



O IMPACTO DA REFORMA DE PNEUS NO CICLO DE VIDA E LOGÍSTICA REVERSA DO PNEUS NO BRASIL: UM MODELO DINÂMICO

THE IMPACT OF TIRE'S REFORM IN THE LIFE CYCLE AND TIRE'S REVERSE LOGISTICS IN BRAZIL: A DYNAMIC MODEL

Danilo Ribamar Sá Ribeiro, UFSC, Brasil, danilo_saribeiro@hotmail.com

Mauricio Uriona Maldonado, UFSC, Brasil, m.uriona@ufsc.br

Caroline Rodrigues Vaz, UFSC Blumenau, Brasil, caroline.vaz@ufsc.br

Fernando Antônio Forcellini, UFSC, Brasil, fernando.forcellini@ufsc.br

Resumo

Os pneus são amplamente consumidos e possuem características intrínsecas que limitam suas opções de tratamento e eliminação ao final do ciclo de vida útil. Devido à tamanha quantidade de pneus descartados de forma inadequada, esse componente se tornou um grave problema ambiental. Para atenuar essa situação, a legislação possibilita o uso de procedimentos para ampliar a vida útil, por meio de diversos tipos de reforma de pneus. Contudo, há tendência de aumento da quantidade de pneus em circulação nos próximos anos, devido ao aumento da frota de veículos no país o que leva a questionar-se sobre a efetividade da política de reforma na dinâmica de geração de pneus inservíveis e no descarte correto para os próximos anos. Neste contexto, este artigo tem como objetivo avaliar os impactos de longo prazo da política de reforma de pneus no ciclo de vida e na logística reversa do setor. Para isto, um modelo de dinâmica de sistemas é desenvolvido, representando as principais fases, volumes e tempos no ciclo de vida de pneus. Como principais resultados, o modelo apresenta a projeção de pneus descartados até 2030, respondendo a diferentes níveis de crescimento das vendas de pneus novos.

Palavras-chave: Dinâmica de Sistemas; Logística Reversa; Pneus; Modelagem e Simulação

Abstract

Tires are widely consumed and have intrinsic features that limit their options of the treatment and disposal in the end of their useful life. Due to the great number of tires that are improperly discarded, this component has become a serious environmental problem. To mitigate this situation, the legislation allows the use of procedures to extend the useful life, through several types of tire reform. However, there is a tendency to increase the number of tires in circulation in the coming years, due to the increase of the vehicle fleet in the country which leads to questioning about the effectiveness of the reform policy in the dynamics of generation of waste tires and the correct disposal for the next years. In this context, this paper aims to estimate the long-term impacts of the tire reform policy on the life cycle and reverse logistics of the sector. For this, a system dynamics model is developed, representing the main phases, volumes and times in the tire life cycle. As practical implications, the model presents the projection of discarded tires until 2030, responding to different growth levels of new tire sales.

Keywords: Systems Dynamics; Reverse Logistic; Tires; Modeling and Simulation.



1. INTRODUÇÃO

No mundo de recursos finitos e de capacidades limitadas das instalações de descarte, a recuperação de produtos usados é fundamental para sustentar uma população crescente em um nível crescente de consumo e fazem com que a Logística Reversa (LR) seja encarada com maior seriedade (FLEISCHMANN *et al.*, 1997; GEORGIADIS & VLACHOS, 2004; LAGARINHOS, 2011).

Diante deste contexto, a LR apresenta-se como uma ferramenta essencial para que a destinação de pneus aconteça de forma satisfatória. A importância dos pneus no mundo moderno é evidente, particularmente no Brasil, em que há grande utilização do modal de transporte rodoviário. Pneu é um item com grande volume de produção e de suma importância para o dia a dia e com problemas específicos no fim de vida (VIANNA & DE OLIVEIRA, 2009; FAGUNDES, 2017).

Desta forma, existem as leis do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), para apresentar a forma correta de destinação final dos pneus ao fim de suas vidas úteis. A atenção legal dispensada ao descarte deste objeto deve-se ao fato dos danos ambientais que o descarte inadequado pode causar (MOTTA, 2008; BARTHOLOMEU & CAIXETA-FILHO, 2011 FAGUNDES, 2017).

Os problemas ambientais decorrentes do descarte de pneus inservíveis explicam Christófani *et al.* (2017) que estão relacionados ao:

- descarte de pneus em corpos d'água;
- os pneus por apresentarem baixa compressibilidade, associado à sua degradação muito lenta, ao serem aterrados inteiros, podem provocar o escorregamento das células de lixo, bem como reduzir a vida útil dos aterros sanitários;
- devido a sua forma, se for aterrado inteiro, poderá reter ar e outros gases no seu interior, tornando-se volumoso, e podendo vir a flutuar para superfície, quebrando a cobertura do aterro. Quando isso ocorre, ocasiona a exposição do aterro a micro e macro vetores, a fauna, além de possibilitar que os gases escapem para a atmosfera, bem como haja o vazamento de líquidos (LUND, 1992);
- os pneus ficam sujeitos à queima acidental ou provocada, ocasionando prejuízos na qualidade do ar, face à liberação de fumaça contendo alto teor de substâncias tóxicas;
- do ponto de vista da saúde pública, o descarte de pneus em terrenos baldios é igualmente danoso, pois devido o seu formato, tende a reter a água de chuva criando um ambiente propício a proliferação de vetores, como por exemplo, o mosquito "*Aedes aegypti*" que é transmissor da dengue.

Quando os pneus entram em um estágio sem condição de reforma, passam a ser denominados inservíveis (BRASIL, 2012). Este pneu denominado inservível constitui uma fonte de preocupação ambiental moderna, devido à elevada e crescente quantidade descartada no país nos últimos anos, consequência direta do aumento da frota de veículos. Um fato que agrava o



problema é o longo período de decomposição, que segundo os mesmos autores, apesar de incerto é superior a 100 anos (BARTHOLOMEU & CAIXETA-FILHO, 2011; LEITE, 2017).

De acordo com Kannan, Diabat e Shankar (2014) devido a industrialização e a globalização, o setor automotivo teve um crescimento. Desta forma, a produção de pneus também aumentou e conseqüentemente a quantidade de pneus em fim de vida. No Brasil, a produção de veículos novos é o principal indicador para a projeção da demanda de pneus (LAGARINHOS & ESPINOSA, 2008). A Figura 1 apresenta a evolução do mercado de reposição em 2016 (em unidades de pneus novos).

