



MODELO PARA O PLANEJAMENTO DA REDE DE LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL

Jorge Michael Burgos Meneses

Estudante do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção PPGEP-So
Universidade Federal de São Carlos Campus Sorocaba, UFSCar, Sorocaba, SP
ing.jmburgos.09@gmail.com

Dra. Eli Angela Vitor Toso

Professora do Departamento de Engenharia de Produção
Universidade Federal de São Carlos Campus Sorocaba, UFSCar, Sorocaba, SP
eli@ufscar.br

Dra. Deisemara Ferreira

Professora do Departamento de Física, Química e Matemática
Universidade Federal de São Carlos Campus Sorocaba, UFSCar, Sorocaba, SP
deise@ufscar.br

RESUMO

O descarte de pneus inservíveis tem aumentado significativamente nos últimos anos, impulsionado pelo crescimento da indústria automobilística. No Brasil foram implementadas leis e políticas para abordar esta problemática, nas quais os fabricantes e importadores são responsáveis pela coleta e destinação adequada dos pneus. Este trabalho propõe um modelo de programação matemática para a configuração da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, a fim de apoiar decisões de caráter estratégico-tático presentes na rede, como a localização e dimensionamento de centros triagem e trituração, as quantidades de pneus a triturar e estocar, e o dimensionamento da frota de veículos a utilizar. Para a validação do modelo foram utilizados dados reais do estado de São Paulo. Os experimentos computacionais mostram que o modelo é capaz de encontrar soluções de boa qualidade em problemas reais com baixo custo computacional.

PALAVRAS CHAVE: Logística Reversa; Pneus Inservíveis; Modelagem Matemática.

Tópicos: L&T Logística e Transportes, OC Otimização Combinatória, PM Programação Matemática

ABSTRACT

Disposal of waste tires has increased significantly in recent years driven by the growth of the auto industry. In Brazil was implemented laws and policies to address this problem, in which manufacturers and importers are responsible for the collection and proper disposal of these tires. This paper proposes a mathematical programming model for the configuration of the reverse logistic network of waste tires in Brazil, in order to support strategic-tactical decisions in this network, such as the location and size of sorting and shredding centers, the quantities of tires to be shredded and stocked, and the size of the fleet of vehicles to be used. For the validation of the model, an application with real data obtained from the state of São Paulo is performed. The computational experiments show that the model is able to find quality solutions to real problems with low computational cost.

KEYWORDS. Reverse logistic. Waste Tires. Mathematical modeling.

Paper topics. L&T Logistics and Transport, OC Combinatorial optimization, PM Mathematical Programming



1. Introdução

A disposição final inadequada de resíduos sólidos é um problema ambiental que, apesar da existência de políticas e normativas voltadas a redução dos impactos gerados, ainda não está completamente resolvido. O aumento da população, o crescimento das indústrias e a falta de cultura de reciclagem são só alguns dos motivos que fazem desta situação um problema ambiental de grande magnitude, que precisa de mecanismos e técnicas que atenuem seu impacto, preservando os recursos naturais e mantendo o equilíbrio com o meio ambiente.

Atualmente, um dos resíduos sólidos de grande preocupação nos países com alta demanda de veículos são os pneus que chegaram ao final de sua vida útil, chamados “*Pneus Inservíveis*”. Antes, o descarte dos pneus inservíveis era feito de forma incorreta, estes pneus eram usualmente levados a depósitos a céu aberto e aterros sanitários sem tratamento, jogados nas ruas e rios, e até mesmo queimados. Estas práticas traziam consigo consequências negativas para o meio ambiente, por exemplo, a contaminação do solo e do ar. Além disso, os pneus são compostos por polímeros não biodegradáveis e são caracterizados pela baixa compressibilidade, o que reduz o tempo de vida dos aterros, ainda, sua estrutura e forma permite o acúmulo de água, fazendo com que os mesmos se tornem potenciais criadouros de insetos que transmitem doenças, como por exemplo, o mosquito transmissor da dengue.

Em resposta a esta problemática, muitos países passaram a emitir leis, estabelecer responsabilidades, implementar estratégias e a adotar medidas centradas na proteção do meio ambiente. No caso do Brasil, que se encontra entre os países com maior demanda e produção de veículos [OICA, 2017], somente na década de 90, depois de meio século do começo da indústria de pneus no país e de ter sido produzido mais de 29 milhões de unidades de pneus (SINPEC, 2011), os organismos governamentais começaram a reagir frente a esta questão ambiental. Entidades como o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), entre outras, foram as encarregadas de regulamentar as ações relativas à mitigação do impacto gerado por esta problemática e a proteção do meio ambiente, através da adoção de medidas como a proibição de importação de pneus usados e o estabelecimento do princípio de responsabilidade dos produtores e importadores sobre a coleta e descarte ambientalmente adequado de pneus inservíveis.

