

## **CICLO DE VIDA DO PNEU NO SETOR DE TRANSPORTE PESADO: UM MODELO DINÂMICO**

**Thomas A. Paccola Tobler**

**Caroline Rodrigues Vaz**

**Mauricio Uriona Maldonado**

Universidade Federal de Santa Catarina.

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas

### **RESUMO**

O modal mais utilizado em toda extensão do território nacional é o transporte rodoviário, que vem em ascensão desde políticas executadas na década de 50. O transporte de carga em dimensões continentais como Brasil gera inúmeros desafios, principalmente pelo fato de perder eficiência com a falta de condições de estradas e não possuir malhas ferroviárias compatíveis com o tamanho do país, além de porto arcaicos. Um reflexo direto das condições das estradas é justamente nos pneus que os veículos utilizam e problemas ambientais oriundos do descarte incorreto de pneus. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência de três políticas no volume de reforma e destinação de pneu. A metodologia utilizada para testar e analisar o modelo foi da dinâmica de sistemas. Com base nas três políticas estudadas, diversos cenários foram analisados e discutidos.

### **ABSTRACT**

Road transportation is the most use mode in Brazil due to the country's policy framework since the 1950s. Freight transportation creates several challenges in a country with continental size as Brazil, mainly due to lack of road quality and delays in the growth of the road network. A direct issue of road quality is the tire over consumption and the related environmental problems due to inadequate disposal. The main objective of this work is to analyze the influence of three policies on the volume of refurbished tires and disposal. System dynamics modeling is used to build a simulation model to test those policies. Based on them, several scenarios are analyzed and discussed.

## **1 INTRODUÇÃO**

Diante da pressão pública e legal para que as empresas reduzam os diversos impactos ambientais que suas atividades, processos e produtos têm causado ao meio ambiente, destaca-se o impacto causado pelo descarte inadequado de pneus em fim de vida, chegando a demorar até 600 anos para se decompor Lagarinhos & Tenório (2013).

Este problema se agrava, dada a elevada quantidade de pneus produzida. De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP foram produzidos cerca de 67,8 milhões de pneus no Brasil e vendidos por volta de 70,9 milhões (inclui importação) no ano de 2017. Em termos globais, as estatísticas mostram que mais de 17 milhões de toneladas de pneus inseríveis são gerados anualmente Simic & Dabic-Ostojic (2017); Yadollahinia et al. (2018).

Formas de aproveitar ou reaproveitar os pneus em fim de vida pode ajudar a diminuir o descarte exagerado. É nesta linha que o artigo se insere, trazendo como principal contribuição o estudo do ciclo de vida do pneu no Brasil, desde uma ótima sistêmica. Contudo, dada a recência da legislação orientada à reforma de pneus, pouco se sabe sobre o impacto das políticas que visem o melhor resultado. Assim, o objetivo do trabalho foi analisar a influência de três políticas no

volume de reforma e destinação de pneu.

Para isto é utilizado um modelo de simulação que identifica os principais estoques do ciclo de vida, sendo o de pneus novos, de servíveis, de reformados e o de inservíveis bem como os fluxos que os conectam. Embora vários aspectos possam ser considerados para análise, o artigo foca no impacto das políticas acima citadas tanto na reforma de pneus por ano quanto na destinação em toneladas por ano.

## 2 CICLO DE VIDA DO PNEU

O pneu é um componente imprescindível ao funcionamento dos veículos por ser o ponto de contato com o solo. Desde que foi criado, no século XIX, passou por muitas mudanças até atingir a tecnologia atual.

O ciclo de vida inicia com o pneu novo saindo da fábrica para as montadoras, lojas especializadas, borracharias e oficinas em geral. A durabilidade do pneu em uso varia conforme as condições da estrada, o tempo de utilização, a realização de manutenção e imprevistos, como furo por pregos ou batidas. Além das condições externas que os pneus estão sujeitos, a durabilidade fornecida pelos fabricantes é de quilometragem, ou seja, não há como dizer tempo de vida útil, e sim estimativas de acordo com perfil do usuário.