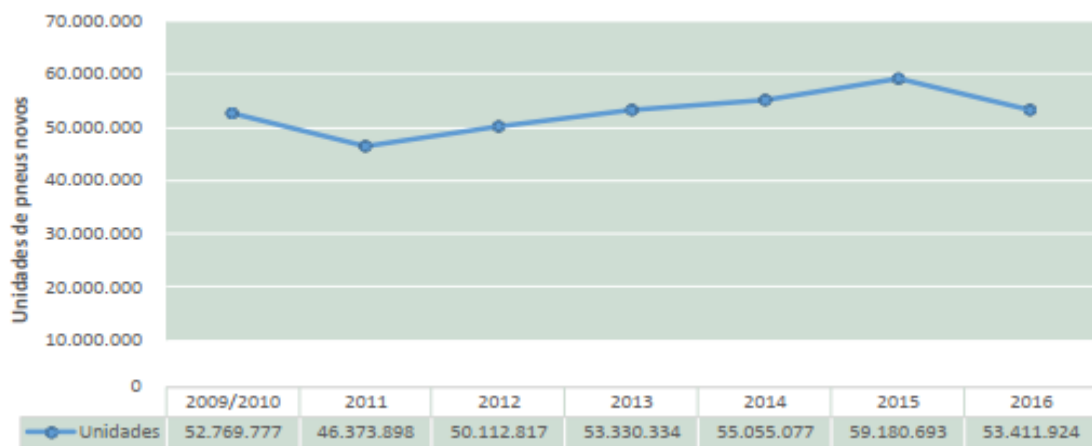


Figura 1 – Evolução do mercado de reposição em 2016 (unidades de pneus novos). Fonte: Relatórios de Pneumáticos - IBAMA (2017).

Conforme mencionando anteriormente, há tendência de aumento da quantidade de pneus inservíveis descartados nos próximos anos, devido ao aumento da frota de veículos no país. No caso da cadeia de reciclagem de pneus, houve o aumento do número de empresas cadastradas no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), com o desenvolvimento de novas tecnologias para a utilização dos materiais reciclados e a valorização energética. O Brasil já possui capacidade para a reciclagem e a valorização energética de todos os pneus inservíveis gerados no país anualmente (LAGARINHOS & TENÓRIO, 2012).

Vale ressaltar que em função desta grande problemática de destinação, este setor industrial encontrou como forma de amenizar tal situação, por meio do segmento de reforma de pneus (SOUZA & GUIMARÃES, 2010). Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ABR), a reforma de pneus se caracteriza como a reposição da banda de rodagem do pneu, desgastada pelo uso. Assim, evita-se que este seja descartado prematuramente, além de reduzir o custo do quilômetro rodado do setor de transportes. O pneu reformado apresenta por si um caráter sustentável, uma vez que reduz o consumo de recursos naturais. Quanto mais se utiliza uma carcaça, menor será o impacto ambiental com a geração de resíduos, evitando a necessidade de produzir um pneu novo (PNEUS & CIA, 2017).



Segundo Mattosinho e Costa (2009), a reforma de pneus é uma atividade que se enquadra na Logística Reversa de Pós-Consumo. Durante este processo os pneus irão passar por testes, concertos (se necessários), substituição da banda de rodagem e ao final possuir condições e características de um pneu novo para que assim possa entrar novamente no ciclo de negócios ou produtivo. Conforme dados da ABR, Brasil é o segundo maior mercado de reforma de pneus, com 24% de participação no mercado mundial, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, que possui 46% e uma média de 17 milhões de unidade de pneus reformados. A Figura 2 apresenta a quantidade de pneus reformados nos últimos anos.

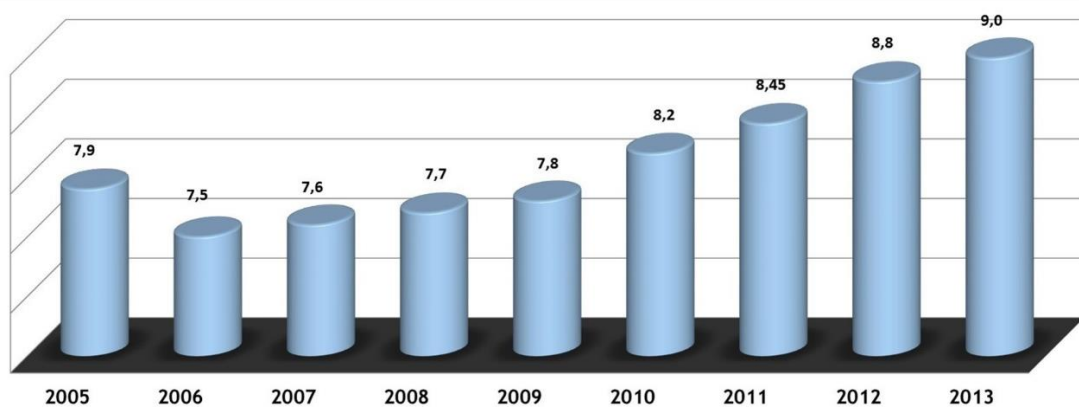


Figura 2 – Pneus reformados comerciais (em milhões de unidades). Fonte: ABR (2014).

Ferguson e Souza (2016) destacam que há as dificuldades encontradas na hora de desenhar, implantar e operar uma rede de Logística Reversa. Uma forma de avaliar os efeitos críticos relacionados com essa complexidade é por meio da formulação de modelos de simulação (BORSHCHEV e FILIPPOV, 2004).

Vaz, Inomata e Maldonado (2016) afirmam que Dinâmica de Sistemas oferece algumas vantagens de aplicação em modelos de sistemas produtivos que envolvam Logística Reversa, uma vez que concede a visão da realimentação de matéria e informação (STERMAN, 2000; GEORGIADIS e VLACHOS, 2004), que é a característica fundamental desta temática. Contudo, os autores afirmam que estudos que utilizam Dinâmica de Sistemas no domínio da Logística Reversa são relativamente novos e escassos.

A Dinâmica de Sistemas examina as mudanças de comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo, fundamentado em princípios básicos como sistema, dinâmica, estruturas e comportamento, avaliando as consequências das decisões tomadas (KARNOPP, MARGOLIS & ROSENBERG, 2012; GHISOLFI *et al.*, 2017). Sendo assim, a abordagem de Dinâmica de Sistemas pode ser considerada uma ferramenta apropriada para análise condições dinâmicas da Logística Reversa de Pneus no Brasil.

