

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

Felipe Sanches Stark

Mestrando em Engenharia de Produção do PPGEP-S (UFSCar)
Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba
Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Itinga CEP 18052-780 - Sorocaba, SP - Brasil
lpestar@hotmail.com

Eli Angela Vitor Toso

Professora adjunta do Dep. Eng. De Produção UFSCar campus Sorocaba.
Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba
Rodovia João Leme dos Santos, Km 110 - SP-264, Itinga CEP 18052-780 - Sorocaba, SP - Brasil
eli@ufscar.br

RESUMO

A crescente preocupação com questões ambientais, a busca pela sustentabilidade e as pressões legais fizeram com que os produtores sejam responsáveis pelos resíduos gerados durante a produção e pelos produtos no fim de suas vidas úteis. Um dos resíduos tratados por legislações internacionais e nacionais é o chamado pneu inservível. No Brasil, as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecem metas a serem cumpridas através da implantação da Logística Reversa (LR) de pneus. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo da configuração da rede logística reversa dos pneumáticos no Estado de São Paulo utilizando modelos de programação matemática para representar as decisões envolvidas na localização de instalações para coleta, processamento, determinação de capacidade e fluxo de material.

PALAVRAS-CHAVE: Logística reversa, modelos para configuração de rede logística e pneus inservíveis.

Área Principal: L&T - Logística e Transportes.

ABSTRACT

The growing concern about environmental issues, the search for sustainability and legal pressures have meant that producers are responsible for the waste generated during production and the end-of-life product. One of the wastes treated by international and national laws is called waste tire. In Brazil, the resolutions of the National Environmental Council (CONAMA) and the National Solid Waste Policy (PNRS) establish goals to be achieved through the implementation of Reverse Logistics (LR). In this context, the objective of this work is to study the reverse logistics network of tires in the state of São Paulo through mathematical programming models to represent the decisions like location of facilities for collection, processing, capacity and material flow.

KEYWORDS: Reverse Logistics, Network Design Models, Scrap Tyres.

Main Area: L&T - Logistics and Transport.

1. Introdução

A gestão dos resíduos sólidos tornou-se imprescindível devido aos problemas ambientais oriundos da crescente geração destes, como por exemplo, riscos no armazenamento, transporte e impactos negativos da incorreta disposição final no meio ambiente. O pneu inservível, ou seja, aquele que apresenta danos estruturais irreparáveis não permitindo a rodagem ou reforma, (Resolução CONAMA nº 416/09), é um destes resíduos que, quando mal gerenciado, ocasiona sérios riscos ambientais e de saúde pública, sendo assunto de legislações específicas em diversos países no mundo (LAGARINHOS, 2011)

Quanto aos problemas ambientais e de saúde pública, em aterros sanitários, os pneus inservíveis podem acumular gases provenientes da decomposição da matéria orgânica e consequentemente aflorarem na superfície, além de dificultarem a compactação ideal e deste modo diminuem a vida útil dos aterros (ADHIKRI, MAITI, 2000; MOTTA, 2008); em depósitos a céu aberto tornam-se criadouros de vetores de doenças, como o *Aedes Aegypti*, além de estarem sujeitos a incêndios geradores não somente de fumaça contendo substâncias tóxicas e cancerígenas (OLIVEIRA; CASTRO, 2007), como da liberação de óleo, representando ameaça ao solo e à água subterrânea (MOTTA, 2008).

Nas questões econômicas, além dos custos de transporte elevados devido ao grande volume (LAGARINHOS, 2011), a ampla distribuição geográfica dificulta a coleta dos pneus inservíveis (OLIVEIRA; CASTRO, 2007). Desta forma, os instrumentos legais transferiram a responsabilidade de gerenciamento dos produtos após o fim da vida útil para as empresas produtoras e importadoras de pneumáticos, através de um mecanismo conhecido como responsabilidade estendida do produtor (ou da sigla em inglês *EPR - Extended Producer Responsibility*), o que impacta nos custos da organização para efetuar essa destinação ambientalmente adequada.

Como consequência do *EPR*, foi criada no Brasil uma entidade sem fins lucrativos, chamada de Reciclanip, que é organizada pelas fabricantes de pneumáticos da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP). O objetivo da Reciclanip é coordenar as ações legais presentes nas Resoluções CONAMA (desde as nº 258/1999 e 301/2002, ambas revogadas pela nº 416/09) e PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos, que com força de Lei trouxe maior importância ao proposto nas resoluções do CONAMA). Os importadores, representados pela Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus (ABIDIP), também promovem ações de forma análoga, mas sem uma associação específica para a Logística Reversa - LR.

Acerca dos aspectos operacionais da LR dos pneus inservíveis, um dado importante coletado por Lagarinhos (2011) é que do total de pneus usados coletados no país, em média, 70% são inservíveis, 20% prestam-se a reforma e 10% podem ser reutilizados como pneus “meia-vida”. Como há uma heterogeneidade nos locais utilizados como pontos de coleta, pneus ainda em condição de uso/reforma podem ir para o descarte antes de estarem na condição de inservíveis, o que implica em perda de capital e contribui ainda mais para a exaustão de recursos naturais.

