ton. e a menor porcentagem de decréscimo observado no mesmo período, 127.549 ton.. A Tabela 9 apresenta os valores da quantia de pneus descartados e das metas de destinação, a relação entre esses dois parâmetros, ou seja, se quantia de pneus destinados (D) é maior, menor ou igual à meta estabelecida (M), assim suas respectivas diferenças em toneladas. (MENESES, 2017)

Além da combinação entre a quantia de pneus descartados e as diferentes metas, Meneses (2017) considera quatro diferentes tipos de distribuição de pneus entre os ecopontos: frota de veículos, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), população e o Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios com ecopontos. O presente trabalho irá comparar os resultados obtidos por Meneses (2017) levando em consideração somente as instâncias relacionadas a frota de veículos municipais.

Tabela 9 – Descrição do grupo de instâncias em relação a pneus descartados e metas.

Instâncias	Pneus descartados (ton.)	Meta (ton.)	Relação	Difereça Meta-Descarte (ton.)
$\Delta MD1$	148.328	131.088	D>M	-17.240
$\Delta MD2$	148.328	131.088	D>M	-10.948
$\Delta MD3$	133.882	131.088	D>M	-2,794
$\Delta MD4$	133.882	133.882	D=M	0
$\Delta MD5$	133.882	137.380	D<M	3.498
$\Delta MD6$	127.550	131.088	D<M	3.538
$\Delta MD7$	148.328	153.385	D<M	5.057
$\Delta MD8$	127.550	137.38	D<M	9.83
$\Delta MD9$	133.882	153.385	D<M	19.503
$\Delta MD10$	127.55	153.385	D<M	25.835

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017).

Para a execução dos experimentos computacionais foi utilizado um computador com processador Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v3 3.50 GHz com 32GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 Professional. Foi utilizada a linguagem de modelagem algébrica AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 1990) com o solver CPLEX 12.8 (IBM, 2017).

Inicialmente foram utilizadas as instâncias de $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$, com os dados reais da rede de logística de pneus inservíveis do estado de São Paulo, para se observar as diferentes estratégias de ambos os modelos e como isso afeta diretamente os custos totais da rede. Meneses (2017) escolheu a instância $\Delta MD5$ para detalhar e ilustrar seus resultados, o mesmo foi feito nesse trabalho.

Criaram-se três instâncias ilustrativas, a fim de se tentar obter resultados ótimos ou próximos da otimalidade. Assim essas novas instâncias foram rodadas utilizando-se o modelo MMPRLR, o MMRPR-MI e o modelo multi-item com uma pequena variação devido a restrição existente por causa da Resolução n° 158 que proíbe a venda de pneus remoldados de motos (BRASIL, 2004).

4.1.2 Solução das instâncias $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$

Detalhamento da solução da instância base ($\Delta MD5$)

Como Meneses (2017) escolheu a instância $\Delta MD5$ para detalhar e mostrar os resultados ela foi escolhida para a comparação entre os dois modelos.

Os critérios de parada utilizados por Meneses (2017) foram o de tempo (14.400 segundos) e o do *gap* relativo (0,5%). Devido ao tamanho e dificuldade do problema, em 4 horas o CPLEX encontrou um resultado com *gap* relativo de 1,46%. Para que os resultados obtidos utilizando-se o modelo MMPRLR-MI pudessem ser comparáveis optou-se então por um critério de parada de *gap* de 1,46% para a instância $\Delta MD5$ rodada com esse modelo. O resultado foi obtido em 6 horas e 54 minutos, mostrando que o modelo MMPRLR-MI é mais caro computacionalmente.

Os resultados utilizando o modelo MMPRLR-MI indicam a abertura de 6 centros intermediários, todos eles de tamanho pequeno, algo muito diferente dos resultados obtidos com o modelo original, MMPRLR, que indica a abertura de 19 centros intermediários, sendo 13 de tamanho pequeno, 2 de tamanho médio e 4 de tamanho grande. A tabela 10 contém a comparação dos resultados relativos a custos e rendas de ambos os modelos, assim como a variação entre eles em porcentagem. Como o objetivo do modelo é o de minimizar os custos da rede, quando o valor da função objetivo é positivo significa que esse é o custo total da rede, caso esse valor seja negativo, indica que há lucro na rede.

Observando-se a Tabela 10 verifica-se que as diferenças mais significativas entre os resultados obtidos são os valores relativos a custo de instalação dos centros intermediários, pois os resultados dessa instância utilizando-se o modelo MMPRLR-MI indica a abertura de 11 centros a menos; custos de operação, visto que a resolução indica o envio de pneus inteiros diretamente dos ecopontos para empresas de destinação final, sem triturá-los; renda total e renda de aço apresentam grandes diferenças também, já que a MMPRLR-MI envia

Tabela 10 – Comparação entre os custos totais da rede do modelo MMPRLR e MMPRLR-MI da instância Δ MD5.

	MMPRLR	MMPRLR-MI	Diferença (%)
Valor F.O. (R\$)	41.335.217	45.347.905	+ 9,71
Gap	1,46%	1,46%	-
Custos instalação CI (R\$)	3.632.301	750.000	- 79,35
Custos de operação (R\$)	3.632.301	7.258.493	+ 99,84
Custos transporte (R\$)	10.896.901	13.631.508	+ 25,10
Custos multa (R\$)	24.132.978	24.162.057	+ 0,12
Renda total (R\$)	2.904.824	454.153	+ 115,92
Renda pneu 2ª mão (R\$)	0	0	-
Renda aço (R\$)	2.904.600	454.153	- 84,36

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

pneus diretamente para as empresas de destinação final, o lucro dessa venda supera o lucro que se obteria vendendo o aço dos pneus. Apesar de existirem essas grandes diferenças, os custos totais da rede ficaram bem próximos, não sendo possível observar de fato grandes melhoras ou perdas em se considerar a coleta de diferentes tipos de pneus.

Não há venda de pneus no mercado de segunda mão, resultado esperado visto que o valor total de pneus destinados é menor do que a quantia estabelecida pela meta, além de que o valor da multa é maior do que o valor de venda de qualquer um dos tipos de pneus. O valor a ser pago pelo não cumprimento de meta é de R\$ 24.162.057, ou seja, faltaram 3.501,75 toneladas de pneus a serem destinados.

Os custos mais representativos são os de multa, seguido pelos de transporte, assim como no trabalho de Meneses (2017); utilizando-se o modelo MMPRLR-MI os custos de abertura de instalações é menor do que o custo de operação que envolvem a trituração dos pneus e também o custo de enviar os pneus diretamente para as empresas de destinação final. A Tabela 11 a seguir traz a comparação de resultados gerais obtidos pelo modelo MMPRLR e pelo MMPRLR-MI, contendo os fluxos de pneus entre os agentes da rede, as decisões táticas de quantia de pneus a serem triturados, quantia de aço a ser separado e vendido, o estoque médio de pneus, o número de viagens a serem realizadas, quantidade de pneus vendidos no mercado secundário e por fim, a quantia de pneus faltantes para se atingir a meta estabelecida.

Há uma grande diferença na quantia de pneus transportados entre os nós das redes. Os resultados obtidos pelo modelo MMPRLR indicam que o melhor é se transportar pneus triturados, abrindo assim um maior número de centros intermediários para se fazer a

triagem e trituração dos mesmos, enquanto que os resultados utilizando-se MMPRLR-MI indicam abertura de menos centros e os que são indicados para abertura são de porte pequeno, visto que nesse caso é preferível enviar os pneus inteiros diretamente dos ecopontos para as empresas de destinação final. Com relação aos estoques, ambos os modelos indicam que é interessante mantê-los, uma vez que há limitações nos centros de triagem assim como nas empresas de destinação final.

Tabela 11 – Comparação entre decisões táticas da instância Δ MD5.

	MMPRLR	MMPRLR-MI	Diferença (%)
Fluxo P-D (ton.)	37.055	119.697,5	+ 223,03
Fluxo P-C (ton.)	96.827	14.180,76	- 85,53
Fluxo C-D (int.) (ton.)	0	0	-
Fluxo C-D (trit.) (ton.)	87.145	3.166,73	- 96,36
Pneus triturados(ton.)	96.827	14.180,74	- 85,35
Aço (ton.)	9.682	1.514	- 84,36
N° viagens realizadas	14.705	13.453	- 8,51
Pneus segunda mão	0	0	0,00
Pneus faltantes	3.497	3501,75	+ 0,14

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Os resultados do modelo multi-item indicam estoque de todos os tipos de pneus inteiros em todos os ecopontos em praticamente todos os períodos de tempo, apresentando 29,75 toneladas de pneus (uma pequena quantia de cada um dos tipos) em estoque em quatro centros intermediários indicados a serem abertos.