A Resolução nº 416/09 de CONAMA estabeleceu uma meta a ser cumprida pelos fabricantes e importadores a partir de uma relação de 1:1, para cada pneu novo disposto no mercado, os fabricantes e importadores tem a obrigação de dar uma destinação final adequada aos pneus inservíveis. O cálculo é feito considerando o peso dos pneus, tendo em conta um fator de desgaste de 30% nos pneus inservíveis. Se a meta estabelecida no ano não é atingida, os responsáveis têm que pagar podem ser multados. A Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional dos Resíduos Sólidos) e o Decreto 7.404/2010, exigem maior eficiência na coleta e destinação de produtos como pneus inservíveis.

Logo, para atender tais resoluções e cumprir com as metas de coleta e de descarte estabelecidos pelas entidades governamentais, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) criou a RECICLANIP, entidade sem fins lucrativos e que visa garantir a sustentabilidade do processo de coleta e a destinação de pneus inservíveis. A Associação Brasileira de Importadores e Distribuidores de Pneus (ABIDIP) também é responsável pela adequada gestão da logística reversa, no entanto, sem uma associação formalizada.

A logística reversa de pneus inservíveis no Brasil começa em pontos de coletas, chamados ecopontos. Segundo o relatório do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis [IBAMA 2016], em 2015 foram cadastrados 1.615 pontos de coleta no Brasil. Os pneus deixados nos ecopontos são enviados para empresas que lhes dão uma destinação final



correta, através de diferentes formas de reciclagem ou atividades de co-processamento. Em algumas situações existem empresas intermediárias, entre os ecopontos e as empresas de destinação final, que realizam atividades de triagem e trituração de pneus. No que se refere à triagem de pneus, a associação brasileira do segmento de reforma de pneus [ABR 2013] afirma que, dos pneus inservíveis coletados nos ecoponto, aproximadamente 70% são realmente pneus inservíveis, 20% podem ser reformados para continuar em uso e 10% podem ser reutilizados. A atividade de trituração de pneus agrega valor ao material e reduz significativamente os custos de transportes, além de gerar uma receita com a venda do aço que é retirado dos pneus.

Os responsáveis pela coleta dos pneus inservíveis administram a atual rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil, focando principalmente no cumprimento da meta estabelecida pelas entidades governamentais. De fato, a coleta é feita apenas mediante a solicitação desde os ecopontos quando estes alcançam uma quantidade mínima estabelecida. Um dos principais desafios deste sistema está relacionado com o planejamento da coleta, uma vez que os custos de transporte de pneus inservíveis podem chegar a representar até 67% dos custos totais destes sistemas [Souza e D'Agosto, 2013], pois o formato dos pneus prejudica a compactação da carga [Lagarinhos, 2011] e a dispersão geográfica dos ecopontos afeta diretamente as atividades de coleta [Oliveira e Castro, 2007].

Neste contexto, o presente estudo propõe um modelo matemático para apoiar as decisões de caráter estratégico-tático da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil. O modelo considera decisões de localização e dimensionamento de centros triagem e trituração, decisões sobre as quantidades de pneus a triturar e estocar, decisões de transporte e de dimensionamento da frota de veículos.

2. Sistema de Rede de Logística Reversa

A logística reversa de pneus inservíveis no Brasil começa quando os pneus são descartados, logo depois de serem trocados por pneus novos ou logo que os veículos chegam ao final da sua vida útil. Estes pneus são deixados em locais como empresas revendedoras, borracharias ou locais especiais criados em parceria público-privado, chamados ecopontos. Os pneus são levados dos ecopontos diretamente às empresas de destinação final, para que sejam enviados para diferentes formas de reciclagem (recuperação de valor) ou para co-processamento (recuperação energética). Em alguns casos são feitas atividades de pré-processamento (triagem e trituração) em centros intermediários. Pode-se dizer que a rede reversa conta com três níveis, os Ecopontos (P) onde é feita a coleta de pneus, Centros Intermediários (C) onde são feitas atividades de triagem, trituração e estocagem para alguns dos pneus, e as Empresas de Destinação Final (D) onde são feitas atividades de reciclagem e co-processamento. A figura 1 mostra a estrutura da rede logística atual.

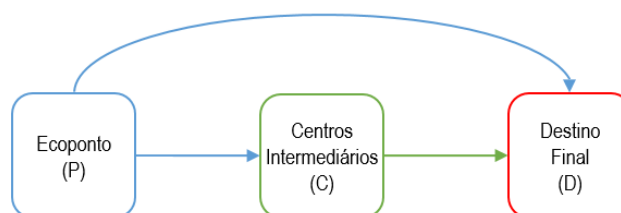


Figura 1. Rede reversa proposta para a modelagem.