Outro ponto levantado, por Lagarinhos (2011), Viana (2008) e observados na Resolução CONAMA nº 416/09 e também observado no Relatório de Pneumáticos 2013 (IBAMA, 2013) é que as destinações podem estar muito distantes dos locais geradores e a capacidade instalada em um local nem sempre supre a demanda deste. No entanto, a Resolução CONAMA 416/09 sugere para a proximidade entre ponto de geração e local de destinação, para evitar a transferência do passivo ambiental para outra localidade (como no caso de fronteiras administrativas).

De acordo com Souza e D’Agosto (2013), os custos logísticos da cadeia reversa de pneus inservíveis podem chegar a 67% do custo total desde a coleta até destinação, portanto estudos sobre a configuração da rede logística reversa são relevantes para a redução de tais custos. Desta forma, o sistema logístico de recuperação dos pneus e da destinação destes é um caso interessante de estudo, pois inclui diversos elementos como pontos de coleta, empresas destinadoras, custos de transporte e de operação considerando o aspecto maior da redução dos impactos no meio ambiente e saúde humana.

Sendo assim, o objetivo deste estudo é a proposta de um modelo matemático com objetivo de minimização de custos da rede logística reversa de pneus, mas que contemple duas proposições com base nos levantamentos da literatura e legislação: (i) a abertura de centros de recepção atuantes como locais homogêneos de seleção dos pneus recebidos dos ecopontos e; (ii) a possibilidade de expansão do atual sistema. Como o estudo está em fase de desenvolvimento, foram realizados experimentos apenas com um recorte do problema total (Estado de São Paulo – Brasil) para a obtenção dos resultados e interpretação do modelo proposto, inclusive com apenas um período como horizonte de planejamento.

2. Configuração de Rede para a Logística Reversa

A Logística Reversa (LR) pode ser definida como o processo de movimentação de bens após o final de vida útil para destinação final, com o propósito de capturar valor ou prover correta disposição (ROGER, TIBBEN-LEMBKE, 1999). Segundo Knemeyer, Ponzurick e Logar (2002), a logística reversa incorpora uma cadeia de suprimentos redesenhada para gerir o fluxo de produtos ou partes destinadas para a remanufatura, reciclagem, disposição e o uso eficiente dos recursos, inclusive com a recuperação energética.

De acordo com Aksen, Aras e Karaarslan (2009), a LR apresenta um novo desafio em relação à logística tradicional, com características críticas com relação à quantidade e qualidade dos produtos retornados. Neste caso há maior incerteza quanto à taxa de geração dos produtos (com fatores como quebras, obsolescência e até sazonalidade) e também ao estado no qual chegaram até a destinação, ou seja, se são passíveis de remanufatura, reciclagem ou disposição.

Wang, Lai e Shi (2011) afirmam que o problema de se projetar uma rede de LR é um dos mais abrangentes na decisão estratégica e sua otimização é necessária para a eficiência de longo prazo em toda a cadeia de suprimentos. Fleischmann et al. (2000) relatam que a tarefa central da configuração de redes é a determinação do número e localização dos pontos de recuperação dos produtos, e não somente estes mas também dos intermediários que podem existir.

Os modelos de Zhang, Huang e He (2011) sobre gerenciamento de resíduos sólidos municipais com escolhas entre destinações e Alumur, Nickel, Saldanha-da-Gama e Verter (2012) para um planejamento multi-período da logística reversa fornecem detalhes sobre dois aspectos importantes do problema geral de uma rede de LR. O primeiro trata da escolha entre destinações, enquanto o segundo laborda o horizonte de planejamento com base na demanda variável ao longo do tempo, o que é importante considerando-se a natureza estratégica do problema.

Para o caso da LR dos pneus, o trabalho de De Figueiredo e Mayerle (2008) apresenta um modelo de *design* de uma rede e retrata uma relação entre a presença de centros de recepção dos recicladores e valores dados como incentivo aos coletores dos produtos, o caso aplicado é um programa Estadual, chamado “Paraná Rodando Limpo”. O modelo só considera produtos servíveis, para remanufatura, mas permite que os inservíveis sejam reciclados, para tanto, o custo deve incidir sobre as operações, neste caso o lucro é “negativo”, pois não é possível agregar valor ao produto disposto.

Lagarinhos (2011) investigou o impacto da legislação no ambiente nacional por meio de análise bibliográfica, dados de entrevistas e questionários. Com base nesta investigação, propôs uma reconfiguração da rede utilizando um algoritmo genético como heurística para a solução do problema.

Para este trabalho, os trabalhos mais relevantes, com relação aos aspectos de formulação do modelo, são de Alumur, Nickel, Saldanha-da-Gama e Verter (2012) e de Melkote e Daskin (2001). O primeiro trata-se de um modelo geral que permite diversas modificações e abrange os principais casos de destinação como remanufatura, reciclagem e reuso; já o segundo trata dos problemas de localização de facilidades, com foco no sistema logístico direto; ambos os modelos são inteiro mistos.