Tabela 12 – Quantidade de pneus triturados de cada categoria.

Categoria	Quantia triturada (ton.)	% Total triturados
1-carros	3.405,07	24,0
2-caminhões	3.958,42	27,9
3-motos	3.298,67	23,3
4-caminhonetes	3.518,58	24,8

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Observando a Tabela 12 constata-se que a trituração dos pneus de todas as categorias é feita de maneira mais ou menos uniforme, ou seja, não há discrepâncias muito grandes entre as quantidades de pneus triturados de cada uma das 4 categorias. Além dos pneus da categoria 2 serem os mais triturados, eles são os que mais apresentam aço em sua composição, seguidos pelos pneus da categoria 4 e das categorias 1 e 3, respectivamente.

Como o aço é obtido através da separação e trituração dos pneus, quanto maior for a quantia de aço em sua composição e maior a quantidade de pneus triturados do mesmo, maior será o lucro obtido através da venda desse material.

Com relação ao estoque de pneus triturados, há a indicação de estoque de 15,8 toneladas, também distribuídos em quatro dos 6 centros intermediários indicados a abertura. Isso era o esperado, visto que o modelo dá preferência em levar os pneus inteiros para as empresas de processamento final.

Há uma constância na abertura dos centros intermediários, sendo que existem quatro centros (C4-Araraquara, C29-Presidente Prudente, C36-São José do Rio Preto e C42-São Paulo) que são indicados para serem abertos em todas as instâncias, sendo que as plantas de Presidente Prudente, São José do Rio Preto e São Paulo também são indicadas para abertura em todas as quarenta instâncias testadas no trabalho de Meneses, demonstrando assim a importância estratégica e econômica dessas cidades para a rede de logística reversa no estado de São Paulo.

Apesar da grande diferença nos resultados de grande parte das variáveis apresentadas anteriormente (como por exemplo o fluxo dos pneus entre os nós da rede, a quantia de aço vendida, quantia de pneus de triturados), a quantia de pneus faltantes para se atingir a meta, assim como a quantia total de gastos da rede é bem próxima da obtida por Meneses (2017), sendo ambas válidas para esta instância.

Para se verificar se essa extensão continua sendo válida para as outras instâncias, assim como na dissertação de mestrado de Meneses (2017), os resultados obtidos utilizando-se outros cenários serão mostrados a seguir e novamente será feita a comparação dos principais valores obtidos a partir do modelo MMPRLR e MMPRLR-MI.

Solução das instâncias $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$

As Tabelas 13 e 14 apresentam a comparação entre os resultados obtidos para todas as instâncias consideradas, sendo que elas podem ser divididas em três categorias: de $\Delta MD1$ à $\Delta MD3$ a meta de pneus a serem coletados é menor do que a quantia descartada de pneus nos ecopontos, em $\Delta MD4$ a meta de descarte e a quantia descartada possuem o mesmo valor, enquanto que de $\Delta MD5$ à $\Delta MD10$, o valor descartado nos ecopontos é menor do que o valor da meta. Abaixo é feita uma discussão sobre os resultados obtidos em cada um dos grupos de instâncias.

Tabela 13 – Comparação das instâncias Δ MD1 à Δ MD10 de MMPRLR e MMPRLR-MI.

Instância	MMPRLR			MMPRLR-MI		
	N° de CI	Objetivo (\$)	N° de viagens	N° de CI	Objetivo (\$)	N° de viagens
Δ MD1	20	- 8.594.813	15.991	20	-9.395.096,86	25.793
Δ MD2	20	1.339.764	16.018	16	-629.762,44	21.530
Δ MD3	20	12.460.696	14.608	9	11.339.237,38	14.350
Δ MD4	20	17.024.690	14.680	5	21.175.740,04	13.483
Δ MD5	20	41.168.313	14.862	6	45.347.905,31	13.453
Δ MD6	20	40.654.058	14.095	7	44.761.675,41	12.879
Δ MD7	20	53.894.051	16.340	8	58.604.751,29	14.812
Δ MD8	20	84.088.844	14.115	7	88.181.748,74	12.878
Δ MD9	20	151.625.608	14.723	6	156.117.897,70	13.644
Δ MD10	20	194.533.013	14.117	9	198.961.045,30	12.950

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

O primeiro grupo é o das instâncias Δ MD1, Δ MD2 e Δ MD3. Os valores obtidos utilizando-se o modelo MMPRLR-MI possuem as mesmas características obtidas no trabalho de Meneses (2017), ou seja, como há uma quantia excedente de pneus, não há penalização por multa, visto que além da meta ser cumprida, existe a venda de pneus servíveis no mercado secundário. Quanto maior a diferença entre meta e descarte, maior é o lucro que se obtém através da venda de pneus. Ao se comparar custos totais da rede nos testes realizados com o modelo MMPRLR e o MMPRLR-MI, nota-se que os menores custos são os obtidos pelo modelo multi-item, inclusive em Δ MD1 e Δ MD2 as funções objetivo, ou seja, os custos totais da rede, são valores negativos, isto é, há lucro na rede. As diferenças entre meta-descarte dessas duas instâncias são de -13,15% e -7,97%, respectivamente, fatores diretamente ligados a renda total da rede pois quanto maior a quantia excedente de pneus, mais se pode lucrar com isso através da venda de pneus servíveis ou a venda de aço obtido após o processo de trituração.

Uma grande diferença estratégica entre os modelos MMPRLR e MMPRLR-MI é a quantia de centros intermediários indicados para abertura no horizonte de planejamento. Os testes realizados utilizando-se o modelo original (MMPRLR) indicam um número considerável de centros intermediários (de diferentes tamanhos) a serem abertos; o modelo MMPRLR-MI dá preferência ao transporte de pneus dos ecopontos diretamente para as empresas de destinação final, logo indica a abertura de bem menos centros intermediários. Eles são em sua maioria de tamanho pequeno, pois com essa decisão de enviar pneus diretamente para as empresas de processamento, não há a necessidade de se ter centros intermediários de porte médio ou grande. Todas as instâncias rodadas com o modelo multi-item indicam a abertura de centros de tamanho pequeno, somente a instância Δ MD1

sugere a abertura de dois centros grandes e um de tamanho médio e $\Delta MD2$ que indica a abertura de um centro intermediário de porte médio.

Tabela 14 – Custos e rendas das instâncias $\Delta MD1$ à $\Delta MD10$ de MMPRLR e MMPRLR-MI.

Instância	MMPRLR			MMPRLR-MI		
	Custo (\$)	Multa	Renda	Custo (\$)	Multa	Renda
$\Delta MD1$	18.942.243	0	29.238.197	20.227.286,39	0	29.622.383,25
$\Delta MD2$	18.992.079	0	19.662.674	18.772.598,01	0	19.402.360,46
$\Delta MD3$	17.937.831	0	7.200.952	15.584.163,78	0	4.244.926,40
$\Delta MD4$	18.229.989	0	2.992.331	14.936.492,03	62.838,65	6.239.248,01
$\Delta MD5$	18.242.090	24.133.575	2.994.289	39.075.849,50	24.162.057,20	6.272.055,8
$\Delta MD6$	17.663.832	24.414.685	2.949.763	38.806.373,38	24.241.435,91	5.955.302,03
$\Delta MD7$	20.263.744	34.890.506	3.284.986	51.630.947,24	34.903.810,69	6.973.804,04
$\Delta MD8$	17.677.903	67.829.599	2.948.778	82.221.593,53	67.834.123,10	5.960.155,21
$\Delta MD9$	18.270.586	134.567.482	2.996.270	149.853.188,60	134.568.683,20	6.264.709,09
$\Delta MD10$	17.691.236	178.265.104	2.950.277	193.002.482,30	178.268.658,40	5.958.563

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Os resultados obtidos em ambos os modelos a partir da instância $\Delta MD4$ até a $\Delta MD10$ se mostram próximos, com o modelo MMPRLR-MI indicando abertura de um número reduzido de centros intermediários, pois esse valor é inversamente proporcional a quantia de pneus que é enviada dos ecopontos para as empresas de destinação final, resultado diferente do obtido por Meneses (2017), o qual dá preferência de envio do material dos ecopontos para os centros intermediários e aí sim decidir se pneus servíveis serão vendidos, ou se serão triturados, por consequência se haverá venda do aço obtido após o processo.