2.1 Considerações para a modelagem

No problema de logística reversa abordado neste trabalho, consideramos conjuntos de nós composto por ecopontos (P), centros intermediários (C) e empresas de destinação final (D). Os locais relacionados aos ecopontos e às empresas de destinação final estão definidos e estabelecidos, portanto, os nós relativos a estas instalações são fixos. Em relação aos centros intermediários, onde as atividades de triagem e pré-processamento acontecem, consideramos um conjunto de locais candidatos para instalação destas unidades, com diferentes possibilidades de tamanho e capacidades de recepção, triagem, trituração e estoque de pneus.

A partir dos ecopontos podem ser transportados pneus inteiros para centros intermediários e para as empresas de destinação final. Os pneus que são transportados aos centros intermediários passam por um processo de triagem onde são classificados em pneus servíveis e inservíveis. Os pneus servíveis apresentam condições de reutilização ou reforma, e podem ser vendidos para o mercado de segunda mão. Os pneus inservíveis, por sua vez, podem ser transportados inteiros para as empresas de destinação final, podem ser mantidos em estoque ou podem ser submetidos a um processo de trituração, onde a fração de aço é separada. O aço obtido é vendido e o subproduto gerado da trituração é transportado para as empresas de destinação final. Os produtos enviados às empresas de destinação final podem ter diferentes formas de recuperação: co-processamento, granulação ou laminação. Vale a pena ressaltar que o processo de laminação nas empresas de destinação final só recebe pneus inteiros.

Desta forma, a rede de logística reversa em questão envolve custos relacionados com o transporte de pneus entre os diferentes locais, a instalação de centros intermediários com diferentes possibilidades de capacidade, o estoque, triagem e trituração de pneus nos centros intermediários, e finalmente, a penalização pelo não cumprimento da meta estabelecida. Os custos de transporte dependem diretamente da distância do trajeto entre os locais, e do tipo e número de veículos usados para o transporte, os custos de instalação de centros intermediários dependem do tamanho do centro a instalar, e finalmente, os custos de triagem e pré-processamento dependem da quantidade de pneus envolvidos nestes processos. Consideram-se também as receitas obtidas pelas vendas das frações de aços, dos pneus servíveis e do material enviado às empresas de destinação. Para esta rede logística é estabelecida uma meta. O cálculo de tal meta é feito com base na quantidade de pneus produzidos e importados para o mercado de reposição. Quando a meta não é atingida, se incorre em uma penalização por não cumprimento da mesma. A Figura 2 detalha os fluxos na rede logística reversa proposta para a modelagem.

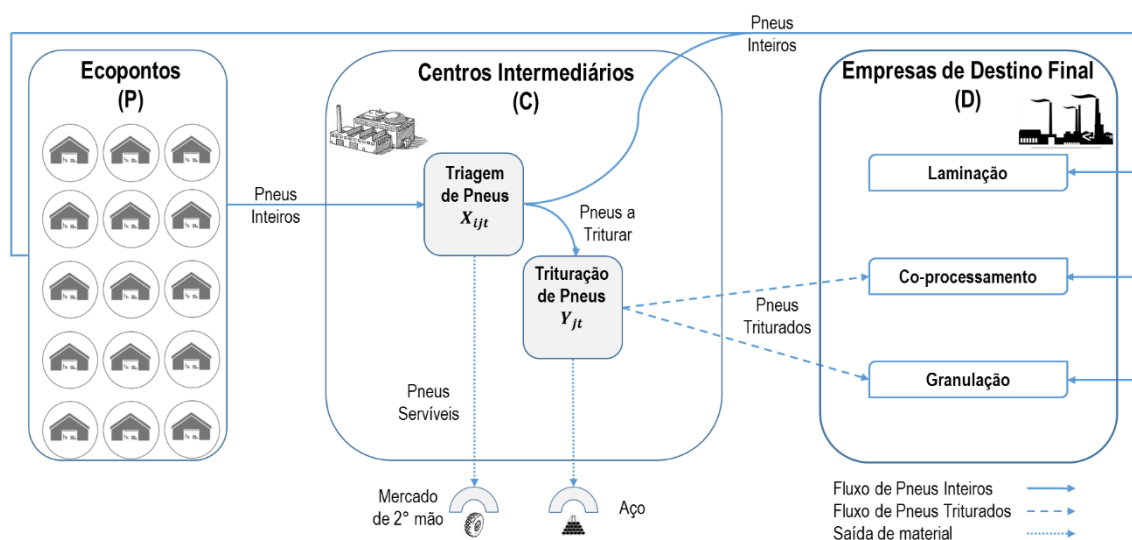


Figura 2. Rede Logística Reversa proposta para a modelagem.