Com o uso prolongado, a superfície do pneu ou do piso se desgasta e tende a ficar plana como resultado de estar em contato com a superfície da estrada. Isso torna o pneu inadequado para uso em estrada devido à redução do desempenho e aderência do freio. O revestimento dos pneus retornados é menos provável de ter danos significativos. Assim, existem oportunidades para substituir o piso gasto por um novo e reduzir o desperdício. Além disso, a produção de pneus novos consome quatro vezes mais materiais do que a produção de pneus reformados. O uso de energia para a produção de um pneu novo é três vezes maior do que para um pneu reformado. Portanto, a reforma é fundamental para reduzir o desperdício e o consumo de matéria-prima para a fabricação de pneus Pedram et al. (2017).

Segundo a Associação Brasileira de Reforma (ABR), o pneu reformado possui rendimento quilométrico semelhante ao pneu novo. O valor é 75% mais econômico para o consumidor e apresenta uma redução de 57% no custo/km para o setor de transporte, em média de 7 bilhões de reais/ano, permitindo a maximização do retorno sobre investimento em pneus. Próximo de dois terços dos pneus de caminhões ou ônibus que circulam pelo país são reformados. A reforma é ecologicamente correta, sendo que emprega apenas 20% do material utilizado na produção de um pneu novo, proporcionando a mesma durabilidade original e postergando a destinação final da carcaça reduzindo os impactos ambientais, não sendo ela uma atividade poluidora e seus resíduos sólidos são reciclados por outras atividades.

Para fechar o ciclo, quando esses componentes não podem mais ser reformados, estes se caracterizam como pneus inservíveis e são encaminhados 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 Ramos & Ramos Filho (2008); Lagarinhos (2011).

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.

Uma grande dificuldade que se encontra no trato dos pneus inservíveis é a coleta dos mesmos que estão espalhados por todo território nacional, quase sempre em lugares impróprios para sua armazenagem.

Para os tipos de processamento descritos acima muitas vezes, é necessária a transformação do pneu inservível em lascas ou chips, por meio da trituração. As empresas trituradoras coletam ou recebem pneus inteiros, radiais e convencionais, bem como os resíduos de borracha provenientes do processo de laminação.

### 3 METODOLOGIA

O método usado para realizar a construção do modelo foi a Dinâmica de Sistemas, que tem por objetivo estudar e compreender a estrutura e a dinâmica de sistemas altamente complexos com base na fundação da teoria de controle de *feedback* Forrester (1997); Sterman (2000). Ela se concentra em entender como os processos físicos, os fluxos de informação e as políticas gerenciais interagem de modo a criar a dinâmica das variáveis de interesse Vlachos et al. (2007) a partir da notação de estoques e fluxos.

Os estoques acumulam ou integram seus fluxos e o fluxo líquido para o estoque é a taxa de mudança do estoque. Sterman (2000) afirma que qualquer sistema de equações integrais ou diferenciais podem ser construídas o estoque correspondente e o mapa de fluxo. Sendo assim, a partir de qualquer mapa de estoque e fluxo, pode ser gerado o sistema de equações integral. A função integral representa o conceito de que a ação acumula suas entradas menos suas saídas, começando com valor inicial de estoque, a Equação 1 apresenta um exemplo de uso da notação.

$$Estoque(t) = \int [Entrada(s) - Saida(s)] ds + Estoque(t_0); \quad (1)$$

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

1. Entendimento do ciclo de pneus e seus entraves, explanado no Capítulo 2
2. Construção do modelo, a partir da formalização em equações, parâmetros e condições iniciais (Capítulo 4)
3. Validação do modelo, a partir da comparação com dados históricos, analisando se os desvios são aceitáveis ou não. Para avaliar os erros de previsão foram utilizados quatro métricas: Desvio Médio Absoluto (MAD), Média Percentual Absoluta do Erro (MAPE), Raiz do Quadrado Médio do Erro (RMSE), e Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )
4. Formulação e avaliação de políticas orientadas ao incremento da destinação de pneus, que será abordado no Capítulo 5. Três políticas serão analisadas. Estas políticas visam o melhor resultado possível quanto à reforma e destinação de pneus em fim de vida.