Em $\Delta MD4$ o valor da multa é bem baixo no teste com o modelo multi-item, visto que um valor pequeno de pneus é enviado para venda no mercado secundário, diferentemente dos demais testes com as outras instâncias, pois nelas há uma falta de pneus descartados, ou seja, a meta a ser cumprida é maior, causando multas com valores altos, logo o modelo não envia pneus servíveis para serem revendidos, pois o custo por tonelada de pneus não destinados é maior do que o valor da tonelada de qualquer um dos quatro tipos de pneus considerados.

Observando-se a Tabela 13 verifica-se que o modelo MMPRLR-MI é vantajoso quando a quantia de pneus excede o valor estipulado pela meta, pois deste modo existe a venda de pneus no mercado secundário e esse modelo considera diferentes valores para os diferentes tipos de pneus, sendo assim a renda é maior, gerando lucro para a rede do estado de São Paulo. Nos outros testes, nota-se que apesar do modelo MMPRLR

apresentar melhores resultados, eles não são tão diferentes dos obtidos através do modelo multi-item. Porém, nesses testes os critérios de parada foram os mesmos utilizados por Meneses (2017), tempo limite de 14.400 segundos ou *gap* relativo de 0.5%. Por ser um modelo com mais índices, o modelo se torna mais complexo resultando em *gaps* mais altos. Para tentar fazer uma comparação mais adequada, instâncias menores foram criadas para ver o comportamento do modelo através de resultados ótimos ou próximos do ótimo, além de se observar as diferenças na tomada de decisão do modelo MMPRLR-MI considerando a possibilidade ou não de se vender pneus de motos no mercado de segunda mão.

4.2 INSTÂNCIAS ILUSTRATIVAS

Como a rede de logística reversa de pneus inservíveis do estado de São Paulo é muito grande, os resultados obtidos utilizando-se os dados reais da rede possuem um *gap* alto, dificultando assim a comparação entre os dois modelos considerados. Logo, buscou-se diminuir o tamanho das instâncias a serem testadas, diminuindo o número de ecopontos, candidatos à centros intermediários, empresas de destinação final e o horizonte de planejamento. As novas instâncias e os resultados obtidos a partir delas serão descritos a seguir.

4.2.1 Descrição das instâncias ilustrativas

Foram consideradas 3 instâncias ilustrativas, cada uma delas rodada utilizando-se o modelo MMPRLR, o modelo MMPRLR-MI e uma variação do último. Essa variação do modelo MMPRLR-MI foi feita pois, como mencionado nesse capítulo, existe a Resolução nº 158 que proíbe o remolde do pneu de moto, ou seja, não é possível revendê-lo no mercado de segunda mão. Logo, nessa variação desse modelo, pneus de moto não são considerados para a venda no mercado secundário. Para facilitar a notação, os testes realizados não considerando a venda de pneus de moto para remolde será chamado de MMPRLR-MI*.

Estas instâncias são compostas por 4 períodos de tempo, 20 ecopontos, 10 locais candidatos para a instalação de centros intermediários e 4 empresas de destinação final. Considerou-se um único tipo de veículo de transporte, dois possíveis tamanhos de instalação de centros intermediários (pequeno e grande) e uma porcentagem de pneus ainda servíveis dentre os descartados de 20%.

Para a escolha dos ecopontos que seriam considerados para estes testes, primeiramente excluiu-se as cidades que possuíam menos de 3 pontos de coleta. A partir disso, selecionaram-se as 20 cidades com maior frota de veículos do estado e assim, escolheu-se 1 ecoponto de cada uma dessas cidades de forma aleatória. Os ecopontos utilizados encontram-se na Tabela 35 no Anexo C. A escolha dos candidatos a abertura de centros intermediários e de empresas de destinação final foi feita de forma aleatória e os locais selecionados também encontram-se no Apêndice A, nas Tabelas 36 e 37, respectivamente.

A quantia de pneus inservíveis coletada nos ecopontos considerada foi a de 20 toneladas. Utilizou-se a mesma distribuição feita por Meneses (2017), que fez isso de maneira aleatória. A Tabela 15 apresenta a distribuição de pneus para cada período de tempo considerado.

Tabela 15 – Total de pneus descartada nos ecopontos para cada período de tempo.

Ecoponto	1° período (ton.)	2° período (ton.)	3° período (ton.)	4° período (ton.)
P1	116	144	165	378
P2	449	379	185	179
P3	294	448	495	289
P4	69	247	201	198
P5	325	13	338	204
P6	365	199	455	326
P7	420	303	40	70
P8	290	325	163	57
P9	443	263	403	97
P10	110	192	451	284
P11	207	388	205	19
P12	181	440	169	168
P13	7	429	448	493
P14	161	196	111	53
P15	387	451	286	4
P16	310	9	147	77
P17	169	302	55	370
P18	428	108	22	246
P19	372	305	213	505
P20	52	366	318	451

Fonte: (MENESES, 2017).

Para os resultados do modelo MMPRLR-MI, os valores descritos na tabela 10 acima foram divididos de acordo com a porcentagem de cada tipo de pneu descrito na Tabela 7: automóvel e utilitário - 66%; caminhão e caminhão trator - 3%; ciclomotor, motocicleta e motoneta - 20%; caminhonete e camioneta - 11%.

Consideraram-se 3 diferentes metas de coleta, uma de 16 toneladas (20% a menos do que a quantia coletada $D > M$), uma de 20 toneladas (mesma quantia da coletada, $D = M$)

e a última de 24 toneladas (20% a mais do que a quantia coletada, $D < M$). A Tabela 16 apresenta a descrição das instâncias utilizadas.

Tabela 16 – Descrição do grupo de instâncias em relação a pneus descartados e metas.

Instâncias	Pneus descartados (ton.)	Meta (ton.)	Relação	Difereça Meta-Descarte (ton.)
I1	20.000	16.000	$D > M$	- 4.000
I2	20.000	20.000	$D = M$	-
I3	20.000	24.000	$D < M$	+ 4.000

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

As capacidades de triagem, trituração e estoque dos centros intermediários estão descritas na Tabela 38 do Apêndice A, enquanto que os custos de abertura e destinação de pneus também estão discriminados no Apêndice A, nas Tabelas 39 e 40, respectivamente. Os demais parâmetros são os mesmos utilizados nos testes com os dados reais então estão descritos nas Tabelas 22, 24, 25, 27 e 28 do Anexo B. Como a multa e o volume de pneus também foi considerado o mesmo, eles também se encontram nesse anexo.

4.2.2 Resultados instâncias ilustrativas

Como o modelo MMPRLR-MI é mais complexo do que o modelo MMPRLR por ele ter um índice a mais, por conta da diferenciação dos diferentes tipos de pneu, primeiramente rodou-se o modelo MMPRLR com a instância I1 e critério de parada de 4 horas, a fim de tentar se obter a solução ótima dessa instância. As 4h foram atingidas e obteve-se um *gap* de 0,25%. Como esse resultado é bem próximo da solução ótima, para todas as demais instâncias, o critério de parada foi o desse *gap* de 0,25%. Rodaram-se então cada umas das instâncias utilizando-se dos três modelos considerados, o MMPRLR, o MMPRLR-MI e o MMPRLR-MI*.

1^a instância ilustrativa - I1

A Tabela 17 mostra o fluxo de pneus entre os nós das redes, a quantia de pneus triturados assim como a quantia de aço vendida, o número de viagens realizadas, a quantidade de pneus servíveis vendidos no mercado secundário e a quantidade de pneus faltantes para se atingir a meta. Após o recebimento dos pneus nos ecopontos, a maior parte deles é levada aos centros intermediários, para então serem transportados para as empresas de destinação final. Os resultados obtidos nos três modelos são interessantes, pelo fato de darem preferência ao transporte dos pneus inteiros e não triturados, fato

não esperado já que cabem quatro vezes mais pneus em um caminhão se o material for transportado triturado. É interessante ressaltar que apesar do teste realizado com o modelo MMPRLR indicar mais pneus para serem revendidos no mercado secundário, o lucro maior com essa venda continua sendo do modelo multi-item (MMPRLR-MI), que considera os diferentes tipos de pneus, reforçando o quanto se considerar os diferentes tipos de pneus pode alterar a configuração da rede.

Tabela 17 – Decisões estratégicas da 1ª instância ilustrativa.