Além das características intrínsecas dos sistemas logísticos reversos, que dependem das políticas e relações existentes entre os agentes destes, a natureza combinatória deste tipo de problema de configuração de rede o torna *NP-Hard* para instâncias maiores de dados.

3. A Logística Reversa de pneus inservíveis no Brasil

No Brasil, a LR se inicia nos pontos de coleta, que englobam revendedores, borracheiros ou locais criados em parceria com o poder público, isto é, as prefeituras cedem o terreno e mão-de-obra, enquanto os produtores através da Reciclanip administram o recolhimento dos pneus e cobrem custos financeiros oriundos do transporte (RECICLANIP, 2013; LAGARINHOS, 2011).

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

Atualmente, a rede de logística reversa para a coleta de pneus inservíveis possui 1768 pontos de coleta (IBAMA, 2013). Esses pontos chamados de eco pontos, entretanto tais pontos são heterogêneos quanto à forma de operação, pois são formados por agentes diferentes (prefeituras e revendedores, por exemplo). Conforme observado por Lagarinhos (2011), alguns pontos podem ter seleção dos pneus usados e outros não.

A carga é enviada diretamente dos pontos de coleta para os pontos de destinação e tais empresas destinadoras pagam pela obtenção dos pneus (caso dos recicladores) ou podem receber para dar a destinação (caso do coprocessamento). Contudo podem ocorrer casos de pré-processamento em intermediários antes da destinação, por exemplo, para o coprocessamento em fornos de cimenteiras, os pneus podem estar inteiros (envio direto) ou triturados (envio indireto). A figura 1 apresenta a rede logística de pneus, mostrando os canais diretos e reversos. Esta figura possui como fontes de dados o Relatório de Pneumáticos 2012 e 2013 (IBAMA, 2012; IBAMA, 2013), dados fornecidos pela Reciclanip por e-mail e no trabalho de Lagarinhos (2011). Os compartimentos em verde são o foco deste estudo.

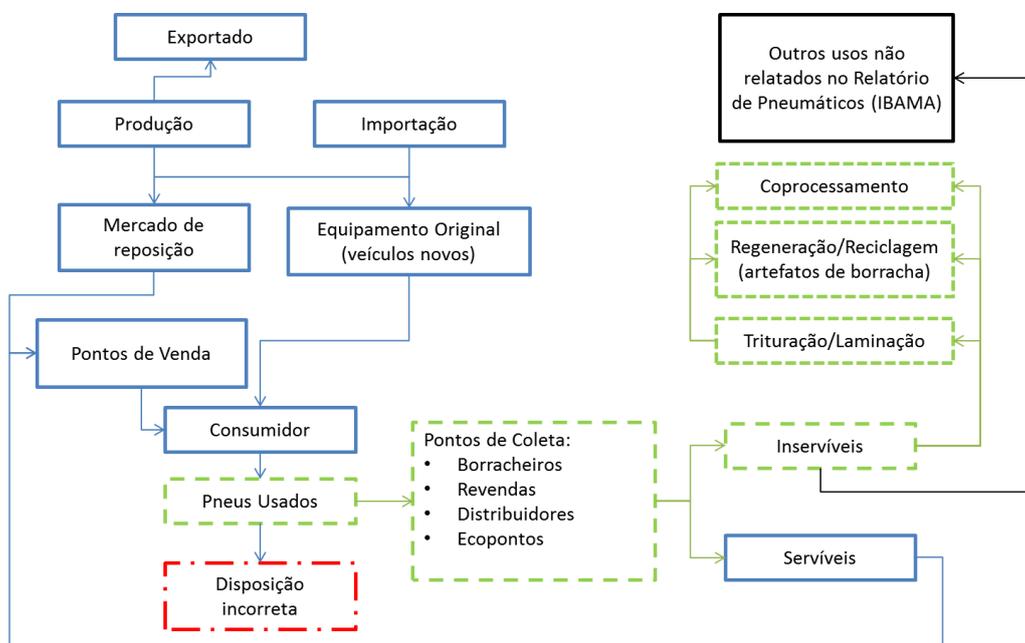


Figura 1. Rede logística dos pneumáticos.

4. Modelagem do problema

Na proposta inicial do modelo são considerados os fluxos brutos, em toneladas de pneus inservíveis, entre pontos de coleta (instalados), centros de recepção (propostos), intermediários (instalados e propostos) e empresas de destinação final (instalados e propostos); conforme a Figura 2. Cabe ressaltar que na rede atual não existem centros de recepção e estes pontos são

considerados no modelo para avaliar se, da mesma forma que na logística direta, a utilização de pontos de transbordo pode melhorar a eficiência da rede. Cada cor representa um nível da rede logística, seguindo a ordem anterior tem-se pontos de coleta (laranja), centros de recepção (azul), intermediários (vermelho), desinação temporária nos intermediários (roxo) e definitiva (verde)