Nesta perspectiva, o objetivo inicial desta pesquisa é de apresentar como a abordagem metodológica ferramenta de Dinâmica de Sistemas pode ser empregada para auxiliar a modelagem e a simulação da Logística Reversa de Pneus no Brasil, ao desenvolver um modelo logístico dinâmico de avanço / reverso integrados que incluam variáveis quantitativas. Ademais,



o propósito deste modelo é avaliar as políticas públicas que visem garantir a viabilidade da Logística Reversa de pneus no cenário brasileiro.

O artigo esta composta por seis sessões, na qual a primeira esta composta por esta introdução. A segunda sessão, apresenta o referencial teórico sobre o assunto de Logística Reversa, Pneus e suas Legislações. A terceira sessão, mostra os procedimentos metodológicos usados para construir o modelo de simulação. A quarta sessão, mostra a construção do modelo com Dinâmica de Sistemas. A quinta sessão analisa e discute os resultados da simulação com os dados históricos. E por fim, a sexta sessão traz as devidas considerações finais e as recomendações de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Logística Reversa de Pneus

Logística Reversa é definida como o processo de mover mercadorias de seu destino final típico para fins de captura de valor ou descarte adequado que abrange todas as atividades de fabricação e logística, incluindo reutilização, remanufatura, reciclagem e gerenciamento de materiais perigosos (TIBBEN-LEMBKE & ROGERS, 2002; GOLROUDBARY & ZAHRAEE, 2015).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (estabelecida pela lei 12.305 de 2/08/2010), a logística reversa pode ser definida como “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”.

A LR de **Pós-consumo** refere-se aos produtos já adquiridos e descartados pelo consumidor. São produtos cuja vida útil chegou ao fim ou que foram jogados fora devido a defeitos ocorridos ao longo do tempo, cujo conserto é considerado inviável, ou por não se adequarem mais às conveniências do consumidor (VAZ & MALDONADO, 2017). Os canais de distribuição reversos de pós-consumo constituem-se pelo fluxo reverso de produtos ou materiais constituintes que surgem no descarte dos produtos depois de encerrada a vida útil e que retornam ao ciclo produtivo (LEITE, 2003).

Os pneus são um dos principais produtos a serem inseridos no sistema de logística reversa para o CONAMA, uma vez que são considerados como um dos principais poluidores do meio ambiente quando descartados. Como tudo que é utilizado pelo ser humano, os pneus depois de usados se tornam um resíduo, devendo assim receber tratamento e disposição adequados, visando não causar danos à população e ao meio ambiente (RAMOS & RAMOS FILHO, 2008; LAGARINHOS, 2011).

O entendimento da Logística Reversa de Pneus é de suma relevância para que seja facilmente compreendida a importância de se possuir uma boa estrutura de destinação dos pneus, classificando-o e realizando a destinação de acordo com ela. Esta cadeia sendo aplicada vem prolongar a vida útil dos pneus e realizar uma destinação correta (MATTOSINHO & COSTA, 2009).



2.1.1. Ciclo do Pneu

Depois de pronto, o pneu sai da fábrica e vai para montadoras, lojas especializadas, borracharias e oficinas em geral. Nas ruas e nas estradas, a durabilidade desse importante componente do veículo varia conforme o seu uso, como as condições da estrada, o tempo de utilização, a realização de manutenção e imprevistos, como furo por pregos ou batidas. Algumas empresas afirmam ser de aproximadamente 5 a 6 anos.

O ciclo do pneu não termina quando ele deixa de ser usado no automóvel. Pelo contrário, quando esse item deixa de ser utilizado, é que começa uma das principais fases da vida do pneu, que é a sua destinação ambientalmente correta. Isso porque, devido à tamanha quantidade de pneus descartados de forma inadequada diariamente, esse componente se tornou um grave problema ambiental. Para atenuar essa situação, algumas empresas desenvolveram métodos para dar mais vida útil aos pneus, por meio da recapagem, da recauchutagem ou da remoldagem para pneus servíveis (SOUZA & GUIMARÃES, 2010).

Para fechar o ciclo do pneu, quando esses componentes não podem mais ser reformados, estes se caracterizam como pneus inservíveis vão para pontos de coleta. Depois, podem ter diferentes usos, como combustível para fornos de cimenteiras — devido ao alto poder calorífico —, solas de sapatos, dutos para águas da chuva, asfalto borracha e tapetes para automóveis (MOTA, 2008; RAMOS & RAMOS FILHO, 2008; LAGARINHOS, 2011). A Tabela 1 apresenta os principais termos deste ciclo.

Item	Descrição
Pneus Novos	Pneu de qualquer origem, que não sofreu qualquer uso nem foi submetido a qualquer tipo de reforma, não apresentando sinais de envelhecimento nem deteriorações.
Pneus em Uso	Pneu no mercado.
Pneus Usados	Pneu que foi submetido a qualquer tipo de uso e/ou desgaste, englobando os pneus servíveis e os inservíveis.
Pneu Servível	É exatamente aquele que se presta a reforma não deve ser encaminhado para a destinação final.
Pneu Inservíveis	Pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura, não se prestando mais à rodagem ou reformas.
Pneu Reformado	Pneu usado, que passou por um dos seguintes processos para reutilização de sua carcaça: Recapagem, Recauchutagem ou Remoldagem.
Recapagem	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem.
Recauchutagem	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem e dos seus ombros.
Remoldagem	Processo pelo qual um pneu é reformado pela substituição de sua banda de rodagem, dos seus ombros e de toda superfície de seus flancos. Este processo também é conhecido como recauchutagem de talão a talão.
Pontos de Coleta	Local definido pelos fabricantes e importadores de pneus para receber e armazenar provisoriamente os pneus inservíveis.

Tabela 1 – Principais definições da Logística Reversa de Pneus. Fonte: IBAMA (2017); MDIC/ INMETRO (2010); Lagarinhos (2011).