	MMPRLR	MMPRLR-MI	MMPRLR-MI*
Fluxo P-D (ton.)	10	950,16	3.399,07
Fluxo P-C (ton.)	19.988	19.019,41	15.792,39
Fluxo C-D (int.) (ton.)	12.582,07	13.330,27	10.883,77
Fluxo C-D (trit.) (ton.)	3.068	384	383,46
Pneus triturados(ton.)	3.409,33	1.719,58	1.717,14
Aço (ton.)	340.93	183,57	183,31
Nº viagens realizadas	4.193	4.317	3.794
Pneus segunda mão	3.997,6	3.803.88	3.078,59
Pneus faltantes	0	0	0

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

A Tabela 18 apresenta os custos totais, assim como o detalhamento de cada um dos custos e rendas da rede de cada um dos três modelos utilizados. Como o esperado, os melhores resultados foram aqueles obtidos utilizando-se o modelo MMPRLR-MI, visto que nele além da distinção dos valores de venda das toneladas de cada categoria de pneus, é possível se vender pneus servíveis de todas as categorias. O segundo melhor resultado é o de MMPRLR-MI*, pois mesmo não existindo a possibilidade de venda de pneus da categoria 3 (motos, motocicletas e motonetas), ainda assim há os pneus servíveis das outras categorias, fazendo com que esse teste ainda seja mais vantajoso do que o que utiliza do modelo MMPRLR. Utilizar o modelo MMPRLR-MI* faz com que seja possível evitar o destino errado de pneus da categoria 3, o que o torna interessante, pois ele auxilia no cumprimento da lei que proíbe o remolde de pneus dessa categoria. Como esperado, não há penalização por não cumprimento de meta e a maior fonte de renda do sistema é a venda de pneus servíveis.

Já que o modelo MMPRLR-MI* não permite a venda de pneus servíveis da categoria 3 (motos, motocicletas e motonetas) no mercado secundário, a maioria deles é mantida nos ecopontos, em estoque durante os períodos considerados. Uma parte da quantia total

Tabela 18 – Detalhamento de custos e rendas da 1ª instância ilustrativa

	MMPRLR	MMPRLR-MI	MMPRLR-MI*
Valor F.O. (R\$)	496.515,74	- 1.265.536,88	- 877.894,67
Custos instalação CI (R\$)	1.000.000	875.000	750.000
Custos de operação (R\$)	2.899.076,73	1.392.870,05	1.340.798,63
Custos transporte (R\$)	2.796.059	3.152.620	3.030.983
Custos multa (R\$)	0	0	0
Renda pneu segunda mão (R\$)	6.096.340	6.630.955,96	5.944.683,43
Renda aço (R\$)	102.280	55.070,97	54.993,87

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

é enviada diretamente dos ecopontos para as empresas de destinação final, enquanto que outra parte é triturada nos centros intermediários.

2ª e 3ª instâncias ilustrativas - I2 e I3

Tanto ao se utilizar a 2ª instância ilustrativa (meta = descarte) quanto na 3ª instância ilustrativa (meta > descarte), o modelo MMPRLR-MI traz melhores resultados para a rede, com custos totais de rede menores. Nos testes com a 2ª instância, conforme observado na Tabela 19, os maiores custos da rede são novamente os de transporte de pneus, já que não há praticamente multa, pois a quantia de pneus enviadas para o mercado secundário é muito baixa. Entretanto, observando-se a Tabela 20, nota-se que nos testes que utilizaram a terceira instância, a multa é o custo mais alto da rede, pois a meta não é cumprida. Ao se testar essas instâncias utilizando-se do modelo MMPRLR-MI, considerando ou não a venda de pneus servíveis, nota-se que os resultados obtidos são bem próximos, praticamente não havendo diferença nos resultados, visto que como faltam pneus para serem destinados, não há indicativos de venda de pneus de segunda mão. Os demais valores tais como fluxo de pneus entre os nós, quantia de pneus triturados e aberturas de centros intermediários permanecem os mesmos, sendo preferível enviar a maior parte dos pneus inteiros diretamente para as empresas de destinação final, o modelo MMPRLR triturando mais pneus e por consequência vendendo mais aço e um baixo número de centros abertos.

Tabela 19 – Comparação dos resultados da 2ª instância ilustrativa.

	MMPRLR	MMPRLR-MI	MMPRLR-MI*
Valor F.O. (R\$)	10.226.155	6.079.050,87	6.080.548,1
Custos instalação CI (R\$)	250.000	250.000	250.000
Custos de operação (R\$)	3.358.094,88	2.996.212,10	2.997.447,40
Custos transporte (R\$)	2.578.973	2.887.315	2.888.121
Custos multa (R\$)	5.315.882,67	184	0
Renda pneu segunda mão (R\$)	1.174.521,11	0	0
Renda aço (R\$)	102.274,67	54.660,23	55.020,29
Fluxo P-D (ton.)	15.820,67	18.293,23	18.282,01
Fluxo P-C (ton.)	4.179,33	1.706,74	1.717,99
Fluxo C-D (int.) (ton.)	0	0	0
Fluxo C-D (trit.) (ton.)	3.068	381,14	383,65
Pneus triturados(ton.)	3.409,15	1.706,69	1.717,96
Aço (ton.)	340,92	182,2	183,4
Nº viagens realizadas	1.907	1.905	1.905
Pneus segunda mão	770,18	0	0
Pneus faltantes	770,42	0,03	0

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Tabela 20 – Comparação dos resultados da 3ª instância ilustrativa

	MMPRLR	MMPRLR-MI	MMPRLR-MI*
Valor F.O. (R\$)	37.841.198,85	33.691.787,79	33.699.413
Custos instalação CI (R\$)	250.000	250.000	250.000
Custos de operação (R\$)	3.357.995,63	2.995.920,20	2.995.056,06
Custos transporte (R\$)	2.594.331	2.897.703	2.907.706
Custos multa (R\$)	32.916.066,67	27.606.424,67	27.601.092,5
Renda pneu 2ª mão (R\$)	1.174.927,78	3.322,2	0
Renda aço (R\$)	102.266,67	54.937,88	54.441,64
Fluxo P-D (t.)	15.820,67	18.283,65	18.299,92
Fluxo P-C (t.)	4.179,33	1.716,35	1.699,92
Fluxo C-D (int.) (t.)	0	0	0
Fluxo C-D (trit.) (t.)	3.068	383,07	379,61
Pneus triturados(t.)	3.408,88	1.715,39	1.699,9
Aço (t.)	340,89	183,13	181,47
Nº viagens realizadas	1.914	1.913	1.916
Pneus 2ª mão	770,44	0,93	0
Pneus faltantes	4.770,44	4.000,93	4.000,16

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

Ao se rodar as instâncias I2 e I3 utilizando-se o modelo MMPRLR-MI* novamente se obteve que a maioria dos pneus de motos, motocicletas e motonetas é mantida em estoque nos ecopontos. Esses pneus são armazenados inteiros. O segundo maior destino dado a este tipo de pneu é a trituração nos centros intermediários, seguida do transporte de pneus inteiros dos ecopontos para as empresas de destinação final.

5 CONCLUSÕES

O objetivo central do presente trabalho era o de observar se ao utilizar um modelo que considera os diferentes tipos de pneus descartados nos ecopontos haveria algum impacto na tomada de decisões do problema, como por exemplo nos locais de abertura dos centros intermediários e o dimensionamento dos mesmos e também, se ao fazer isso a renda total do sistema seria modificada ou não. Para tanto, utilizou-se um modelo da literatura como base para a obtenção de um modelo que diferenciasse os tipos de pneus. Como há diferentes tipos de pneus descartados nos ecopontos e dependendo do pneu existem leis específicas para o seu descarte, fazer esses questionamentos e buscar respondê-los é importante, pois essas mudanças podem trazer benefícios ambientais e econômicos.

Nos testes computacionais que utilizaram instâncias com dados reais da rede de logística reversa de pneus inservíveis do estado de São Paulo, constatou-se que o modelo que considera os diferentes tipos de pneus, MMPRLR-MI, é mais caro computacionalmente do que o modelo que não considera essa diferenciação, o modelo MMPRLR.

Mesmo o modelo MMPRLR-MI sendo mais caro computacionalmente, os resultados obtidos por ele utilizando-se as instâncias reais não foram tão diferentes daqueles obtidos pelo modelo MMPRLR. Utilizando-se o novo modelo, MMPRLR-MI, os custos totais da rede foram mais altos do que os obtidos por MMPRLR nas instâncias em que o total de pneus destinados era igual ($D=M$) ou menor ($D<M$) do que a meta estabelecida por lei, porém, nas instâncias em que o total de pneus destinados era maior do que a meta ($D>M$), o modelo novo se mostrou mais vantajoso. Apesar dos valores das funções objetivo não terem sido muito diferentes se compararmos instância a instância utilizando os diferentes modelos, as decisões estratégicas da rede foram bem diferentes. A maior diferença é encontrada no fato do modelo MMPRLR indicar o transporte da maioria dos pneus dos ecopontos para os centros intermediários, para ali serem triturados e só então serem transportados para as empresas de destinação final, enquanto que o modelo MMPRLR-MI indica o transporte de pneus inteiros entre os ecopontos e as empresas de destinação final.