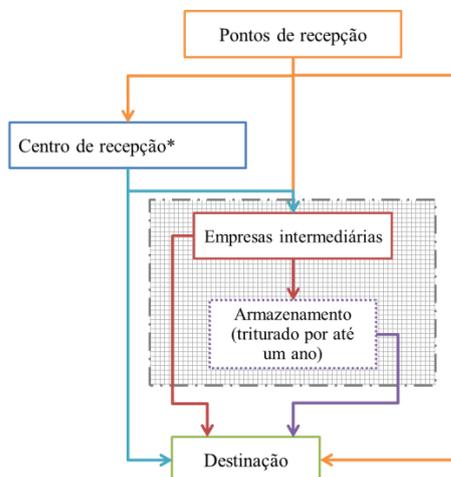


Figura 2. Fluxos presentes no sistema de logística reversa dos pneus inservíveis.

As empresas intermediárias são aquelas que trituram ou laminam os pneus. Geralmente os pneus triturados são encaminhados para o coprocessamento ou produção de subprodutos (pó para cimento asfáltico, por exemplo); enquanto na laminação, os pneus inservíveis tornam-se os artefatos de borracha (tapetes automotivos, por exemplo).

Desta forma, a empresa intermediária pode conter o passo final (destinação), podem enviar para outras formas de destinação (coprocessamento em fornos de cimenteiras) ou, depois da descaracterização dos pneumáticos, armazenarem o material resultante, que deverá ser destinado em até 1 (um) ano. Para a proposição de um modelo para configuração do problema são necessárias ainda as seguintes considerações:

- Os centros de recepção, intermediários (pré-processamento) e empresas de destinação final podem abrir em uma condição 1, ou seja, é necessário decidir a capacidade de abertura, que tem diferentes custos fixos e capacidade de processamento.
- O pré-processamento se refere à etapa de trituração. Nesta etapa há retirada do aço do pneu, especialmente quando a destinação não é o coprocessamento, o que confere a retirada de até 20% da massa transportada. No coprocessamento tanto o pneu inteiro quando o triturado é utilizado, portanto, se o fluxo for de algum intermediário para a destinação, haverá saída de 80% do total de entrada.

Os parâmetros e as variáveis do modelo misto linear-inteiro são:

Índices

$p \in \{1, \dots, PI\}$ conjunto dos pontos de coleta instalados.

$c \in \{1, \dots, LC\}$ conjunto dos candidatos para receber centros de recepção.

$i \in \{1, \dots, LI\}$ conjunto dos locais com candidatos a pontos intermediários.

$f \in \{1, \dots, LF\}$ conjunto dos locais em candidatos a destinação final.

$l \in \{1, \dots, CA\}$ conjunto das capacidades e custos de abertura.

Variáveis

U_{pc} : fluxo em toneladas do ponto de coleta p para o centro de recepção c .

V_{pi} : fluxo em toneladas do ponto de coleta p para o intermediário i .

X_{pf} : fluxo em toneladas do ponto de coleta p para a destinação final f .

Z_{ci} : fluxo em toneladas do centro de recepção c para o intermediário i .

W_{cf} : fluxo em toneladas do centro de recepção c para a destinação final f .

Y_{if} : fluxo em toneladas do intermediário i para a destinação final f .

E_i : quantidade estocada em toneladas no intermediário i .

M_{cl} : binário de abertura do centro c na condição l (1 se aberto e 0 caso contrário).

N_{il} : binário de abertura do intermediário i na condição l (1 se aberto e 0 caso contrário).

O_{fl} : binário de abertura da destinação final f na condição l (1 se aberto e 0 caso contrário).

Parâmetros

CM_p : custo monetário de manuseio no ponto p (por tonelada).

RM_c : renda de manuseio no centro de recepção (por tonelada).

CP_i : custo monetário de processamento no intermediário i (por tonelada).

CE_i : custo monetário de estoque no intermediário i (por tonelada).

CP_f : custo monetário de processamento na destinação final f (por tonelada).

CAC_{cl} : custo monetário fixo de abertura do centro de recepção c na condição l .

CAI_{il} : custo monetário fixo de abertura do intermediário i na condição l .

CAF_{fl} : custo monetário fixo de abertura da destinação final f na condição l .

$Ctrans$: custo de transporte (tonelada por quilometro).

$Ctrit$: custo de transporte do pneu triturado (tonelada por quilometro).

$cpen$: custo de penalização por tonelada não destinada em relação à meta estimada.

meta: valor da meta com base na fórmula da Instrução Normativa nº 1 de 2010 do IBAMA.