2.2 Legislação para Pneumáticos

Após a aprovação da Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 258/99, ocorreu um avanço significativo na reciclagem de pneus no Brasil, com o desenvolvimento de tecnologias para reutilização, reciclagem e valorização energética. Em 2009, foi aprovada a Resolução CONAMA nº 416/09 que muda a forma de cálculo para a reciclagem, de pneus produzidos para venda no mercado de reposição (LAGARINHOS & TENÓRIO, 2013): $MR = (P + I) - (E + EO)$. Sendo: MR – Mercado de Reposição; P – total de pneus produzidos; I – total de pneus importados; E – total de pneus exportados; e EO – total de pneus que equipam veículos novos (IBAMA, 2017).

A Resolução Conama nº 416/2009 estabelece que para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras devem dar destinação adequada a um pneu inservível, isto é, relação 1:1 (LAGARINHOS, 2011; LEITE, 2017; IBAMA, 2017).

O mercado de reposição é determinado a partir da declaração da produção e importação de pneus novos, realizados pelos fabricantes e importadores, além das exportações e do envio de pneus às montadoras de veículos.

Segundo a ABR, a Portaria 444 de 19 de novembro de 2010 regulamenta o segmento de reforma de pneus, no quesito segurança para a linha automóvel e comercial (caminhão/ônibus) com a sua adequação expirada em 19 de novembro de 2012, com fiscalização pelo IPEM (Instituto de Pesos e Medidas).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste estudo, para modelar a logística reversa de pneus no Brasil, utilizou-se a Dinâmica de Sistemas, abordagem que facilita o processo de modelagem e análise de *feedbacks*.

A abordagem da Dinâmica de Sistemas é definida como um conjunto de ferramentas utilizadas para estudar e compreender a estrutura e a dinâmica de sistemas altamente complexos com base na fundação da teoria de controle de feedback (FORRESTER, 1961, 1989; STERMAN, 2000).. Ela se concentra em entender como os processos físicos, os fluxos de informação e as políticas interagem de modo a criar a dinâmica entre as variáveis de interesse (VLACHOS, GEORGIADIS & IAKOVOU, 2007).

Assim, a Dinâmica de Sistemas busca simular o comportamento do sistema ao longo do tempo, representando a relação entre as variáveis chaves identificadas. Permitindo utilizar a Dinâmica de Sistemas para a tomada de decisão orientada a melhoria ou ainda, para a melhor compreensão de sistemas complexos (RASHWAN, ABO-HAMAD & ARISHA, 2015).

Com base nos passos propostos por Sterman (2000), abaixo apresenta-se o desenvolvimento da metodologia desta pesquisa:

(1) **Identificação do problema:** Neste passo, procurou-se entender a fundo a dinâmica do setor, com especial ênfase na caracterização dos fluxos de vendas, reforma e descarte ao longo do tempo. Os dados históricos foram coletados do IBAMA/CONAMA oriundos do Relatório de Pneumáticos de 2017, bem como da Associação do Segmento de Reforma de Pneus e da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP).



(2) **Construção do modelo:** Logo, construiu-se o modelo, seguindo a linguagem de estoques e fluxos da dinâmica de sistemas, e o software *Stella v.9.0*. Os diagramas de estoque e fluxo baseiam-se na matemática diferencial e na construção de sistemas de equações diferenciais que são resolvidos com a ajuda de *softwares* especializados como o STELLA (VAZ & MALDONADO, 2016). Estes diagramas são representações mais elaboradas da dinâmica de funcionamento dos sistemas, possibilitando que haja uma operacionalização no sistema, ou seja, a visualização de seu comportamento por meio de modelos de simulação computacional (ANDRADE, 1997).

(3) **Testes e verificação do modelo:** Utilizaram-se os dados coletados na fase (1) para validar a saída do modelo, procurando a calibração ou ajuste dos parâmetros mais críticos.

(4) **Formulação das políticas:** Por fim, foram analisados os impactos dos principais parâmetros na dinâmica do setor bem como foram quantificados os principais indicadores exigidos pela Legislação.

4. CONSTRUÇÃO DO MODELO

A Figura 4 mostra o modelo dinâmico desenvolvido, na linguagem de estoques e fluxos.

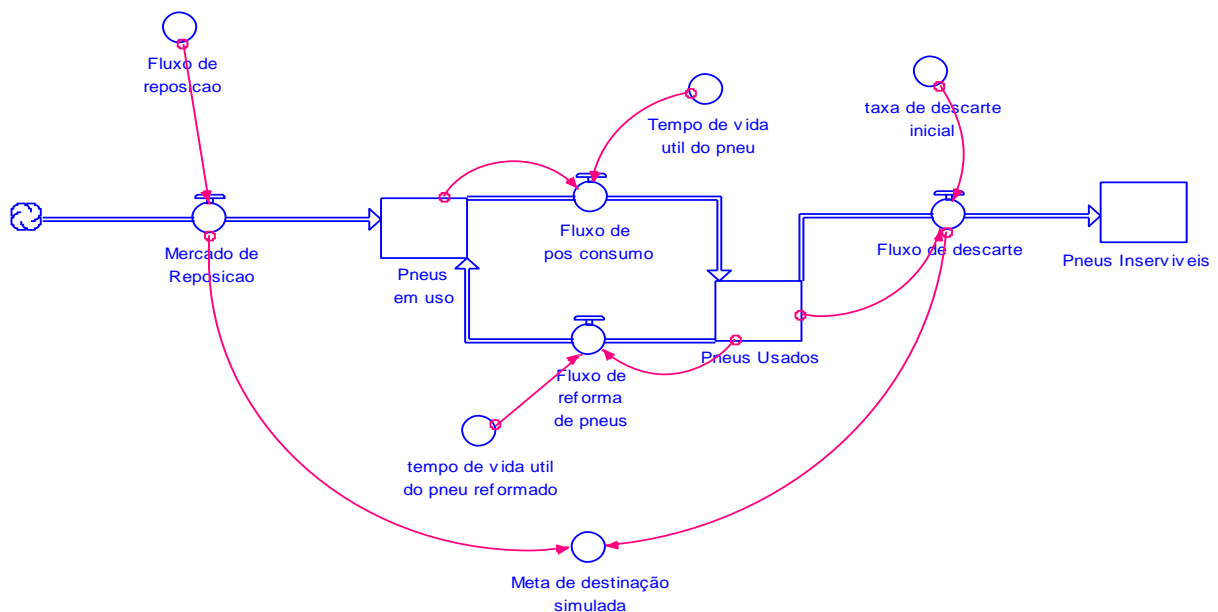


Figura 4 – Modelo dinâmico da Logística reversa de pneus no Brasil. Fonte: Autores.