2.2 Modelo Matemático

A notação utilizada para formular o modelo matemático é definida como se segue:

Índices

i, j, k	Nós da rede
l	Tamanho das instalações
t	Períodos de tempo
b	Capacidade da viagem

Conjuntos

P	Conjunto de ecopontos
C	Conjunto de centros intermediários
D	Conjunto de empresas de destino final
L	Conjunto de tamanho de instalações
T	Conjunto de períodos de tempo
B	Conjunto de capacidades dos veículos

Parâmetros

g_{it}	Quantidade de pneus descartados disponíveis para coleta no ecoponto i no período t
d_j	Demanda de pneus nos centros de destinação final j
U_b	Capacidade máxima de transporte de pneus inteiros de veículo tipo b
U'_b	Capacidade máxima de transporte de pneus triturados de veículos tipo b
ci_l	Custo de instalação de um centro intermediário de tamanho l
cs	Custo de triagem dos pneus nos centros intermediários
cp	Custo de pre-processamento (trituração) dos pneus nos centros intermediários
ce	Custo de estoque de pneus inteiro nos centros intermediários
ce'	Custo de estoque de pneus triturado nos centros intermediários
cv_{ijb}	Custo de transportar pneus inteiros desde i até j utilizando veículos tipo b
cv'_{ijb}	Custo de transportar pneus triturados desde i até j utilizando veículos tipo b
rs	Preço de venda de pneus servíveis no mercado de 2º mão
ra	Preço de venda de aço obtido após o pré-processamento (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
qr_l	Capacidade de recepção e triagem de pneus em um centro intermediário de tamanho l
qp_l	Capacidade de pre-processamento (trituração) de um centro intermediário de tamanho l
qe_l	Capacidade de estoque de um centro intermediário de tamanho l
vp	Volume de uma tonelada de pneus inteiros
vp'	Volume de uma tonelada de pneus triturados
α	Fração média de aço separado no processo de trituração
σ	Fração média de pneus servíveis no total coletado
β	Penalização unitária por não cumprimento da meta
M	Meta de pneus a serem coletados

Variáveis de decisão

X_{ijt}	Quantidade de pneus inteiros transportados no arco (i,j) no período t
X'_{ijt}	Quantidade de pneus triturados transportados no arco (i,j) no período t
I_{jt}	Quantidade de pneus inteiros em estoque no nó j no período t
I'_{jt}	Quantidade de pneus triturados em estoque no nó j (centro intermediário) no período t
Y_{jt}	Quantidade de pneus a triturar nó j (centro intermediário) no período t



- S_{jt} Quantidade de pneus a comercializar como servíveis do nó j no período t
 G Quantidade de pneus não entregue
 Z_{jl} Indica se um centro com capacidade l é instalado no nó j ($Z_{jl} = 1$) ou não ($Z_{jl} = 0$)
 F_{bijt} Número de viagens com o veículo b usados no transporte entre os nós (i,j) no período t
 F'_{bijt} Número de viagens com o veículo b usados no transporte entre os nós (i,j) no período t

A seguir é apresentado o modelo matemático proposto neste trabalho.

Função objetivo

$$\begin{aligned} \min \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{i \in [PUC]} \sum_{\substack{j \in [CUD] \\ i \neq j}} \sum_{b \in B} (cv_{bij} F_{bijt}) + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} \sum_{b \in B} (cv'_{bij} F'_{bijt}) \right\} + \sum_{j \in C} \sum_{l \in L} ci_l Z_{jl} \\ + \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in P} \sum_{j \in C} cs X_{ijt} + \sum_{j \in C} (cp Y_{jt} + ce I_{jt} + ce' I'_{jt}) \right] + \beta G \\ - \sum_{t \in T} \left\{ rs S_{jt} + ra \sum_{j \in C} \alpha Y_{jt} + \sum_{i \in [PUC]} \sum_{j \in D} rp_j X_{ijt} + \sum_{i \in C} \sum_{j \in D} rp'_j X'_{ijt} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



$$\begin{aligned}
 Z_{jl} &\in \{0,1\} & t \in T; i \neq j & & (19) \\
 S_{jt} &\geq 0 & j \in C; l \in L. & & (20) \\
 F_{bijt} &\in Z^+ & j \in [P \cup C]; t \in T; & & (21) \\
 F'_{bijt} &\in Z^+ & i \in [P \cup C]; j \in [C \cup D]; & & (22) \\
 & & b \in B; t \in T; i \neq j & & \\
 & & i \in C; j \in D; b \in B; t \in T & &
 \end{aligned}$$

A função objetivo (1) minimiza os custos totais da rede reversa, considerando a renda obtida no processo da rede reversa. A expressão da função objetivo divide-se em 5 termos, o primeiro representa os custos de transporte totais incorridos na rede, o segundo representa os custos de instalação de centros intermediários, o terceiro termo mostra os custos de triagem, trituração e estoques incorridos nos centros intermediários, o quarto representa a penalização pelo não cumprimento da meta estabelecida, e, finalmente, o quinto termo refere-se à renda total obtida pela venda de pneus servíveis, aço e subprodutos.