- (a) A mudança no parâmetro “Taxa venda máxima”, no qual representa um teto máximo que o mercado pode suprir. A alteração é realizada tanto positivamente e negativamente, trazendo caso de aumento ou diminuição de uso do pneus ao longo do próximos anos.
- (b) A mudança de parâmetro “Taxa de reforma”, tomando base as mudanças que os acessórios podem trazer para a durabilidade da vida do pneu, sendo assim, também será tratado tanto a diminuição da reforma, ou seja, melhora eficiência do pneu com a aquisição de um novo com tecnologia avançada, e tanto aumento do mesmo para obter comportamento do modelo e a não adesão da política de incentivos a acessórios.
- (c) A mudança no parâmetro “Eficiência da destinação”, política que representa o incremento de eficiência dos processos de destinação.

Salienta-se que os critérios para a escolha das políticas acima citadas relacionam-se com as ações de curto e meio prazo que seriam viáveis de implementar, considerando a infraestrutura, legislação e ações dos Governos Federal e Estadual.

## 4 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

### 4.1 Descrição das equações do modelo

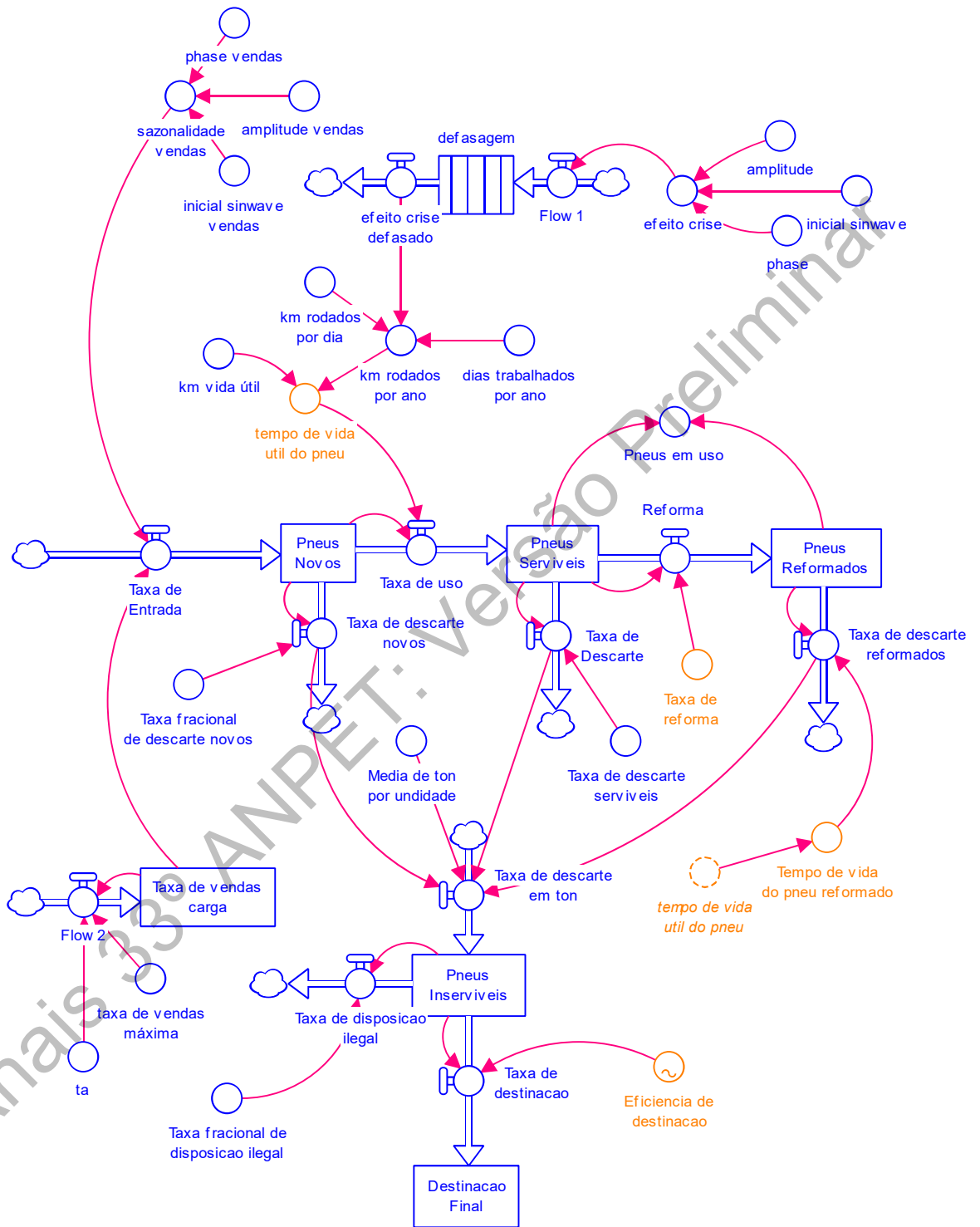
O modelo no qual visa o entendimento do ciclo de pneu de carga está descrito na Figura 1, entende-se que o mercado é dinâmico e volátil, podendo assim ter interferências de fatores externos que são levados em conta para a simulação e calibração. Dentro do modelo e estruturas, possui três submodelos a serem analisadas, sendo elas a parte de entrada de pneus no mercado, classificado como “Pneus Novos”, os pneus que são destinados à reforma, que voltarão ao uso, descrito como “Pneus Reformados” e também a saída do modelo, que será a destinação final de pneus que não são mais servíveis para o mercado, estando categorizado de “Pneus Inservíveis”. A “Taxa de vendas carga” carrega com si o ajuste da “Taxa de vendas máxima” que o mercado comporta, sendo assim é definido como:

$$\text{Taxa de vendas carga}(t) = \int [\text{Fluxo } 2(t) - \text{Taxa de entrada}(t)] dt + \text{Taxa de vendas carga}(t - dt); \quad (2)$$

Na sequência, o modelo depois de carregar a “Taxa de Entrada”, continua o fluxo do ciclo do pneu considerando os “Pneus Novos” no qual é definido por:

$$\text{Pneus novos}(t) = \int [\text{Taxa de entrada}(t) - \text{Taxa de uso}(t)] dt + \text{Pneus novos inicial}(t - dt); \quad (3)$$

Na sequência, apresenta a modelagem de pneus reformados. Seu ciclo vem carregado da taxa de uso e seu estoque inicial, classificado de “Pneus Servíveis”, que serão os pneus que estão aptos à reforma, em uso ou eventualmente descartado, no qual é definido por:



**Figura 1:** Modelo de Estoque e Fluxo. Fonte: Autores.

$$Pneus\ serviveis(t) = \int [Taxa\ de\ uso(t) - Reforma(t) - Pneus\ uso(t) - Taxa\ de\ descarte(t)]dt + Pneus\ serviveis\ inicial(t - dt); \quad (4)$$

A "taxa de descarte" é dada por:

$$Txd = Pneus\ Serviveis * Taxa\ de\ descarte\ serviveis \quad (5)$$

A "Taxa de descarte reformados" é dada por:

$$Txd_r = Pneus\ Reformados / Tempo\ de\ vida\ do\ pneu\ reformado \quad (6)$$

O "Tempo de vida do pneu reformado" é acrescido de 10% do valor do "Tempo de vida útil do pneu", de acordo com catálogos e entrevista com profissionais na área.

Por fim, os "Pneus Reformados" são os pneus nos quais são encaminhados para "Reforma" com sua respectiva "Taxa de reforma", tendo em vista que uma parte está em uso e outra para descarte, assim a fórmula do estoque de reforma é dada por:

$$Pneus\ reformados(t) = \int [Reforma(t) - Pneus\ em\ uso(t) - Taxa\ de\ descarte\ reformados(t)]dt + Pneus\ reformados\ inicial(t - dt); \quad (7)$$