Neste diagrama, é possível observar o início da cadeia logística da produção de pneus, na qual há um fluxo de entrada denominado “Mercado de Reposição” que é influenciado pela variável “Fluxo de Reposição”. Para esta variável, considerou-se como modo de referência o gráfico de mercado de reposição de pneus apresentado no Relatório de Pneumáticos 2017 do IBAMA/CONAMA, sendo assim, criou-se uma função gráfica que representasse esses dados.



Este fluxo de entrada (pneus novos) gera o estoque de “Pneus em Uso”, que serão consumidos por meio do “Fluxo de pós-consumo”, cuja a variável que está relacionada com esse fluxo é “o tempo de vida útil do Pneu”. Neste caso, pneus de boa qualidade tem uma quilometragem de vida útil esperada de um tempo médio de aproximadamente 5 anos. Para este fluxo, utilizou-se a Lei de *Little*.

Em seguida, é gerado o estoque de “Pneus Usados”. Este pode ter dois destinos, conforme mencionado na Tabela 1 desta pesquisa. Caso o pneu seja servível, ele entra no “Fluxo de Reforma de Pneus” e volta ao mercado, no modelo está caracterizado como estoque de “Pneus em Uso”. Para a variável “tempo de vida útil do pneu reformado” considerou-se o dobro da variável “tempo de vida útil de pneu”, portanto, o valor considerado foi de 10 anos. Para este fluxo, também se utilizou a Lei de *Little*.

No caso de pneus não serem mais passíveis de reforma, estes entram no “Fluxo de descarte”, que irão para o estoque de “Pneus Inservíveis”. O “Fluxo de descarte” é influenciado pela variável “Taxa de descarte inicial”. Para este fluxo, também se utilizou a Lei de *Little*.

Para o modelo, considerou-se uma variável intitulada de “Meta de Destinação Simulada”. Esta variável indica a proporção do fluxo denominado “Mercado de Reposição” e o “Fluxo de descarte”.

5. RESULTADOS

Com o diagrama elaborado deu-se início aos testes para compará-los com o sistema real. Com o diagrama de estoque e fluxo com o fluxo de pneus testado, obtiveram-se os resultados. Vale ressaltar que todos os testes do modelo foram projetados para o período de 2005 a 2030.

Conforme mostrado na Figura 5, tem-se o gráfico referente ao comportamento dinâmico dos estoques do modelo proposto, são eles: “Pneus em Uso” representado pela Linha 1 (Azul), “Pneus Inservíveis” representado pela Linha 2 (Vermelha) e “Pneus Usados” representado pela Linha 3 (Rosa).

Para o teste do primeiro cenário, os valores admitidos para esses estoques foram: de 50 milhões de unidades para “Pneus em Uso” (IBAMA, 2017), 17.800.00 unidades de pneus para o estoque “Pneus Reformados” (ABR, 2018) e de 27.200.000 unidades de pneus para o estoque de “Pneus Inservíveis” (LAGARINHOS, 2011).

Nota-se na Figura 5, que o estoque de “Pneus em uso” é acompanhado pelo de “Pneus Usados”. Por sua vez, o estoque de “Pneus Inservíveis” acontece um acúmulo e seu comportamento é de uma curva exponencial, ressaltando assim a importância de Políticas rigorosas para o descarte e destinação ambientalmente correta para este tipo de produto que é considerado como um passivo ambiental, de modo que não ocasione um desequilíbrio ecológico e ambiental, tendo em vista suas peculiaridades de durabilidade, quantidade, volume e peso (PESSOA e PESSOA, 2017).

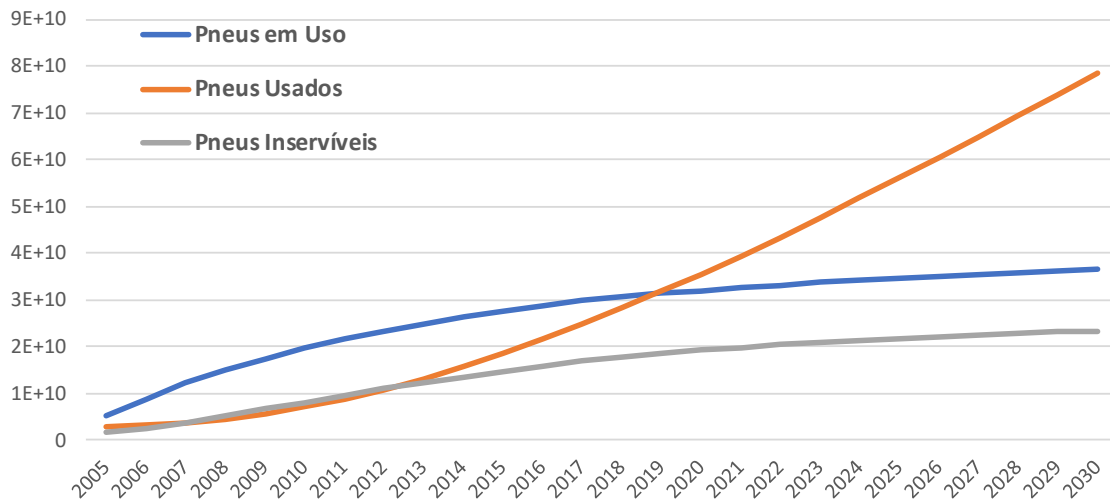


Figura 5 – Gráfico representativo do comportamento dos estoques de modelo proposto. Fonte: Autores.

Na Figura 6, tem-se o gráfico concernente ao comportamento dinâmico dos fluxos do método proposto, são eles: “Fluxo de reposição”, “Fluxo de Pós-consumo”, “Fluxo de reforma de pneus e “Fluxo de descarte”. Conforme mencionado anteriormente, o “Fluxo de Reposição” é uma variável que influencia no fluxo intitulado “Mercado de Reposição”, para esta variável atribuiu-se uma função gráfica com base no “Gráfico de evolução do mercado de reposição em 2016 (unidades de pneus novos)” oriundo do Relatório de Pneumáticos (IBAMA, 2017).