Como mencionado anteriormente, o modelo MMPRLR-MI é mais caro computaci-

onalmente, fazendo com que no mesmo período de 4h em que se roda o programa com ambos os modelos não traga resultados com o mesmo *gap* relativo. Com isso, buscou-se utilizar instâncias menores para se obter resultados mais próximos da otimalidade e assim, fazer as devidas comparações entre os modelos. Como por lei é proibido remoldar pneus de motos, com as instâncias ilustrativas foram feitos testes em que se proibia a venda de pneus dessa categoria, a fim de ver o que isso alteraria em comparação com o modelo que considera a venda desse tipo de pneu.

Em todos os testes realizados com as instâncias ilustrativas, o modelo MMPRLR-MI se mostrou mais benéfico, com os menores custos da rede. Nos testes em que a quantia recolhida de pneus era maior do que a meta estabelecida por lei, o modelo MMPRLR-MI trouxe lucro para a rede, considerando ou não os pneus de moto para revenda. Nos demais testes não houve lucro, porém em comparação com o modelo MMRPRL, o modelo que considera multi-items novamente se mostrou mais vantajoso. Em todos os testes que não consideraram a revenda de pneus de moto no mercado de secundário, esses pneus foram em sua maioria em estoque nos ecopontos, sendo que uma parte deles foi transportado diretamente para as empresas de destinação final e a outra parte foi triturada. A partir dos resultados obtidos com as instâncias ilustrativas, conclui-se que não considerar pneus na venda para o mercado de segunda mão foi importante para mostrar que isso de fato altera os custos totais da rede e principalmente que apesar de haver essa alteração negativa, pelo fato dos custos totais serem mais altos, é necessário se fazer essa restrição pois ela é prevista na lei, fazendo com que o modelo MMPRLR-MI* traga resultados ainda mais precisos para a rede de logística de pneus inservíveis no Brasil.

REFERÊNCIAS

- 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*, Universidade Tecnológica Federal Paraná, v. 4, n. 1, p. 107–127, 2015.
- ANIP. *História do pneu: quase 200 anos de tecnologia*. 2011. <<http://www.anip.org.br/historia-e-fabricacao/>>. Acesso em: 14 de novembro de 2018.
- ANIP. *Reciclanip e o sucesso da logística reversa dos pneus inservíveis*. 2018. <<http://www.anip.org.br/destinacao-ambientalmente-correta/>>. Acesso em: 14 de novembro de 2018.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa Operacional para cursos de engenharia: Modelagem e algoritmos*. [S.l.]: Rio de Janeiro: Campus, 2007.
- BASSANEZI, R. C. *Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia*. [S.l.]: São Paulo: Editora Contexto, 2002.
- BRASIL. *Resolução nº 158, de 22 de Abril de 2004*. 2004. <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/DOU/2004/05/07>>. Acessado em: 07 de julho de 2019.
- BRASIL. *Resolução 416*. 2009. <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 23 de outubro de 2018.
- BRASIL. *Lei 12305*. 2010. <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 21 de outubro de 2018.
- DENATRAN. *Frota de Veículos-2015*. 2016. <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/257-frota-2015>>. Acesso em: 08 de dezembro de 2018.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. A modeling language for mathematical programming. *Management Science*, INFORMS, v. 36, n. 5, p. 519–554, 1990.
- GUARNIERI, P. *Logística Reversa: em busca do equilíbrio econômico e ambiental*. 1. ed. [S.l.]: Recife: Clube de Autores, 2011.
- IBAMA. *Relatório de pneumáticos 2016 - Resolução Conama nº 416/19*. 2016. <<https://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2018.pdf>>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.
- IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual. *Version 12 Release 8*, 2017.
- JÚNIOR, R. d. A. A.; AMARAL, S. P. Lixo urbano, um velho problema atual. *IN: XIII SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO*, 2006.
- LAGARINHOS, C. A. F. *Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

- LIBERA, F. V. D. et al. Parâmetros operacionais para implantação de uma recicladora de pneus inservíveis em Santa Maria-RS. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 6, n. 6, p. 1049–1065, 2012.
- MENESES, J. M. B. *Logística reversa de pneus inservíveis: Modelo de Otimização para decisões estratégicas e táticas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos-Campus Sorocaba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção PPGPE-S, Sorocaba, 2017.
- MMA. *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. 2011. <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos.html>>. Acesso em: 21 de outubro de 2018.
- MUCELIN, C. A.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. *Sociedade & natureza*, SciELO Brasil, v. 20, n. 1, p. 111–124, 2008.
- NOHARA, J. J. et al. *GS-40-Resíduos sólidos: passivo ambiental e reciclagem de pneus*. Tese (Doutorado) — Thesis, São Paulo, ano I, 2006.
- PELLEGRINI, M.; DIAS, A. M.; GRINBERG, K. *Coleção Novo Olhar: História - Volume 2*. [S.l.]: São Paulo: Editora FDT, 2010.
- RECICLANIP. *Ciclo do pneu*. 2018. <<http://www.reciclanip.org.br/formas-de-destinacao/ciclo-do-pneu/>>. Acesso em: 28 de maio de 2019.
- RIBEIRO, T. F.; LIMA, S. do C. Coleta seletiva de lixo domiciliar-estudo de casos. *Caminhos de geografia*, v. 2, n. 2, 2000.
- SILVA, J. P. da; DAMO, J. Plano de negócios para implantação de uma usina recicladora de pneus. *INNOVARE*, v. 1, n. 1, 2016.
- STARK, F. S. Configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo. Universidade Federal de São Carlos, 2015.

ANEXO A – MODELO MULTIPERÍODO PARA PLANEJAMENTO DE REDES DE LOGÍSTICA REVERSA (MMPRLR)

O modelo escolhido como base para a realização desse trabalho foi proposto por Meneses (2017) e visa minimizar os custos totais da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil. A seguir estão descritos a notação utilizada no modelo, assim como o modelo em si.

Conjuntos

P : Ecopontos;

C : Centros intermediários;

D : Empresas de destinação final;

L : Tamanho dos centros intermediários;

T : Períodos de tempo;

B : Tipos de veículos;

Índice

i, j : Nós da rede;

l : Tamanho das instalações, com $l \in L$;

t : Períodos de tempo, com $t \in T$;

b : Tipo de veículos de transporte, com $b \in B$;

Parâmetros

g_{it} Quantidade de pneus descartados no ecoponto i no período t ;

d_j Capacidade de processamento no centro de destinação final j (ton.);

U_b Capacidade de transporte de pneus inteiros no veículo tipo b (ton.);

U'_b Capacidade de transporte de pneus triturados no veículo tipo b (ton.);

qr_l Cap. de triagem de pneus em um centro intermediário de tamanho l (ton.);

qp_l Capacidade de trituração de um centro intermediário de tamanho l (ton.);

- qe_l Capacidade de estoque de um centro intermediário de tamanho l (ton.);
- 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;
- ci_l Custo de instalação de um centro intermediário de tamanho l ;
- cs Custo de triagem por tonelada de pneus nos centros intermediários;
- cp Custo trituração por tonelada de 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 1 tonelada de pneus servíveis no mercado de 2ª mão;
- ra Preço de venda de 1 tonelada de aço obtido após trituração;
- rp_j Preço de venda de pneu inteiro para a empresa de destino final j ;
- rp'_j Preço de venda de pneu triturado para a empresa de destino final j ;
- β Penalização unitária por não cumprimento da meta;
- M Meta para a quantidade de pneus a serem coletados (ton.) ;

Variáveis de decisão

- X_{ijt} Quantia de pneus inteiros transportados no arco (i, j) no período t ;
- X'_{ijt} Quantia de pneus triturados transportados no arco (i, j) no período t ;
- I_{jt} Quantia de pneus inteiros em estoque no nó $j \in C$, ao final do período t ;
- I'_{jt} Quantia de pneus triturados em estoque no nó $j \in C$, ao final do período t ;
- Y_{jt} Quantia de pneus a serem triturados no nó $j \in C$ no período t ;
- S_{jt} Quantia de pneus servíveis a comercializar no nó j no período t ;
- G Quantia de pneus faltantes por destinar para atingir a meta estabelecida (ton.);