O modelo misto linear-inteiro proposto é:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} CM_p \times (U_{pc} + V_{pi} + X_{pf}) + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} RM_c \times (Z_{ci} + W_{cf}) \\
 & + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} CP_i \times (Y_{if}) + \sum_{i \in I} CE_i \times XE_i + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} CP_f \times (X_{pf} + W_{cf} + Y_{if}) \\
 & + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} M_{cl} \times CAC_{cl} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} N_{il} \times CAI_{il} + \sum_{f \in F} \sum_{l \in L} O_{fl} \times CAF_{fl} \\
 & + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} Ctrans \times (U_{pc} \cdot d_{pc}) + \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} Ctrans \times (V_{pi} \cdot d_{pi}) + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} Ctrans \\
 & \times (X_{pf} \cdot d_{pf}) + \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} Ctrans \times (Z_{ci} \cdot d_{ci}) + \sum_{f \in F} \sum_{c \in C} Ctrans \times (W_{cf} \cdot d_{cf}) \\
 & + \sum_{f \in F} \sum_{i \in I} Ctrit \times (Y_{if} \cdot d_{if}) + cpen \times (meta - \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{pf} - \sum_{c \in C} \sum_{f \in F} W_{cf} \\
 & - 1,25 \left(\sum_{i \in I} \sum_{f \in F} Y_{if} + \sum_{i \in I} E_i \right)
 \end{aligned}$$

Sujeito a

$$\sum_{c \in C} U_{pc} + \sum_{i \in I} V_{pi} + \sum_{f \in F} X_{pf} = cap_p \quad \forall p \in P \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{ci} + \sum_{f \in F} W_{cf} = \sum_{p \in P} U_{pc} \quad \forall c \in C \quad (2)$$

$$0.8 \times \left(\sum_{p \in P} V_{pi} + \sum_{c \in C} Z_{ci} \right) = E_i + \sum_{f \in F} Y_{if} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} U_{pc} \leq \sum_{l \in L} (cap_{cl} \times M_{cl}) \quad \forall c \in C \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} V_{pi} + \sum_{c \in C} Z_{ci} \leq \sum_{l \in L} (cap_{il} \times N_{il}) \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$XE_i \leq \sum_{l \in L} cap_{il} \times \sum_{l \in L} Y_{il} \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} X_{pf} + \sum_{c \in C} W_{cf} + \sum_{i \in I} Y_{if} \leq \sum_{l \in L} (cap_{fl} \times O_{fl}) \quad \forall f \in F \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} M_{cl} \leq 1 \quad \forall c \in C \quad (8)$$

$$\sum_{l \in L} N_{il} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{l \in L} O_{fl} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad (10)$$

$$U_{pc}, V_{pi}, X_{pf}, Z_{ci}, W_{cf}, Y_{if}, E_i \geq 0 \quad (11)$$

$$M_{cl}, N_{il}, O_{fl} \in B \quad (12)$$

A função objetivo trata da minimização dos custos de manuseio nos pontos de coleta e centros de recepção, custos de processamento nos intermediários e destinações finais, acrescidos dos custos fixos de abertura de centros, intermediários ou destinações em condições l e dos custos de transporte entre os elementos da rede logística reversa.

Há uma penalização por deixar quantidades sem a adequada destinação com relação à meta calculada pela fórmula da Instrução Normativa nº 1 de 2010 do IBAMA. A última parcela da penalização, referente aos intermediários (parcela enviada para destinação ou armazenada), é multiplicada por 1,25 para corrigir a perda da fração metálica separada durante o processo de trituração, mas que deve ser contabilizada.

A restrição (1) trata do fluxo de saída do ponto de coleta (p), para os outros elementos da rede, que deve ser menor ou igual à quantidade estimada de geração de material no ponto, ou seja, só há envio de pneumáticos usados até o máximo estimado da geração destes em cada ponto. A restrição (2) impõe que o fluxo do centro de recepção (c) para os intermediários ou as destinações finais deve ser igual ao fluxo de entrada proveniente dos pontos de coleta.

Ao chegar aos intermediários, o fluxo tem uma parcela que pode ser enviada para os locais de destinação e outra que pode ser estocada, a restrição (3) representa esta relação. Por tratar-se do processo de trituração, há a retirada da fração metálica do pneumático, deste modo apenas 80% da entrada no intermediário (i) tem saída para estoque ou destinações.

A restrição (4) garante que uma quantidade só pode ser enviada de um ponto de coleta (p) para um centro de recepção (c) caso este esteja aberto; e a esta deve ser menor ou igual à capacidade na condição de abertura (l). A restrição (5) é análoga, entretanto as quantidades enviadas são provenientes dos postos e centros. A restrição (6) determina que a quantidade estocada em um intermediário (i) seja sua capacidade na condição (l), somente se estiver aberto.

A restrição (7) limita a soma das quantidades enviadas dos postos de coleta (p), centros de recepção (c) e dos intermediários (i) que deve ser menor ou igual à capacidade da destinação final (f) se esta estiver aberta na condição l . As restrições (8), (9) e (10) limitam a quantidade aberta de centros, intermediários e destinações em apenas uma condição l , ou seja, não é possível

criar dois elementos do mesmo tipo em condições diferentes. A restrição (11) e (12) impõe as condições de não negatividade e de binariedade das variáveis de abertura.

O modelo contempla assim as principais decisões de localização com um conjunto finito de candidatas e da alocação entre os pontos de origem dos pneus inservíveis e demais agentes da rede logística. Não se considerou a perda de material nos centros, pois o modelo proposto abrange apenas um período para o horizonte de planejamento.