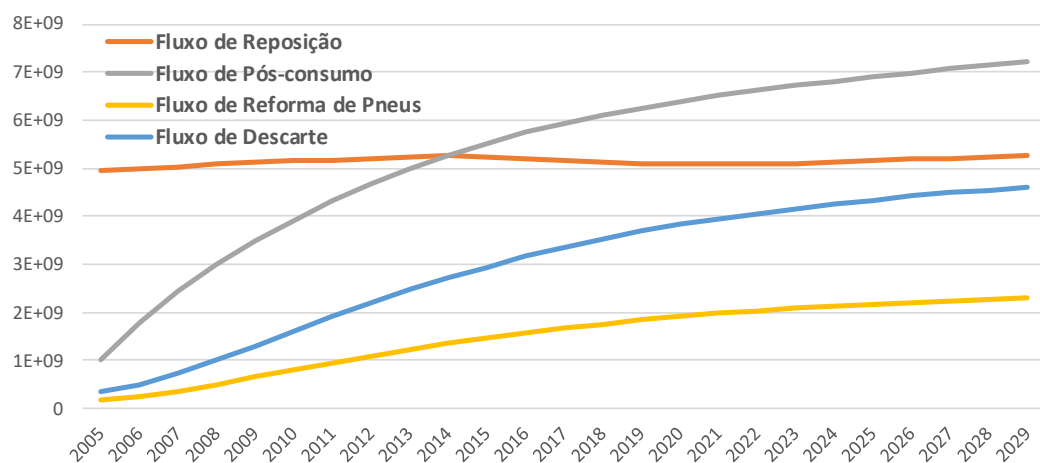


Figura 6 – Gráfico representativo dos fluxos de reposição, reforma de pneus e descarte para uma taxa de descarte de 20%. Fonte: Autores.

Tanto para o “Fluxo de reforma de pneus” e “Fluxo de descarte” atribuiu-se a Lei de *Little*. A fórmula que representa o “Fluxo de reformas de pneus” é: $\frac{\text{Pneus em uso}}{\text{Tempo de vida útil do pneu}}$. Já o “Fluxo de descarte” é representado pela fórmula: ***Pneus usados X Taxa de descarte inicial***.



Para este primeiro cenário, considerou-se como a “taxa de descarte inicial” sendo de 20%. Consta-se pela Figura 6, que o “Fluxo de Reposição” é maior que os demais, porém o “Fluxo de Reforma de pneus” e “Fluxo de descarte” acompanham o primeiro.

O comportamento da variável “Meta de destinação simulada” pode ser observado na Figura 7. Comparando este gráfico com o sistema real, nota-se similaridade.

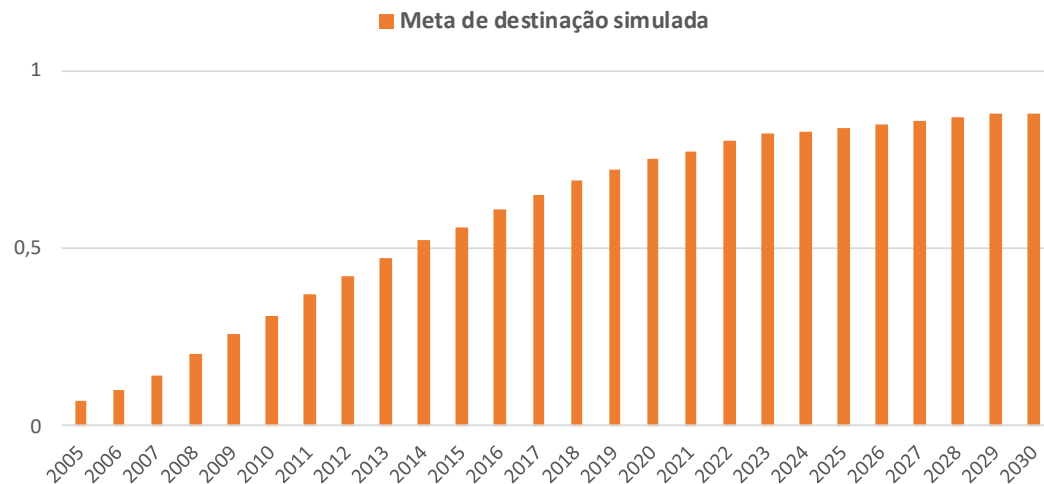


Figura 7 – Gráfico representativo da variável “Meta de Destinação simulada”. Fonte: Autores.

No sistema real, este indicador demonstra a relação (proporção) entre a meta de destinação de pneus inservíveis, a ser cumprida pelos importadores e fabricantes de pneus novos, e o quantitativo de pneus inservíveis efetivamente destinado no Brasil, em conformidade com a Resolução CONAMA nº 416, de 2009. Ademais, este indicador dá suporte à tomada de decisão para implementação e aperfeiçoamento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (IBAMA, 2017). Nota-se pelo gráfico que a variável aponta para um aumento no descarte de pneus inservíveis nos últimos anos.

Além do cenário base, considerou-se um segundo cenário, cujo os valores das variáveis “tempo de vida útil do pneu” e “tempo de vida útil do pneu reformado” foram modificados para, respectivamente, 10 e 12 anos. Vale ressaltar que os demais valores foram mantidos iguais ao cenário base. Esta modificação foi realizada com intuito de comparar com o cenário base. Na Figura 8, observa-se que com a modificação, os estoques de “Pneus em Uso” e “Pneus Usados” ampliaram.

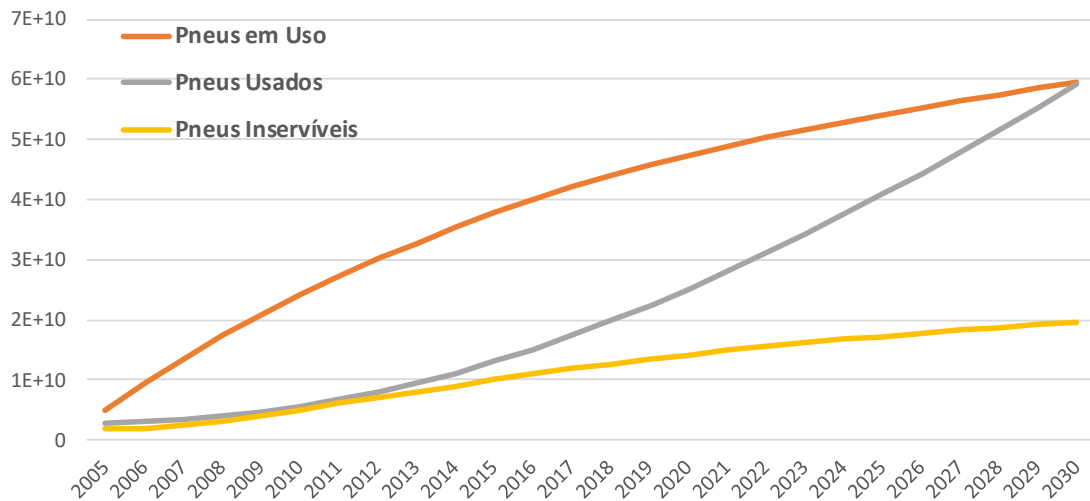


Figura 8 – Gráfico representativo do comportamento dos estoques para o segundo cenário. Fonte: Autores

A Figura 9 representa o gráfico de fluxos do modelo para o segundo cenário proposto. Com a modificação, nota-se que o “Fluxo de Pós-consumo” ampliou em relação ao gráfico de fluxo do cenário base, apresentado na Figura 6, devido ao aumento das variáveis de tempo no modelo.