O fechamento do ciclo se dá quando o pneu não é mais servível, sendo ele assim corretamente ou incorretamente descartado (pneu ainda servível e descartado). A "Taxa de descarte em ton" traz o descarte ao longo do ciclo inteiro, vindo dos Pneus novos, servíveis para reforma porém não reformados, e pneus reformados nos quais depois de utilizado são destinados ao descarte. Como a base de dados é em toneladas, usa-se o parâmetro "Media de ton por unidade" para conversão de unidades pneu em toneladas. A "Taxa de descarte em ton" é dada por:

$$Txd\ ton = (Taxa\ de\ Descarte + Taxa\ de\ descarte\ novos + Taxa\ de\ descarte\ reformados) * Media\ de\ ton\ por\ unidade \quad (8)$$

O estoque "Pneus Inservíveis" é dado por:

$$Pneus\ Inserviveis(t) = \int [Taxa\ de\ descarte\ em\ ton(t) - Taxa\ de\ disposio\ ilegal(t) - Taxa\ de\ destino(t)]dt + Pneus\ Inserviveis\ inicial(t - dt); \quad (9)$$

## 4.2 Validação

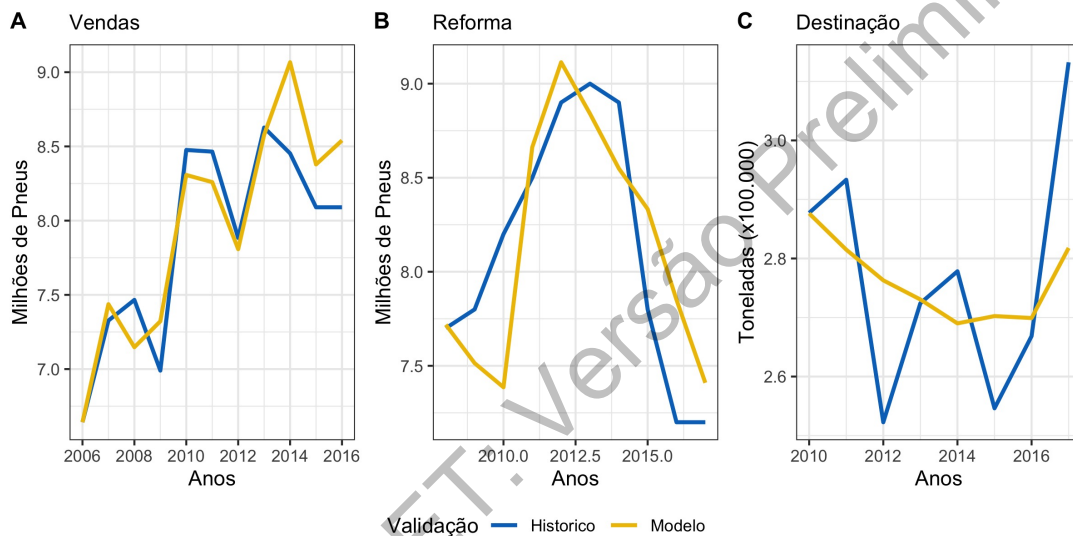
Inicialmente, foi realizada a verificação da validade do modelo, comparando os dados históricos com os resultados obtidos do modelo. A Tabela 1 apresenta as métricas MAD, MAPE,



RMSE e  $R^2$ , todas adequadas para este tipo de modelos. Já a Figura 2 apresenta visualmente a comparação entre os dados históricos e o modelo.

**Tabela 1:** Métricas de validação para vendas, reforma e destinação.

Métrica	Vendas	Reforma	Destinação
MAD	237.512	340.020	11.946
MAPE	2,99%	4,27%	4,29%
RMSE	296.293	414.517	15.963
R2	0,838	0,615	0,395



**Figura 2:** Venda setor de carga - cenário base x real. Fonte: Autores.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Descrição dos Cenários

A **primeira política** visa apresentar a mudança no parâmetro "Taxa venda máxima", no qual representa um teto máximo que o mercado pode suprir. A alteração é realizada tanto positivamente e negativamente, trazendo caso de aumento ou diminuição de uso do pneus ao longo do próximos anos.

Os veículos de carga compõem cerca de 4% da frota total de veículos, mas participam com 50% na emissão de dióxido de carbono (Ministério Meio Ambiente, 2014), o que revela o grande potencial emissor no setor de transporte de cargas e passageiros. Embora sejam grandes responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, têm grande representatividade na economia, com forte correlação com o Produto Interno Bruto (PIB) do país.