4. Experimentos computacionais – região administrativa de Sorocaba – SP

O teste com o modelo inicial contou com dados relativos aos pontos e empresas destinadoras na região administrativa de Sorocaba – SP, presentes no Relatório de Pneumáticos de 2012 (IBAMA, 2012) e de parâmetros secundários coletados em trabalhos sobre pneumáticos como o de Lagarinhos (2011), Souza e D’Agosto (2013) e Libera et al. (2012).

O mapa apresentado na Figura 3 mostra a região usada para o teste com os pontos de coleta e as destinadoras. O número no interior do indicador de pontos de coleta/empresas de destinação indica a quantidade presente na respectiva cidade (os marcadores não indicam a localização, apenas a presença ou não no município).



Figura 3. Região contendo os pontos reais do teste, modificado do mapa do Estado de São Paulo.

Os parâmetros utilizados para os experimentos são relativos aos custos fixos (abertura dos locais para processamento e dos locais de armazenamento dos pneus), custos de manuseio e transformação que dependem da quantidade, custos de transporte, capacidades de estocagem, manuseio e processamento e a geração potencial do resíduo por município. Apesar de haver índices indicando que cada centro possui uma renda de manuseio própria, assumiu-se valor igual para todos os centros em uma mesma condição.

As coordenadas geográficas dos pontos foram obtidas com a ferramenta *Google Maps*® e as distâncias calculadas com a Equação de Haversine. A fórmula de Haversine utiliza de relações trigonométricas e do diâmetro da Terra para estimar valores de distâncias percorridas na

superfície de uma grande esfera, entretanto, não leva em consideração malha rodoviária ou relevos regionais no cálculo. A fórmula (13) apresentada a seguir foi retirada do site da University of Texas Institute for Geophysics (IG, 2014).

Demais parâmetros foram retirados ou estimados a partir de dados dos trabalhos de Lagarinhos (2011), Libera et al. (2012), Relatório de Pneumáticos 2013 (IBAMA, 2013) e da Reciclanip (2013).

Tabela 1. Relação entre municípios e estimativa de geração com base na frota retirada do DENATRAN (Julho/2013) e pontos de coleta/intermediários e destinação conforme Relatório de Pneumático 2012 do IBAMA.

Demanda	Estimativa (ton./ano)	Pontos de coleta	Intermediário	Destinação
Itu	610,88	2	0	0
Porto Feliz	155,47	1	0	0
Salto	356,56	2	0	0
Salto de Pirapora	105,29	1	1	1
Sorocaba	2325,67	5	1	1
Tietê	135,36	2	0	0
Votorantim	321,37	1	0	0

As estimativas de demanda de atendimento foram estimadas pela quantidade total de veículos, conforme dados do levantamento do DENATRAN em Julho de 2013, pela quantidade total destinada em 2013. Deste modo a porcentagem de veículos em relação à frota nacional e destinação nacional resultaram em uma quantidade de toneladas gerada anualmente em cada um dos municípios. Utilizaram-se os seguintes critérios de possibilidades de abertura:

- Os centros podem abrir em uma única de duas condições de capacidade possíveis, com custos de instalação diferentes. Os locais candidatos são os pontos cadastrados no Relatório de Pneumáticos (IBAMA, 2103). Como os centros não necessitam de equipamentos especiais para a separação dos pneumáticos considerou-se o custo fixo do aluguel de um galpão e de funcionários em um turno apenas.
- Os intermediários já abertos tem custo de instalação zero e os candidatos são em locais diferentes dos centros de coletas (em coordenadas coletadas na região industrial de cada um dos municípios). As destinações são definidas analogamente, nos mesmos locais dos intermediários.
- Foram considerados um total de 14 candidatos para abertura dos centros de recepção (na coordenada dos respectivos pontos de coleta) e de 9 intermediários/destinações (sete coordenadas nas zonas industriais mais dois pontos já abertos).
- Estimaram-se valores da renda gerada no manuseio nos centros em testes começando em 5 u.m e com incrementos de 5 u.m verificou-se que a partir de 35 u.m houve abertura dos centros. Deste modo foram determinados dois cenários de análise do resultado sem e com a abertura dos centros, com 30 u.m e 35 u.m de renda de manuseio, respectivamente.

Para os experimentos utilizou-se a linguagem de programação matemática GAMS 24.2.1 e resolução com solver CPLEX, com todas as instâncias resolvidas em um computador portátil

com Intel® Core™ i7-3610QM e 8 Gb RAM. O *gap* relativo foi fixado como 10^{-5} , para que a solução obtida seja a mais próxima da otimalidade.

5. Resultados e Considerações

Com base nos parâmetros utilizados e com uma penalidade de 1000 unidades monetárias (no caso dos estudos pesquisados os valores estavam em Reais – R\$) por não cumprimento da meta estabelecida, obtiveram-se resultados distintos para os parâmetros de renda gerada, um no qual os centros não foram abertos ($RM = 30$) e outro no qual houve a abertura de três centros ($RM = 35$). Os tempos de execução foram 0,88 e 0,55 segundos, explicados pelo baixo número de variáveis discretas (64) e pelo uso da versão 64 bits do programa GAMS que possibilitou o uso de mais núcleos para processamento.