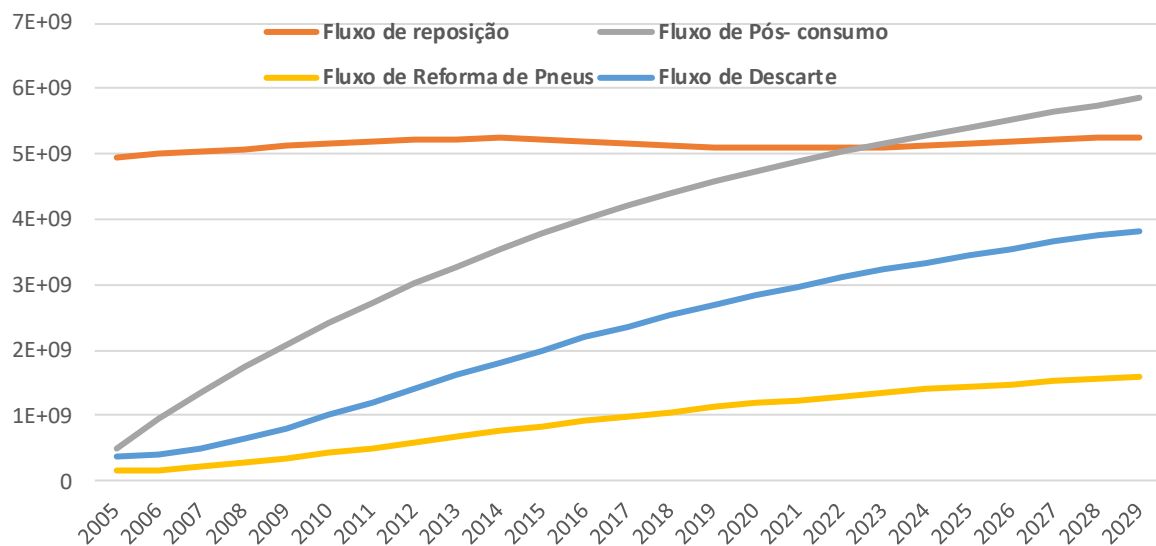


Figura 9 – Gráfico representativo do comportamento dos fluxos para o segundo cenário. Fonte: Autores

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Esta pesquisa procedeu-se a sua formalização em linguagem de Dinâmica de Sistemas, auxiliados pelas ferramentas empregadas na construção do modelo com auxílio do *software Stella*. As estruturas básicas para o desenho do diagrama são os estoques e os fluxos.



O modelo desenvolvido neste trabalho é um valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento do mercado de pneus. O modelo apresentou confiabilidade em sua simulação, ao apresentar comportamento semelhante ao sistema real.

Essas informações podem ser utilizadas na gestão integrada e no gerenciamento ambientalmente adequado de outros resíduos sólidos e servir como modelo para outros produtos sujeitos à logística reversa. Uma vez que o pneu sempre foi um problema para o meio ambiente porém, a partir dos anos 90, com o aumento progressivo da utilização de carros e caminhões é que o Brasil percebeu o grande impacto ambiental causado pelo descarte dos pneus, que após atingir o desgaste completo, ele se torna inservível (FLORIANI, FURLANETTO E SEHNEM, 2015; IBAMA, 2017).

Pelas características e premissas da Dinâmica de Sistemas, a Logística Reversa apresenta-se como uma oportunidade potencial de pesquisas futuras, utilizando as ferramentas da dinâmica de sistemas. A partir desta pesquisa e da experiência de sua realização, propõem-se novos trabalhos, que possam ser executados no sentido de ampliar os horizontes por meio de estudos mais específicos, direcionados a esta abordagem. Dessa forma, destacam-se algumas recomendações para avançar ou complementar este trabalho:

- Adicionar variáveis ao modelo, com um intuito de ter um maior detalhamento do processo de Logística Reversa de Pneus, considerando a aplicação de dados mais realistas;
- Direcionar o modelo para uma frota específica de veículos, visto que o acréscimo de veículos no mercado está relacionado com o fluxo de reposição de pneus;
- Especificar os tipos de reforma de pneus bem como os possíveis tipos de destinação de pneus inservíveis;
- Acrescentar categorias de análise ao modelo, tais como custos, impacto ambiental, entre outras;
- Adaptar o modelo a outros países em desenvolvimento, países que precisam integrar o setor informal na gestão de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

- ABR. Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus. Retrieved: 02 Março, 2018. (available at <http://www.abr.org.br/dados.html>)
- Andrade, A. L. (1997). Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional. REAd-Revista Eletrônica de Administração, 3(1), 1-30.
- Bartholomeu, D. B., & Caixeta-Filho, J. V. (2011). Logística ambiental de resíduos sólidos. São Paulo: Atlas.
- Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. In Proceedings of the 22nd international conference of the system dynamics society (Vol. 22). System Dynamics Society Oxford.
- Brasil (2012). [Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010]. Política nacional de resíduos sólidos [recurso eletrônico]. – 2. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara. 73 p. – (Série legislação; n. 81).
- Camiletti, G. & Ferracioli, L. (2001). A utilização da modelagem computacional quantitativa no aprendizado exploratório de física. Cadernos Catarinenses de Ensino de Física, v. 18, n. 2, p. 214-228
- Chang, N. B. (2008). Economic and policy instrument analyses in support of the scrap tire recycling program in



Taiwan. *Journal of environmental management*, 86(3), 435-450.