As rodas de liga leve são um promissor acessório em busca de maior eficiência energética, pois apresentam muitas vantagens em relação às de aço, mas têm uma grande desvantagem: o preço. Custam cerca de três vezes mais que as concorrentes, embora promovam redução em 3% do

consumo do veículo, maior dissipação de calor, conseqüentemente melhor eficiência dos freios, redução do consumo de pneus em até 10% e aumento da capacidade de carga em até 1 tonelada, pois são 50% mais leves do que as rodas de aço ALCOA (2016).

O mesmo se dá para os chamados "pneus verdes" (borracha S-SBR e tecnologia sílica/silano) comprovaram oferecer uma resistência ao rolamento significativamente menor resultando em uma redução de 5% no consumo de combustível e, conseqüentemente, emitindo menos CO<sub>2</sub>. Além disso, eles oferecem melhor aderência – especialmente em condições de pistas molhadas – enquanto apresentam uma durabilidade comparável. Como diferencial, o produto promete durabilidade até 20% superior à concorrência dos pneus convencionais (borracha E-SBR, com negro de fumo apenas) RMAI (2017).

O **segunda política** tem a mudança de parâmetro "Taxa de reforma", tomando base as mudanças que os acessórios podem trazer para a durabilidade da vida do pneu, sendo assim, também será tratado tanto a diminuição da reforma, ou seja, melhora eficiência do pneu com a aquisição de um novo com tecnologia avançada, e tanto aumento do mesmo para obter comportamento do modelo e a não adesão da política de incentivos a acessórios.

Segundo o IBAMA 2017, uma das principais inovações da Resolução CONAMA 416/2009 é a obrigatoriedade de implementação de pontos de coleta de pneus inservíveis nos municípios com população acima de cem mil habitantes. Estes pontos podem ser implementados de forma individual ou compartilhada, podendo envolver os pontos de comercialização de pneus, os municípios, os borracheiros, dentre outros.

A Reciclanip é uma entidade cujo objetivo é coletar e destinar de forma ambientalmente adequada os pneus que não podem mais ser usados para rodagem. Ela foi criada em 2007 para consolidar o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, criado em 1999 pela ANIP. No Brasil, os fabricantes de pneus novos, representados pela ANIP, arcam com todos os custos de coleta e destinação dos pneus inservíveis, como transporte, trituração e destinação.

Após coletado, o pneu vai para trituração e pode ser reaproveitado de diversas formas, como combustível alternativo para as indústrias de cimento ou para combustível de caldeiras, na fabricação de asfalto ecológico, solados de sapato, em borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais e tapetes para automóveis.

O **terceira política** traz a mudança do parâmetro "Eficiência de destinação", ao longo da última década houve o alcance da meta de acordo com a produção realizada pelas empresas, entretanto sabe-se que essa abordagem e meta está sendo seguida a partir de 2009 com a nova Resolução, sendo assim, muitos pneus inservíveis estão espalhados pelo país. As simulações são feitas com cenários positivos representando as crescentes políticas de destinação dos pneus produzidos, e cenários negativos por não conseguir suprir os pneus acumulados de décadas anteriores.

## 5.2 Política de eficiência do uso do pneu

Para o primeiro cenário, foi realizado aumento e diminuição da "Taxa de vendas máxima". Sendo assim, foi feita simulação com aumento e decréscimo de 15% e 30% representados pelo valor de 1.500.000 e 3.000.000 unidades respectivamente. O comportamento do "Fluxo 2" é



avaliado na figura por ser influenciado diretamente pelo parâmetro modificado. É possível também observar como a função utilizada causa a perturbação no modelo.

O decaimento logarítmico se deve ao fato de ter o parâmetro "ta", tempo de ajuste, para calibração do modelo. Essa influência é percebida na "Taxa de entrada" em seu comportamento senoidal, com o Fluxo 2 tendendo a 0, a "Taxa de entrada" se estabiliza, por isso, quando há a adição na "Taxa de vendas máxima", o modelo continua tendo uma "Taxa de entrada" crescente. Já na subtração do parâmetro, o modelo estabiliza antes, por ter forçado o "Fluxo 2" tender a 0.