As restrições (2) representam o balanço de fluxos nos ecopontos (P). A quantidade de pneus descartados no ecoponto no período (g_{it}) mais os pneus em estoque no ecoponto no período anterior ($I_{i,t-1}$) deve ser igual aos pneus transportados para os centros intermediários e para as empresas de destinação final ($\sum X_{ijt}$), mais os pneus deixados nos estoques no período atual (I_{it}). A figura 3 mostra os fluxos dos ecopontos envolvidos nos ecopontos.

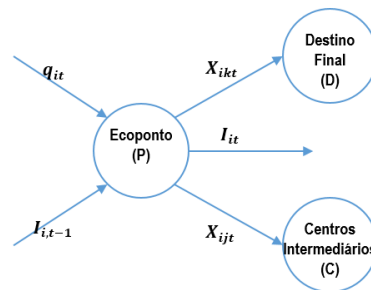


Figura 3. Fluxos de saída dos ecopontos

As restrições (3) garantem a conservação de fluxo de pneus inteiros nos centros intermediários. As entradas de pneus procedentes dos ecopontos ($\sum X_{ijt}$) mais o estoque de pneus inteiros do período anterior ($I_{j,t-1}$) tem que ser igual à saída de pneus servíveis para venda no mercado de segunda mão (S_{jt}), pneus inteiros inservíveis transportados às empresas de destinação final ($\sum X_{jkt}$), os estoques de pneus do período atual (I_{jt}), e os pneus inteiros destinados a trituração no período atual (Y_{jt}). A figura 4 representa o balanço do fluxo da restrição 3.

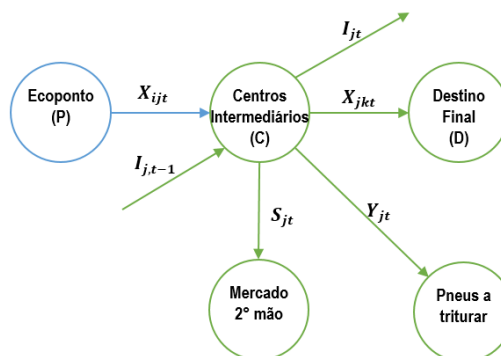


Figura 4. Conservação de fluxo nos centros intermediários



As restrições (4) garantem a conservação de fluxo de pneus triturados nos centros intermediários. Os pneus triturados no período atual (Y_{jt}) mais o estoque de pneus triturados do período anterior ($I'_{j,t-1}$) tem que ser igual à fração de aço obtida dos pneus triturados no período atual ($\propto Y_{jt}$), os pneus triturados transportados às empresas de destinação final ($\sum X'_{jkt}$) e os pneus triturados deixados no estoque do período atual (I'_{jt}). A figura 5 mostra o balanço do fluxo desta restrição.

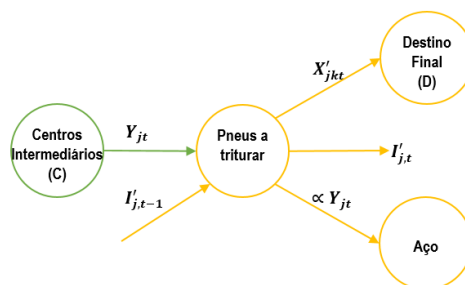


Figura 5. Conservação de fluxo dos pneus triturados nos centros intermediários

As restrições (5) limitam a quantidade de pneus que podem ser considerados para comercializar no mercado de segunda mão. As restrições (6), (7) e (8) limitam a quantidade de produtos a receber (triagem), preprocesar (triturar) e estocar nos centros de intermediários, respectivamente. As restrições (9) estabelecem que a capacidade das empresas de destinação final seja respeitada, as restrições (10) garantem que um único centro intermediário pode ser instalado em uma cidade candidata. E, as restrições (11) determinam a quantidade de pneus não destinados, considerando a meta estabelecida. As restrições (12) e (13) associam a quantidade de pneus inteiros e triturados transportados com a quantidade de veículos usados para tal transporte, considerando as limitações de peso destes veículos. Finalmente, nas restrições (14), (15), (16), (17), (18), (19), (20), (21) e (22) são estabelecidos os domínios das variáveis.

3. Testes Computacionais

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o modelo (1)-(22). Foi utilizada a linguagem de modelagem algébrica AMPL com o solver CPLEX 12.6. Para realização dos experimentos computacionais foi utilizado um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-3330S 2.70GHz com 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 home.