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 (F.O) do problema busca minimizar os custos totais do processo e a renda obtida no processo de rede reversa.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [P \cup C]} \sum_{j \in [C \cup D], i \neq j} \sum_{b \in B} (cv_{bij} F_{bijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{b \in B} (cv'_{bij} F'_{bijt}) \right\} + \sum_{j \in C} \sum_{l \in L} c_{il} Z_{jl} \\ + \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs X_{ijt} + \sum_{j \in C} (cp Y_{jt} + ce I_{jt} + ce' I'_{jt}) \right] + \beta G \\ - \sum_{t \in T} \left\{ rs S_{jt} + ra \sum_{j \in C} \alpha Y_{jt} + \sum_{i \in [P \cup C]} \sum_{j \in D} rp_j X_{ijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \end{aligned}$$

A restrição (A.1) garante o balanço de fluxo nos ecopontos (P), ou seja, a quantidade de pneus descartada no ecoponto i no período t (g_{it}) somada a quantidade de pneus em estoque do período anterior ($t - 1$) no ecoponto ($I_{i,t-1}$) tem de ser igual a quantidade de pneus transportados para os centros intermediários e para as empresas de destinação final ($\sum X_{ijt}$), mais os pneus nos estoques no período atual (I_{it})

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

A equação (A.2) garante a conservação do fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários (C), ou seja, a quantidade de pneus dos ecopontos ($\sum X_{ijt}$) mais o estoque de pneus do período anterior ($I_{j,t-1}$) devem ser iguais a quantidade de pneus servíveis que serão vendidos no mercado de segunda mão (S_{jt}), somada ao número de pneus inteiros inservíveis enviados para as empresas de destinação final ($\sum X_{jit}$), mais a quantidade de

pneus inteiros destinados a trituração no período atual (Y_{jt}), mais os estoques de pneus do período atual (I_{jt}).

$$\sum_{i \in P} X_{ijt} + I_{j,t-1} = S_{jt} + \sum_{i \in D} X_{jit} + Y_{jt} + I_{jt} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.2})$$

A restrição (A.3) assegura a conservação de fluxo dos pneus triturados nos centros intermediários (C), isto é, a quantia de pneus triturados no período atual (Y_{jt}) mais o estoque de pneus triturados no período anterior ($I'_{j,t-1}$) deve ser igual $\tilde{\Lambda}$ fração de aço obtida dos pneus triturados no período atual (αY_{jt}), mais a quantia de pneus triturados enviados para as empresas de destinação final ($\sum X'_{jit}$), mais a quantia de pneus triturados deixados em estoque no período atual (I'_{jt}).

$$Y_{jt} + I'_{j,t-1} = \alpha Y_{jt} + \sum_{i \in D} X'_{jit} + I'_{jt} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.3})$$

A restrição (A.4) limita a quantidade de pneus que podem ser considerados para comercialização no mercado de segunda mão, enquanto que a equação (A.5) limita a quantia de pneus que podem ser recebidos e triturados em cada centro em cada período de tempo. Em relação $\tilde{\Lambda}$ s restrições (A.6) e (A.7), a primeira limita a quantia de pneus que podem ser triturados nos centros intermediários em cada período de tempo, enquanto que a segunda limita a quantia de pneus inteiros e triturados que podem ser estocados nos centros intermediários. As três últimas restrições dependem diretamente da variável binária Z_{jl} que determina se um centro intermediário de tamanho l será aberto no nó j ou não.

$$S_{jt} \leq \sigma \sum_{i \in P} X_{ijt} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.4})$$

$$\sum_{i \in P} X_{ijt} \leq \sum_{l \in L} qr_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.5})$$

$$Y_{jt} \leq \sum_{l \in L} qp_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.6})$$

$$vp I_{jt} + vp' I'_{jt} \leq \sum_{l \in L} qe_l Z_{jl} \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.7})$$

A condição (A.8) garante que a capacidade das empresas de destinação final seja respeitada, enquanto a (A.9) garante que um único centro intermediário pode ser aberto

nos pontos candidatos. O que garante que a quantia de pneus destinados seja no mínimo igual a meta estabelecida é a restrição (A.10). As restrições (A.11) e (A.12) associam a quantia de pneus inteiros e triturados, respectivamente, com a quantidade de veículos usados para tal transporte, levando em conta a capacidade de cada tipo de veículo.

$$\sum_{i \in [P \cup C]} X_{ijt} + \sum_{i \in C} X'_{ijt} \leq d_j \quad j \in D; t \in T. \quad (\text{A.8})$$

$$\sum_{l \in L} Z_{jl} \leq 1 \quad j \in C. \quad (\text{A.9})$$

$$\sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [P \cup C]} \sum_{j \in D} X_{ijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} X'_{ijt} + \alpha \sum_{j \in C} Y_{jt} \right\} + G \geq M. \quad (\text{A.10})$$

$$X_{ijt} \leq \sum_{b \in B} U_b F_{bijt} \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; i \neq j; t \in T. \quad (\text{A.11})$$

$$X'_{ijt} \leq \sum_{b \in B} U'_b F'_{bijt} \quad i \in C; j \in D; t \in T. \quad (\text{A.12})$$

Por fim, as restrições (A.13), (A.14), (A.25), (A.16), (A.17), (A.18), (A.19), (A.20) e (A.21) tratam do domínio das variáveis.

$$G \geq 0 \quad (\text{A.13})$$

$$X'_{ijt} \geq 0 \quad i \in C; j \in D; t \in T. \quad (\text{A.14})$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad j \in [P \cup C]; t \in T. \quad (\text{A.15})$$

$$I'_{jt} \geq 0 \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.16})$$

$$X_{ijt} \geq 0 \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; t \in T; i \neq j. \quad (\text{A.17})$$

$$Z_{jl} \in \{0, 1\} \quad j \in C; l \in L. \quad (\text{A.18})$$

$$S_{jt} \geq 0 \quad j \in C; t \in T. \quad (\text{A.19})$$

$$F_{bijt} \in Z^+ \quad i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; b \in B; t \in T; i \neq j. \quad (\text{A.20})$$

$$F'_{bijt} \in Z^+ \quad i \in C; j \in D; b \in B; t \in T. \quad (\text{A.21})$$

ANEXO B – DADOS REAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Os dados utilizados para a realização deste trabalho foram retirados da dissertação de mestrado do Meneses (2017). Abaixo serão descritos os elementos usados para a realização dos testes computacionais:

- **Capacidades de triagem, trituração e estoque dos centros intermediários (ton.).**

Tabela 21 – Capacidade dos centros intermediários

Tamanho CI	Trituração mensal	Triagem mensal	Estoque mensal
Pequeno	300	375	75
Médio	600	750	150
Grande	900	1125	225

Fonte: (MENESES, 2017)

- **Capacidade dos veículos de carga:**

Tabela 22 – Capacidade de transporte de pneus inteiros e triturados.

Tipo de veículo de carga	Cap. Transp. Pneus inteiros	Cap. Transp. Pneus triturados
Único	11 ton.	40 ton.

Fonte: (MENESES, 2017)

- **Penalização:** Não existe um valor específico para a multa a empresas que não cumprem com as leis e normas de coleta de pneus, já que essa multa depende de algumas variáveis como o porte da indústria que não cumpriu a meta e também a quantia de pneus faltantes para o seu cumprimento. Assim, o valor da multa varia, cabendo ao fiscal determinar a quantia cabível a ser paga. Deste modo, através do relatório do IBAMA (2016), o qual contém a quantia de pneus pendentes no ano de 2015 que foi de 18.360,61 toneladas e também o valor da multa aplicadas à cinco empresas somando o total de R\$ 25.086.000,00, considerou-se que a penalização pelo não cumprimento da meta de coleta é de R\$6.900 por tonelada pendente (valor médio).

- **Custos de abertura:**

Tabela 23 – Custos de abertura dos centros intermediários.

Tamanho CI	Custo de abertura (BRL)
Pequeno	125.000
Médio	250.000
Grande	375.000

Fonte: (MENESES, 2017)

- **Custos de operação:**

Tabela 24 – Custos de operação nos centros intermediários.

	Valor R\$/ton.
Custo de Triagem	12,50
Custo de Trituração	25,00
Custo de estocagem de pneus inteiros	7,50
Custo de estocagem de pneus triturados	1,87

Fonte: (MENESES, 2017)

- **Custo de transporte:** Para se calcular os custos de cada uma das rotas utilizou-se da mesma fonte da dissertação do Menezes (2017), *Índice Nacional de Custo do Transporte Carga Lotação / INCT-L*, disponível no site WEB: <http://www.ntctec.org.br/>. Abaixo segue tabela com os valores base dos custos de transporte correlacionados à distância por tonelada:

Tabela 25 – Custo de transporte de carga por tonelada.