Os resultados para o teste com $RM = 30$ apresentaram custo total de 145.804,05 u.m e os fluxos demonstrados na Figura 4. Na Figura 4, os pontos de coleta são indicados por (p), os centros (c), os intermediários (i) e as destinações finais (f). Recordando que entre os níveis (i) e (f) há redução em 20% da quantidade de entrada em (i) devido à separação do aço.

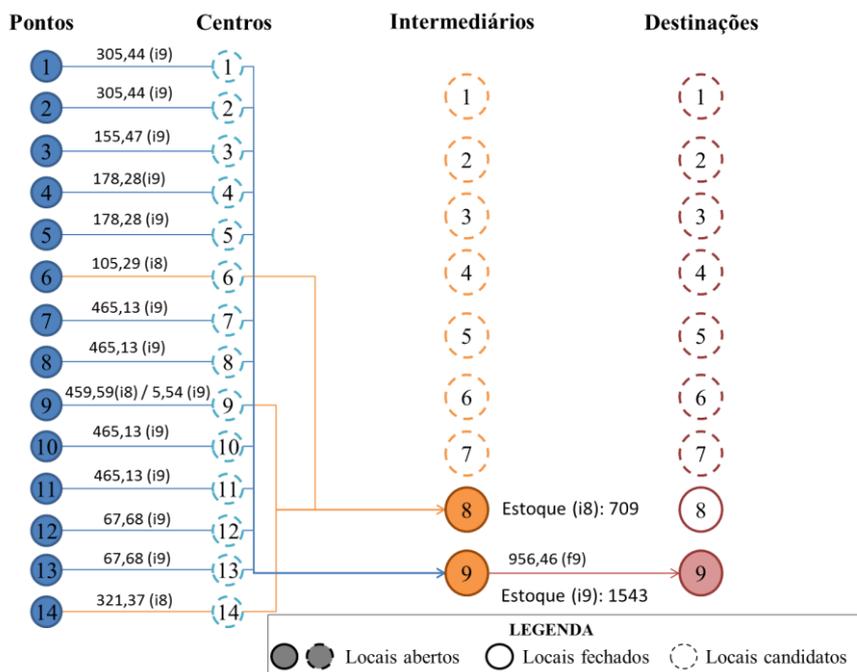


Figura 4. Fluxos da solução para o experimento sem centros de recepção abertos.

Note a não abertura de centros, pois estes não foram economicamente viáveis para uma renda de 30 u.m por tonelada. Também não foram abertos novos intermediários ou destinações, isto ocorreu principalmente pela alta capacidade das duas instalações presentes na região administrativa de Sorocaba – SP e também que a abertura de novas instalações implicaria em custos elevados se considerado horizonte de um ano do modelo. Somente as duas destinações, conforme o Relatório de Pneumáticos 2013 (IBAMA, 2013) deram destinação para 4,7% de todo o resíduo gerado no país, ou seja, 22.533 toneladas processadas, enquanto a demanda estimada das sete cidades foi de 4010, 58 toneladas. Por não estarem abertos os centros, esta solução pode ser vista como uma reconfiguração da rede atualmente presente na região utilizada como exemplo. Quando a renda gerada ocasionou abertura dos centros ($RM = 35$), o custo total foi de

142.653,81 u.m., representando uma redução em 2%. Os fluxos resultantes estão demonstrados na Figura 5.

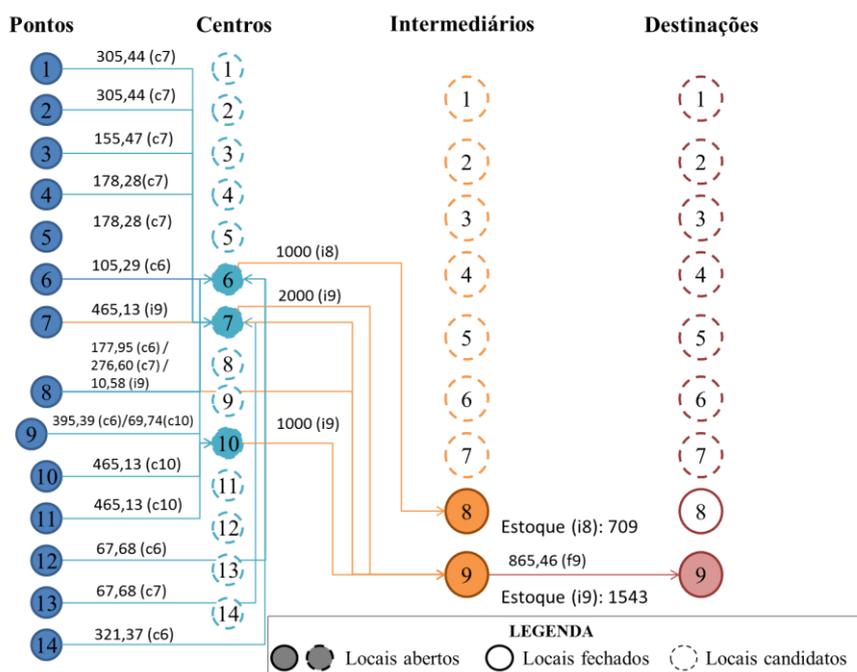


Figura 5. Fluxos da solução para o experimento com centros de recepção abertos.