As Figuras 3A e 3B mostram o comportamento dos quatro cenários e o cenário base (BAU).

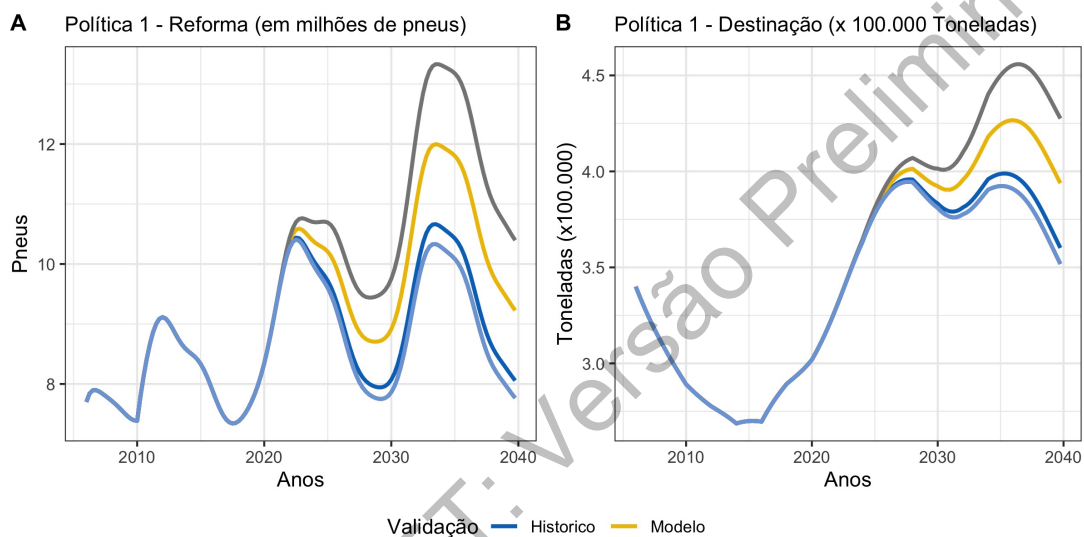


Figura 3: Resultados da Política 1. Fonte: Autores.

### 5.3 Política de reforma

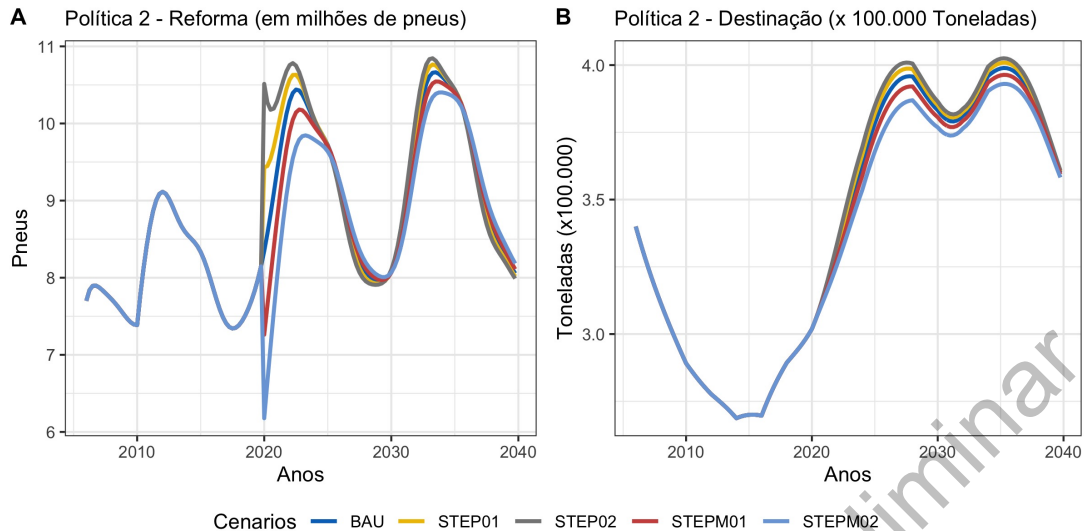
Para o segundo cenário, foi realizado aumento e diminuição da "Taxa de reforma" com auxílio da função STEP. Foi realizada a simulação com aumento e decréscimo de 10% e 20%.