PERCURSO	DISTÂNCIA (km)	R\$/ton.
Muito curto	50	72.88
Curto	400	133.39
Médio	800	205.33
Longo	2400	476.79
Muito Longo	6000	1075.37

Fonte: (MENESES, 2017)

- Custos de destinação de pneus:

Tabela 26 – Custo de destinação de pneus.

Empresa de dest. final	Custo de destinação (R\$)		Cap. anual (ton.)	Cap. Bimestral (ton.)
	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	2.431,17
D7	50,83	0	15.725	2.620,83
D8	50,83	0	5.794	799,00
D9	50,83	0	4.794	343,67
D10	50,83	0	2.062	895,00
D11	50,83	0	5.37	79,83
D12	203,31	Não se aplica	479	327,67
D13	50,83	0	1.966	143,83
D14	50,83	0	863	119,83
D15	50,83	0	719	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

Fonte: (MENESES, 2017)

- Renda de produtos:

Tabela 27 – Valor de venda de aço e dos pneus servíveis.

Tipo pneu	Renda pneus servíveis (R\$/t.)	Renda de aço (R\$/t.)
1	1525	300
2	4468	300
3	945	300
4	3568	300

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

- Porcentagem de aço em cada tipo de pneu:

Tabela 28 – Porcentagem aço de cada tipo de pneu.

Categoria pneu	Porcentagem aço de um pneu
1	7%
2	20%
3	4%
4	10%

Fonte: Desenvolvido pela autora (2019).

- **Meta estabelecida:**

Tabela 29 – Metas de destinação de pneus.

Meta estabelecida no Brasil em 2015		560.337,64 t.
Meta utilizada nesse estudo	1°	137.380 t.
	2°	153.385 t.
	3°	131.088 t.

Fonte: (MENESES, 2017).

- **Volume dos pneus:** Os veículos utilizados pela ANIP transportam quatro vezes mais toneladas de pneus triturados do que quando estes estão inteiros. Considerou-se que uma tonelada de pneus triturados, ocupa um quarto do volume de uma tonelada de pneus inteiros.

- **Localização:**

Tabela 30 – Localização dos ecopontos.

Ecop.	Município	Localização	
		Lat.	Long.
1	Adamantina	-21.6761	-51.0663
2	Agudos	-22.4684	-48.988
3	Altinópolis	-21.0155	-47.3997
4	Alvares Machado	-22.0797	-51.4687
5	Americana	-22.736	-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	-21.215	-50.4557
16	Araçatuba	-21.193	-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	-47.391
22	Araras	-22.3604	-47.3886
23	Araras	-22.3568	-47.3927
24	Arealva	-22.0315	-48.914
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	-49.032
53	Bebedouro	-20.9395	-48.4643
54	Birigui	-21.2931	-50.3525
55	Birigui	-21.295	-50.3435
56	Birigui	-21.2916	-50.3283
57	Bocaina	-22.14	-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	-46.605
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	-46.85
100	Fernandópolis	-20.2629	-50.235
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	-20.533	-47.4092
106	Francisco Morato	-23.283	-46.7473
107	Francisco Morato	-23.2947	-46.752
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	-23.332	-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	-22.816	-45.2018
117	Guaratinguetá	-22.8151	-45.1981
118	Guaratinguetá	-22.7922	-45.2037
119	Guaratinguetá	-22.8195	-45.1961

120	Guareí	-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	-51.344
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	Itapecerica da Serra	-23.7126	-46.8528
144	Itapecerica da Serra	-23.688	-46.8618
145	Itapecerica da Serra	-23.6909	-46.8631
146	Itapecerica da Serra	-23.6895	-46.8559
147	Itapetininga	-23.5976	-48.0397
148	Itapetininga	-23.5689	-48.0305
149	Itapeva	-23.982	-48.9172
150	Itapevi	-23.5422	-46.9351
151	Itapevi	-23.5479	-46.942
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	-24.108	-49.3442
157	Itatiba	-23.0026	-46.844
158	Itatinga	-23.0957	-48.6202
159	Itu	-23.2556	-47.3234
160	Itu	-23.2608	-47.2957
161	Jaboticabal	-21.2593	-48.313
162	Jaboticabal	-21.2599	-48.3134
163	Jacareí	-23.2977	-45.9673
164	Jacareí	-23.2632	-45.956
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	-49.663
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	-47.381
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	-46.604
188	Manduri	-23.0017	-49.3303
189	Marília	-22.2104	-49.9517
190	Marília	-22.2281	-49.929
191	Marília	-22.2255	-49.9625
192	Marília	-22.2264	-49.924
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	-23.539	-46.228
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	-49.7
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	-20.865	-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	-49.868
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 DâOeste	-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	-20.064	-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	-49.375
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	-48.665
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	-23.714	-46.3973
267	Ribeirão Pires	-23.6785	-46.422
268	Ribeirão Preto	-21.1603	-47.7943
269	Ribeirão Preto	-21.1841	-47.7994
270	Ribeirão Preto	-21.175	-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	-22.581	-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 DâOeste	-22.7567	-47.4074
285	Santa Bárbara DâOeste	-22.7234	-47.4239
286	Santa Clara dâOeste	-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	-23.637	-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	-23.623	-46.5607
314	São Carlos	-22.033	-47.8835
315	São Carlos	-22.0078	-47.891
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	-45.886
328	São José dos Campos	-23.2613	-45.871
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	-46.685
341	São Paulo	-23.5284	-46.6838
342	São Paulo	-23.5813	-46.7119
343	São Paulo	-23.6359	-46.713
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	-47.998
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	-47.266
376	Sumaré	-22.817	-47.2763
377	Sumaré	-22.8356	-47.2628
378	Sumaré	-22.817	-47.2763
379	Suzano	-23.5477	-46.3071
380	Suzano	-23.5503	-46.3072
381	Suzano	-23.504	-46.3082
382	Suzano	-23.5285	-46.319
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	-23.027	-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	-50.884
398	Tupã	-21.9201	-50.5203
399	Tupi Paulista	-21.388	-51.5737
400	União Paulista	-20.8877	-49.895
401	Urânia	-20.2469	-50.6443

402	Urupês	-21.2037	-49.2936
403	Valinhos	-22.9594	-47.0173
404	Valinhos	-22.963	-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

Fonte: (MENESES, 2017)

Tabela 31 – Locais candidatos a intalação de centros intermediários.

C.I.	Capital Região Adm.	Localização	
		Lat.	Long.
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	Jundiaí	-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

Fonte: (MENESES, 2017).

Tabela 32 – Localização das empresas de destinação final.

Notação	Nome Empresa	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 Materias Ltda.	-20.6202648	-49.6615293
D16	Barão Comércio de Pneus Ltda.	-22.3751732	-46.923133
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

Fonte: (MENESES, 2017).

- Pneus descartados nos ecopontos:

Tabela 33 – Quantidade (ton.) de pneus descartados consideradas.

Pneus descartados 2015 Brasil	518.924,36
Quantidade 1	133.882
Quantidade 2	148.328
Quantidade 3	127.550

Fonte: Adaptado de (IBAMA, 2016)

Tabela 34 – Fator de variação para a distribuição dos pneus nos ecopontos.

Localidades	Ecopontos	Frota 2015
Adamantina	1	24839
Agudos	1	18770
Altinópolis	1	8673
Álvares Machado	1	13209
Americana	4	166462
Américo Brasiliense	1	22455
Andradina	1	40370
Angatuba	1	11379
Araraquara	4	167855
Araras	3	92277
Araçatuba	5	159204
Arealva	1	3813
Arujá	1	51549
Assis	1	71832
Atibaia	3	101801
Avanhandava	1	5208
Avaré	1	57248
Bálsamo	1	5421
Bariri	1	22813
Barra Bonita	2	27013
Barretos	5	84483
Barueri	6	162118
Bastos	1	14295
Bauru	5	263304
Bebedouro	1	57614
Birigui	3	91142
Bocaina	1	6392
Boituva	1	37668
Borborema	1	9262
Botucatu	2	90193
Braganãsa Paulista	2	114782
Brotas	1	14500
Buritama	1	10036
Cachoeira Paulista	1	14450
Cajobi	1	4904