O modelo se comportou conforme o esperado, contudo a coleta de dados primários pode fornecer resultados melhores para a interpretação de como a rede logística reversa poderia comportar a possibilidade da implantação de centros de recepção com a etapa de seleção. Neste teste, três centros foram abertos, inclusive o centro 7 – Sorocaba 1 (c7) que foi aberto na condição de maior capacidade, o que indica possibilidade dos centros atuarem na recepção das cargas de pneus usados gerados em diversos locais e prover uma seleção destes com critérios que garantam uma correta destinação dos pneus inservíveis e o prolongamento dos pneus ainda em condição de rodagem ou reforma.

6. Considerações para o desenvolvimento futuro do trabalho

Espera-se no desenvolvimento futuro do modelo três expansões, a *primeira* é transformá-lo para decisões em múltiplos períodos e a *segunda* é um consequência na qual haveria fluxos de retorno dos centros de recepção (parcela dos pneus servíveis em *meia-vida* e para reforma). A múltipla periodicidade também permitiria melhor tratamento dos estoques (pois estes devem ser destinados em algum momento e com apenas um período grandes quantidades são estocadas como destinação provisória) e da possível redução dos custos de instalação de intermediários e destinações. A *terceira* seria a concepção de uma programação por metas com outro objetivo que não somente e econômico, mas sim ambiental, como destinações preferíveis ou redução na emissão de gases pelo transporte dos pneus entre os pontos geradores e destinações. Para este caso a coleta de dados primários e do estabelecimento de indicadores para o sistema logístico reverso torna-se primordial.

7. Agradecimentos

Agradeço a CAPES pela bolsa vigente nos meses iniciais do projeto e ao apoio financeiro da bolsa concedida desde então através do Processo nº 2013/22784-3, Fundação de Amparo à

Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - “As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP”. Também agradeço ao Sr. César Faccio por informações respondidas por e-mail acerca da Reciclanip.

8. Referências

- Adhikri B. e Maiti S.** (2000). Reclamation and recycling of waste rubber, *Progress in Polymer Science*, 25, 909 – 948.
- Alumur S. A., Nickel S., Saldanha-da-Gama F. e Verter V.** (2012). Multi-period reverse logistics network design, *European Journal of Operational Research*, 220, 67 – 78.
- Brasil.** Congresso Nacional. Lei nº 12,305, 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, 12 de Fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 3 ago. 2010b.
- Brasil.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 416, 30 de Setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 1 out. 2009.
- De Figueiredo J. N e Mayerle S. F** (2008). Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput, *Transportation Research Part E*, 44, 731 – 752.
- Fleischmann M., Krikke H. R., Dekker R. e Flapper S. D. P.** (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery, *Omega*, 28, 653 – 666.
- IBAMA** (2013). Relatório de Pneumáticos 2012 e 2013.
- IG.** (2014). Calculate distance, bearing and more between two latitude/longitude points. (<http://www.ig.utexas.edu/outreach/googleearth/latlong.html>).
- Lagarinhos C. A. F** (2011). Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa, *Tese de Doutorado*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 291 p.
- Libera, F. V. D. et al** (2012). Parâmetros operacionais para implantação de uma recicladora de pneus inservíveis em Santa Maria – RS, *Rev. Elet. Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 6, 1049 – 1065.
- Melkote S. e Daskin M. S.** (2001). Capacitated facility location/network design problems, *European Journal of Operational Research*, 129, 481 – 495.
- Motta F. G. A.** (2008). A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico, *Ambiente & Sociedade*, 17, 608 – 615.
- Oliveira O. J. e Castro R.** (2007). Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil, Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Disponível em (www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0291.pdf)
- Reciclanip** (2013). Pontos de Coleta de Pneus. (www.reciclanip.com.br)
- Souza C. D. e D'Agosto M. A.** (2013). Análise dos Custos Logísticos Aplicada à Cadeia Logística Reversa do Pneu Inservível, *Transportes*, 21, 38 – 47.
- Viana L. O.** (2008). A logística reversa e o tratamento de pneus inservíveis no Estado do Piauí, *Dissertação de Mestrado*, Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 159 f.
- Wang F., Lai X. e Shi N.** (2011). A multi-objective optimization for green supply chain network design, *Decision Support Systems*, 51, 262 – 269.
- Zhang Y. M., Huang G. H. e He L.** (2011). Na inexact reverse logistics for municipal solid waste management systems, *Journal of Environmental Management*, 92, 522 – 530.