- Christófani, M. P. H.; Fioriti, C. F.; Tsutsumoto, N. Y.; Martins, J. F. A. (2017). Aspectos ambientais sobre pneus inservíveis. *Revista Iniciação científica, Tecnológica e Artística, Edição Temática em Sustentabilidade*, n. 7., v. 1.
- Fagundes, L. D. (2017). *Simulação a Eventos Discretos para Apoio à Decisão na Logística Reversa de Pneus Inservíveis em Consórcio de Cidades*. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá.
- Ferguson, M. E., & Souza, G. C. (eds.). (2016). *Closed Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Partners*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European journal of operational research*, 103(1), 1-17.
- Floriani, M. A., Furlanetto, V. C., & Sehnem, S. (2016). Descarte sustentável de pneus inservíveis. *Navus-Revista de Gestão e Tecnologia*, 6(2), 37-51.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics (Vol. 2)*: MIT press Cambridge, MA.
- Forrester, J. W. (1989). *The Beginning of System Dynamics*, 49 Bedford Road, Lincoln, MA, USA: System Dynamics Society. 16 pp. An address at the International Meeting of the System Dynamics Society, Stuttgart, Germany.
- Forrester, J.W (2011). Research: pioneers and innovators. In: ASSAD A.A. & GASS S.I. (eds.). *Profiles in Operations Research*. New York: Springer. p. 363-386
- Georgiadis, P., & Vlachos, D. (2004). *Decision making in reverse logistics using system dynamics*. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 14(2), 259-272.
- Ghisolfi, V., Chaves, G. D. L. D., Siman, R. R., & Xavier, L. H. (2017). *System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers*. *Waste Management*, 60, 14-31.
- Golroudbary, S. R., & Zahraee, S. M. (2015). *System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 88-102.
- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. (2017). "Relatório de Pneumáticos. Dados apresentados no Relatório de Pneumáticos - Resolução CONAMA nº 416/09 do Cadastro Técnico Federal", IBAMA, Brasília, 80p.
- Kannan, D., Diabat, A., & Shankar, K. M. (2014). Analyzing the drivers of end-of-life tire management using interpretive structural modeling (ISM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(9-12), 1603-1614.
- Karnopp, D.C., Margolis, D.L., Rosenberg, R.C. (2012). *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. John Wiley & Sons, New York.
- Lagarinhos, C. A. F. (2011). *Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo)*.
- Lagarinhos, C. A. F., & Tenório, J. A. S. (2008). Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. *Polímeros*, 18(2), 106-118.
- Lagarinhos, C. A., & Tenório, J. A. (2013). Reverse logistics for post-consumer tires in Brazil. *Polímeros*, 23(1), 49-58.
- Lund, H. F. (1992). *The McGraw – Hill recycling handbook*. New York: McGraw – Hill, New York, United States, cap.18.
- Maldonado, M. U. & VAZ, C. R. (2016). *Contribuições da Dinâmica de Sistemas na Engenharia de Produção*:



Áreas Potenciais de Pesquisa. In: Anais do XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. João Pessoa/PB, Brazil.

- Mattosinho, C. M. D. S., & Costa, F. E. D. O. (2009). Cadeia reversa dos pneus de carga inservíveis: impactos nos custos operacionais e ao meio ambiente. Anais... XII SEMEAD–Seminários em Administração: Empreendedorismo e Inovação, 27.
- MDIC. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial -. Inmetro. (2010). Procedimento de Fiscalização – Pneus Reformados/ Portarias Inmetro 227/2006 e 444/2010 (MDIC/IMMETRO). available at http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/928/1/pneus_reformados%5B1%5D.pdf
- Motta, F. G. (2008). A cadeia de destinação dos pneus inservíveis - o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. Ambiente & sociedade, 11(1).
- Pessoa, J. O., & Pessoa, J. O. (2017). Avaliação do Sistema de Logística Reversa de Pneus Inservíveis no sul do Amazonas. Revista Foco, 10(1), 221-237.
- Pneus & Cia. (2017). A Importância da Reforma de Pneus para o a economia e meio ambiente. Publicação bimestral do Sindipneus. Ano 9; nº 60; novembro/dezembro 2017.
- Powell, J. H., & Swart, J. (2005). This is what the fuss is about: a systemic modelling for organisational knowing. Journal of Knowledge Management, 9(2), 45-58.
- Ramos, K. C. S., & Ramos Filho, L. S. N. (2008). A logística reversa dos pneus inservíveis. Anuário da produção Acadêmica Docente, 2, 91-103.
- Rashwan, W., Abo-Hamad, W., & Arisha, A. (2015). A system dynamics view of the acute bed blockage problem in the Irish healthcare system. European Journal of Operational Research, 247(1), 276-293.
- Rogers, D. S., Melamed, B., & Lembke, R. S. (2012). *Modeling and analysis of reverse logistics*. Journal of Business Logistics, 33(2), 107-117.
- Souza, M. N., Mantovani, E. C., González, A. M. G. O., Sánchez-Román, R. M., & Silva, M. A. A. (2010). Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa STELLA dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 1(1), 16-42.
- Souza, T. F. & Guimarães, T. A. (2010). Escolha e Utilização de um Modelo de Previsão de Demanda em Serviços: Estudo de Caso em uma empresa prestadora de serviços de recapagem de pneus. In: Anais de XXX ENEGEP Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Carlos SP, Brazil.
- Sterman, J. D. (2000). Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world (Vol. 19): Irwin/McGraw-Hill Boston.
- Tibben-Lembke, R. S., & Rogers, D. S. (2002). *Differences between forward and reverse logistics in a retail environment*. Supply Chain Management: An International Journal, 7(5), 271-282.
- Vaz, C. R. & Maldonado, M. U. (2017). Logística Reversa: Definições, Conceitos e suas Peculiaridades. Ed. UFSC: Florianópolis, 130 p.
- Vaz, C. R., Inomata, D. O., & Maldonado, M. U. (2016). Aplicações de dinâmica de sistemas na logística reversa: uma análise bibliométrica. GEPROS: Gestão da Produção, Operações e Sistemas, 11(4), 101.
- Viana, L. O., & De Oliveira, F. C. (2009). A Cobertura Logística para o Tratamento de Pneus Inservíveis. XXIX ENEGEP: Encontro Nacional De Engenharia De Produção. Salvador – BA.
- Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. Computers & Operations Research, 34(2), 367-394.