3.2 Instância Ilustrativa

Foram realizados testes com uma instância ilustrativa, com 4 períodos de tempo, 20 Ecopontos, 4 Empresas de Destinação Final e 10 locais candidatos para a instalação dos Centros Intermediários. Foram considerados dois tipos de veículos de transporte e dois possíveis tamanhos de instalação de centros intermediários. As rendas obtidas pelas vendas de aço, pneus de segunda mão, pneus inservíveis inteiros e triturados são \$50, \$150, \$30 e \$50, respectivamente. Os custos incorridos nos centros intermediários são: triagem \$4, trituração \$8, estoque pneus inteiros \$1 e estoques pneus triturados \$0,3. O custo de instalar centros intermediários grandes e pequenos é de \$30.000 e \$10.000, respectivamente, e o custo de utilizar veículos grandes e pequenos para o transporte é de \$15/km e \$10/km, respectivamente. Foi considerada uma capacidade de estoque e triagem de 1.200 toneladas e de trituração de 1.000 toneladas para os centros intermediários pequenos, e de estoque e triagem de 3.600 toneladas e de trituração de 3.000 toneladas para os centros intermediários grandes. Os veículos grandes com capacidade de transporte de 40 toneladas para pneus inteiros e de 80 toneladas para pneus triturados, os veículos pequenos com capacidade



de transporte de 20 toneladas para pneus inteiros e de 40 toneladas para pneus triturados. Finalmente, o descarte de pneus foi de 20.000 toneladas distribuídos de maneira aleatória entre os períodos de tempo e os ecopontos, determinando-se a melhor configuração da rede para uma meta maior (24.000 t.), igual (20.000 t.) e menor (16.000 t.) que a quantidade de pneus descartados, considerando uma penalização de \$500 por tonelada de pneus abaixo da meta estabelecida. A figura 6 mostra a distribuição espacial dos agentes envolvidos nesta instância ilustrativa.

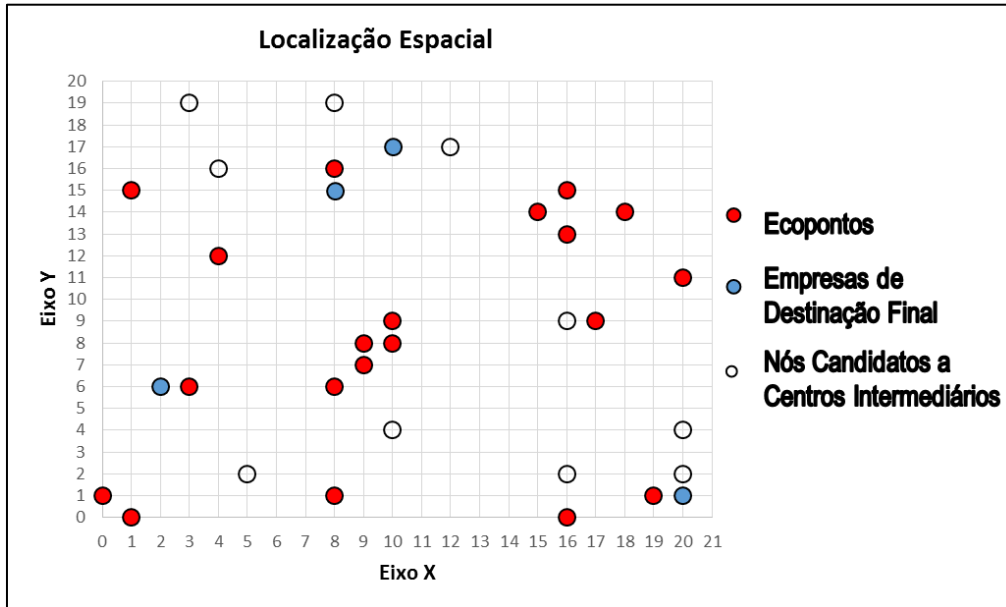


Figura 6. Distribuição espacial dos agentes nas instâncias ilustrativas.

Ao resolver a instância ilustrativa com as metas de 24.000 toneladas e 20.000 toneladas, os resultados mostram que é adequado instalar 5 centros intermediários de tamanho pequeno nos pontos (20;2), (16;9), (12;17), (4;16) e (5;2). Além disso, os resultados indicam um fluxo direto de pneus entre os ecopontos e os centros de destinação final de 19 e 1 toneladas. Para estas instâncias não foram enviados pneus para venda no mercado de 2º mão e todos os pneus que ingressam nos centros intermediários são triturados. Os resultados da instância ilustrativa com meta de 16.000 toneladas indicam a instalação de 5 centros intermediários pequenos em (20,2), (16,9), (12,17), (10,4) e (5,2), sendo que o fluxo direto entre os ecopontos e os centros de destinação final foi de uma tonelada e são enviados 3.999,8 toneladas de pneus para venda no mercado de 2º mão. Nas tabelas 1 e 2 são detalhados os resultados para cada uma destas instâncias e a figura 7 mostra a localização dos centros intermediários a instalar.