Cajuru	1	13264
Campinas	3	857029
Capivari	1	32520
Caraguatatuba	3	57851
Carapicuíba	3	176988
Catanduva	2	99963
Cerqueira César	1	10292
Conchal	1	15827
Conchas	1	9270
Cordeirópolis	1	14922
Cosmópolis	1	36650
Cosmorama	1	4959
Cotia	5	129528
Cubatão	1	53491
Diadema	2	193533
Dracena	1	32990
Duartina	1	6794
Embu	3	104936
Fernandópolis	1	53894
Ferraz de Vasconcelos	1	63860
Franca	4	239025
Francisco Morato	2	42287
Franco da Rocha	4	48757
Garça	1	26567
Guaíra	1	25921
Guararapes	1	20042
Guaratinguetá	4	65536
Guaraçai	1	5083
Guareí	1	5055
Guariba	1	18695
Guarujá	1	127288
Guarulhos	7	618976
Herculândia	1	4377
Iaras	1	1613
Ibaté	1	16302
Ibirá	1	6157
Ibitinga	1	37018
Igaraçu do Tietê	1	11529
Ilha Solteira	1	16789
Indaiatuba	3	169345
Irapuru	1	2995
Itaí	1	11859
Itajobi	1	10216
Itapeçerica da Serra	4	71458
Itapetininga	2	88377
Itapeva	1	54634
Itapevi	3	87178

Itapira	1	51375
Itápolis	1	29332
Itaquaquetuba	1	106547
Itararé	1	21529
Itatiba	1	75518
Itatinga	1	7821
Itu	2	114206
Jaboticabal	2	53259
Jacaréí	3	124024
Jaguariúna	1	36707
Jales	2	41411
Jandira	3	50943
Jaú	3	96824
José Bonifácio	1	25451
Jundiaí	2	302775
Junqueirópolis	1	11345
Leme	1	64339
Lençóis Paulista	1	42321
Limeira	3	199644
Louveira	1	26142
Lucélia	1	11280
Macatuba	1	9505
Mairiporã	1	48572
Manduri	1	5601
Marília	4	152482
Martinópolis	1	12339
Matão	1	61256
Mauá	2	202327
Mirandópolis	1	16453
Mirante do Paranapanema	1	7597
Mogi das Cruzes	2	218535
Mogi Guaçu	3	103637
Mogi Mirim	3	67004
Monte Alto	1	37447
Monte Aprazível	2	15160
Monte Castelo	1	2024
Monte Mor	1	25827
Nova Europa	1	4817
Nova Granada	1	11902
Nova Independência	1	1477
Nova Luzitânia	1	1564
Nova Odessa	1	39673
Olímpia	1	34831
Osasco	4	403787
Osvaldo Cruz	1	21781
Ourinhos	3	69933
Ouroeste	1	5196

Pacaembu	1	6429
Palmeira d'Oeste	1	6454
Palmital	1	13508
Panorama	1	8403
Paraguaçu Paulista	1	27127
Paraíso	1	3725
Parapuã	1	5527
Paulínia	1	68678
Pederneiras	1	28785
Penápolis	1	46247
Pereira Barreto	1	15028
Piacatu	1	2712
Piedade	1	30880
Pindamonhangaba	2	83230
Piracicaba	4	284544
Piraju	1	17900
Pirangi	1	6925
Pirassununga	1	53002
Pitangueiras	1	18330
Poá	2	48524
Pompéia	1	12364
Pontalinda	1	1561
Porto Feliz	1	29843
Praia Grande	1	125362
Pratânia	1	2765
Presidente Epitácio	1	25860
Presidente Prudente	4	156862
Presidente Venceslau	1	25669
Promissão	1	22684
Regente Feijó	1	10935
Ribeirão dos Índios	1	1095
Ribeirão Pires	2	64514
Ribeirão Preto	7	498066
Rinópolis	1	5672
Rio Claro	3	155523
Rosana	1	8373
Sales Oliveira	1	6403
Salto	2	67827
Santa Adélia	1	10077
Santa Bárbara d'Oeste	2	132749
Santa Clara d'Oeste	1	1118
Santa Cruz do Rio Pardo	1	30501
Santa Fé do Sul	1	23170
Santa Gertrudes	1	14558
Santa Isabel	1	25991
Santa Mercedes	1	1363
Santana de Parnaíba	1	75411

Santo Anastácio	1	12551
Santo André	4	500585
Santos	6	271390
São Bernardo do Campo	4	567178
São Caetano do Sul	6	139063
São Carlos	4	167621
São Joaquim da Barra	1	32842
São José do Rio Preto	7	361933
São José dos Campos	3	405042
São Manuel	1	25020
São Miguel Arcanjo	1	14719
São Paulo	29	7590181
São Pedro	1	22417
São Roque	1	44298
São Vicente	1	129386
Sarapuí	1	5284
Sertãozinho	3	82738
Severínia	1	7522
Sorocaba	7	440444
Sumaré	4	147333
Suzano	4	120175
Tabatinga	1	8960
Taboão da Serra	2	121138
Tanabi	1	15709
Taquaritinga	2	35908
Taquarituba	1	13096
Tatuí	2	76307
Taubaté	2	199951
Teodoro Sampaio	1	10515
Tietê	1	25522
Torrinha	1	6632
Três Fronteiras	1	3397
Tupã	1	50021
Tupi Paulista	1	9094
União Paulista	1	1013
Urânia	1	6119
Urupês	1	8855
Valinhos	2	90860
Valparaíso	1	10702
Vargem Grande Paulista	1	26644
Várzea Paulista	1	60817
Vinhedo	1	59144
Viradouro	1	10539
Votorantim	2	62592
Votuporanga	1	78179

APÊNDICE A – INSTÂNCIA ILUSTRATIVA

- Localização dos nós da rede

Tabela 35 – Localização dos 20 ecopontos.

Ecop.	Município	Localização	
		Lat.	Long.
1	Americana	-22.7453	-47.3572
2	Araraquara	-21.7793	-48.1711
3	Bauru	-22.3294	-49.032
4	Campinas	-22.8766	-47.0448
5	Carapicuíba	-23.5624	-46.8353
6	Franca	-20.5424	-47.4219
7	Guarulhos	-23.4707	-46.4803
8	Indaiatuba	-23.1013	-47.1975
9	Limeira	-22.5551	-47.381
10	Osasco	-23.5649	-46.7923
11	Piracicaba	-22.6827	-47.6833
12	Ribeirão Preto	-21.1841	-47.7994
13	Santo André	-23.6814	-46.4892
14	Santos	-23.9489	-46.3256
15	São Bernardo do Campo	-23.7485	-46.5883
16	São Carlos	-22.0078	-47.891
17	São José do Rio Preto	-20.8234	-49.4019
18	São José dos Campos	-23.1991	-45.886
19	São Paulo	-23.6359	-46.713
20	Sorocaba	-23.5117	-47.4941

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017)

Tabela 36 – Candidatos a instalação de centros intermediários.

C.I.	Capital Região Adm.	Localização	
		Lat.	Long.
C1	Araçatuba	-21.198786	-50.461192
C2	Bauru	-22.287857	-49.090549
C3	Campinas	-22.895125	-47.030261
C4	Franca	-20.593752	-47.424168
C5	Registro	-22.39605	-47.566034
C6	Santos	-21.96592	-46.79606
C7	São José do Rio Preto	-23.189506	-45.863013
C8	São José dos Campos	-23.682412	-46.595299
C9	Sorocaba	-23.469915	-47.436631
C10	São Paulo	-23.54	-46.63

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017)

Tabela 37 – Localização das empresas de destinação final.

Notação	Nome Empresa	Lat.	Long.
D1	Roseli Fialho de Lana Emerich - Me.	-21.1756604	-50.4724232
D2	Borcol Indústria de Borracha Ltda.	-23.411055	-47.3890217
D3	Torre Engenharia e Pesquisa Tecnológica Ltda.	-23.694821	-46.4669907
D4	Interag Reciclagem de Pneus e Comércio de Peças EM	23.500481	-47.4625007

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017)

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

Tabela 38 – Capacidade dos centros intermediários.

Tamanho CI	Trituração mensal	Triagem mensal	Estoque mensal
Pequeno	300	375	75
Grande	900	1125	225

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017)

- Custos de abertura:

Tabela 39 – Custos de abertura dos centros intermediários pequenos e grandes.

Tamanho CI	Custo de abertura (BRL)
Pequeno	125.000
Grande	375.000

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017).

- Custos de destinação de pneus:

Tabela 40 – Custo de destinação de pneus nas empresas de processamento.

Empresa de dest. final	Custo de destinação (BRL)		Cap. anual (t.)	Cap. Bimestral (t.)
	Pneus inteiros	Pneus triturados		
D1	50.83	0	3.787	631,17
D2	50.83	0	5.37	79,83
D3	117.7	18	336	56,00
D4	203.31	Não se aplica	23.731	3.955,17

Fonte: Adaptado de (MENESES, 2017).