Instância	Meta	Pneus Descartados	Fluxo Pneus P-D	Fluxo Pneus P-C	Fluxo Pneus C-D	Pneus 2 Mão	Total Aço	Pendentes da Meta	Veículos Tipo 1	Veículos Tipo 2
1	24.000	20.000	19	19.981	17.982.9	0	1.998,1	4000	21	721
2	20.000	20.000	1	19.999	17.999.1	0	1.999,9	0	25	719
3	16.000	20.000	1	19.999	14.399.28	3.999,8	1.599,9	0	11	680

Tabela 1. Fluxos de pneus dos resultados das instâncias ilustrativas



Instância	Custos Totais	Custos de Transporte	Custos de Instalação	Custos Variáveis	Penalização	Renda Total	Renda Aço	Renda Pneus 2º Mão	Renda Pneus inservíveis inteiros	Renda Pneus inservíveis triturados
1	2.343.112	53.254	50.000	239.858	2.000.000	999.619	99.904	0	570	899.144
2	343.427	53.341	50.000	240.085	0	999.980	999.95	0	30	899.955
3	305.044	47.032	50.000	208.012	0		79.996	599.970	29	719.964

Tabela 2. Custos e Rendas dos resultados das instâncias ilustrativas

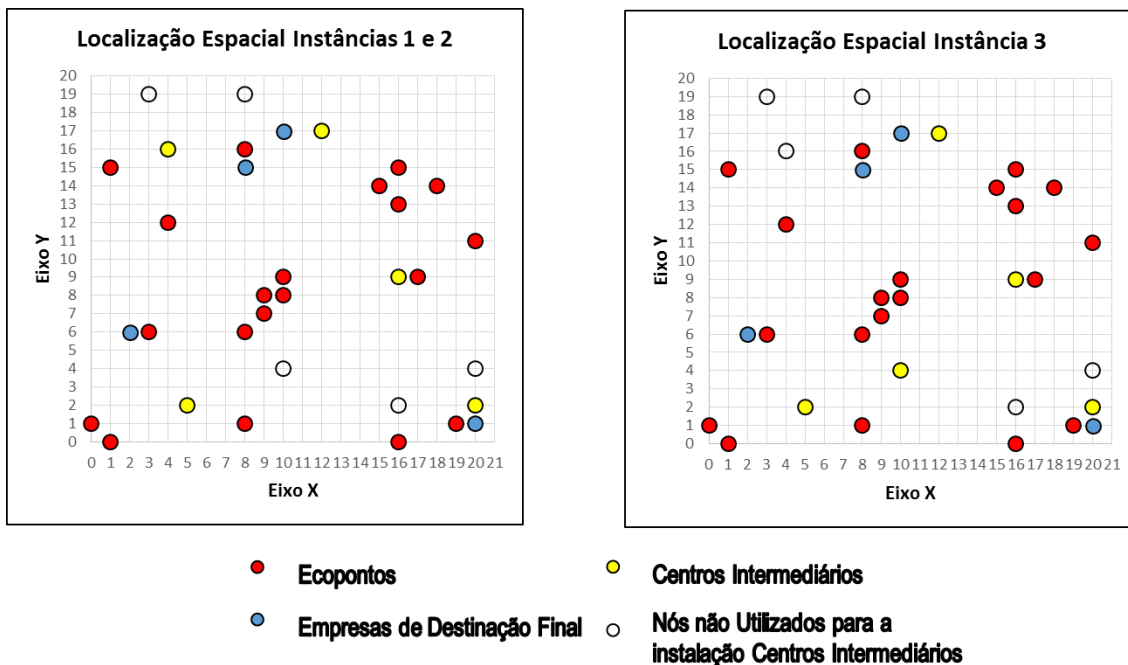


Figura 7. Localização dos Centros Intermediários nas instâncias ilustrativas

Note na figura 7 que, o resultado do modelo indica a instalação de centros intermediários nos locais com maior presença de ecopontos, devido à possibilidade de reduzir os custos de transportes e aumentar a receita ao receber e triturar os pneus inservíveis.

3.2 Estudo de caso: Estado de São Paulo

Com objetivo de analisar o desenvolvimento do modelo matemático em instâncias grandes, foram utilizados os dados do sistema atual de rede de logística reversa do estado de São Paulo. Desta forma, foram considerados 412 ecopontos e 20 empresas de destinação final presentes atualmente no estado de São Paulo, como potenciais lugares candidatos para instalação dos centros intermediários, foram considerados os 221 municípios do estado que possuem ecopontos [IBAMA 2016]. O horizonte de planejamento estabelecido foi de 6 bimestres, o valor da quantidade de pneus descartado e a meta estabelecida utilizada na instância foram extraídos do relatório [IBAMA 2016], finalmente, os custos de instalação, operação e transporte, e as rendas da instância, foram baseados em valores obtidos na literatura [Lagarinhos, 2011], [Libera et al., 2009] e [Stark, 2015].

O modelo encontrou uma solução com *gap* de 1% em 7200 segundos de processamento computacional. A solução indica a abertura de 10 Centros Intermediários de tamanho pequeno e 1 Centro Intermediário de tamanho médio. Como a meta estabelecida é igual à quantidade total de pneus descartados, o modelo não considera a venda de pneus para o mercado de segunda mão, de forma a não incorrer na penalização estabelecida. No entanto, ao final do último período fica uma pequena quantidade de pneus nos ecopontos (0,01 ton.), o que pode ser explicado pelo fato do



transporte dessa quantidade ser mais custoso do que a penalização. Todos os pneus que chegam aos centros intermediários são triturados e a porcentagem média de utilização dos centros é de 91,16%. No que se refere ao transporte, são feitas 7.868 viagens, das quais 7057 são com carga completa. Nas tabelas 3 e 4 são detalhados os resultados obtidos pelo modelo. A tabela 3 descreve os fluxos de pneus na rede por período e a tabela 3 detalha os custos e renda total do modelo.

Período	Pneus Descartados	Estoque de Pneus P	Fluxo de Pneus P-D	Fluxo de Pneus P-C	Pneus 2 Mão	Pneus Triturados	Aço	Fluxo de Pneus C-D	Estoque de Pneus C	Veículos
1	21.828,33	12.007,71	4.319,29	5501,33	0	5.501,33	550,13	4.871,20	80	637
2	21.902,51	22.282,18	5.342,88	6285,16	0	6.285,16	628,52	5.736,64	0	759
3	22.069,05	29.013,10	8.856,68	6481,46	0	6.481,46	648,15	5.753,55	79,76	954
4	21.075,38	33.165,43	10.011,94	6911,11	0	6.911,11	691,11	6.259,76	40	1.040
5	23.004,49	36.961,78	12.044,50	7163,65	0	7.163,65	716,36	6.351,96	135,33	1.158
6	24.002,72	0,01	53.924,49	7040,00	0	7.040	704	6.471,33	0	3.320
Total	133.882,48	*	94.499,78	39382,71	0	39.382,70	3.938,27	35.444,43	*	7.868

Tabela 3. Custos e Rendas dos resultados das instâncias ilustrativas

Custos Totais	Custos de Transporte	Custos de Instalação	Custos Variáveis	Penalização	Renda Total	Renda Aço	Renda Pneus 2º Mão	Renda Pneus inservíveis inteiros	Renda Pneus inservíveis triturados
13.494.509	6.342.020	2.425.000	4.727.599	110	59.262.709	1.969.135	0	37.799.136	19.494.437

Tabela 4. Custos e Rendas dos resultados das instâncias ilustrativas

4. Considerações Finais

Este trabalho propõe um modelo de programação matemática para apoiar as decisões estratégico-táticas do planejamento da rede de logística reversa de pneus inservíveis no Brasil. Testes realizados com dados reais do Estado de São Paulo mostram que o modelo representar adequadamente o problema, indicando resultados para as decisões de localização e dimensionamento de centros triagem e trituração, decisões de fluxo de pneus entre os atores da rede reversa, e decisões para o dimensionamento da frota de veículos necessária.

A principal diferença entre a abordagem apresentada neste trabalho e as abordagens anteriores propostas para o problema, refere-se à integração das decisões estratégicas e táticas, e a consideração do dimensionamento da frota de veículos no modelo. A incorporação de decisões de planejamento do nível tático na configuração da rede logística mostra que estas decisões impactam significativamente o desempenho das operações na rede.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba (PPGEP-S) e a CAPES pelo apoio financeiro.



Referências

Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus ABR, (2013). Web page. <http://www.abr.org.br/dados.html>. Acessado: 2017-03-30.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis IBAMA, (2016). Título de um relatório técnico. Relatório de Pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09 2016 (ano-base 2015), Ministério do Meio Ambiente.

Lagarinhos, C. (2011). Tese de Doutorado em Engenharia. Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. Universidade de São Paulo.

Libera, F. Zanini, M. Rossato, M. Guse, J. e Dörr, A. (2009). Artigo em conferência. Parâmetros Operacionais para Implantação de uma Recicladora de Pneus Inservíveis em Santa Maria-RS. In *XVI Congresso Brasileiro de Custos*, Fortaleza, Ceará.

OICA, (2017). Web page. <http://www.oica.net/category/production-statistics/>. Acessado: 2017-03-30.

Oliveira, O. e Castro, R. (2007). Artigo em conferência. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. In *XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Foz do Iguaçu, PR.

Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback SINEC. História do Pneu. Web page. <http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/>. Acessado: 2017-05-30.

Stark, F. (2015). Dissertação de Mestrado em Engenharia da Produção. Configuração da Rede de Logística Reversa de Pneus Inservíveis no Estado de São Paulo. Universidade federal de São Carlos.

Souza, C. e D'Agosto, M. (2013). Análise dos custos logísticos aplicada à cadeia logística reversa do pneu inservível. *TRANSPORTES*, 21:38-47.