O modelo sente o distúrbio inicialmente e após alguns períodos se estabiliza com seus estoques. Essa baixa percepção do modelo se deve ao fato de a propagação não se alterada no valor de entrada, e sim um parâmetro durante processo de saída, se estabilizando rapidamente ao longo dos anos de novo. As singelas alterações podem ser observadas nas Figuras 4A e 4B.

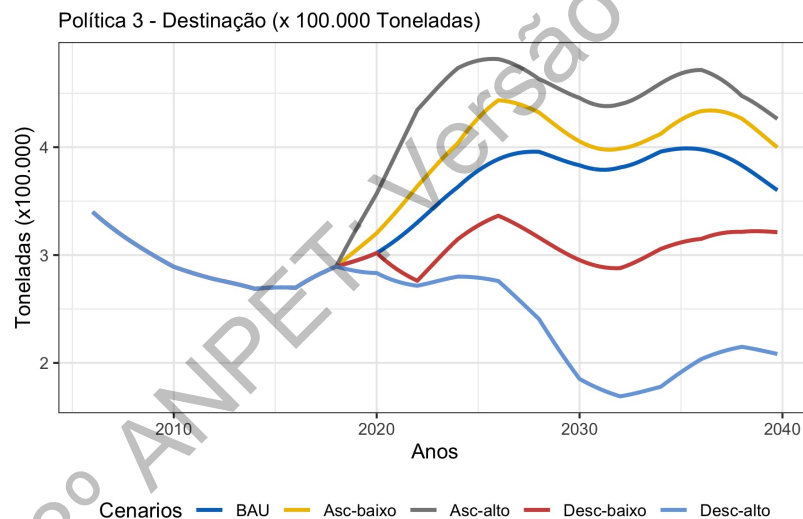
### 5.4 Política de destinação

No terceiro cenário, único gráfico analisado será em cima da destinação, pois o parâmetro alterado é a "Taxa de destinação" e influenciará apenas no fechamento do ciclo. Este parâmetro é definido por uma função, portanto a realização dos testes foram feitas alterações do mesmo.

Conforme esperado, os gráficos com comportamento ascendente tem aumento na quantidade final de pneus destinados corretamente e o oposto com comportamento negativo comparado com cenário base. A Figura 5 apresenta a comparação dos cenários.



**Figura 4:** Resultados da Política 2. Fonte: Autores



**Figura 5:** Resultados da Política 3. Fonte: Autores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho compreendeu o ciclo de vida do pneu de carga no Brasil, utilizando simulações pelo modelo de dinâmica de sistema. Foram gerados três cenários relacionados com as políticas públicas e metas governamentais, posteriormente foram avaliados efeitos no ciclo de vida do pneu.

A preocupação analisada no trabalho, é justamente a possibilidade de estender o tempo de duração do pneu em uso e o descarte sustentável. Portanto, através do cenários estipulados e simulados, houve à análise dos fluxos de reforma e fechamento do ciclo, o descarte de pneus inservíveis.

Conclui-se que notavelmente que a política de eficiência no ponto de coleta dos pneus inservíveis são mais sensíveis ao aumento ou diminuição do mesmo. Até 20% de aumento na eficiência e 38% da diminuição, trazendo assim variações dos valores finais da destinação. Diferentemente das variações da taxa de reforma, não excedendo valores de 3%, concluindo que modelo não é sensível as alterações da taxa de reforma.

Com base na análise das políticas e seus resultados quantitativos, pode-se concluir a importância e o impacto dos incentivos para o meio ambiente que evita problemas causados pela disposição do pneu inservível sem reutilização. O Brasil se mostrou eficiente nesse ponto e desenvolveu o fechamento de ciclo do pneu eficaz, mesmo sendo um produto no qual não possui a possibilidade de ser sustentável ao nível de não desestabilizar o ambiente, e sim conseguir a máxima redução de danos possível.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOA (2016). Guia e folhetos - faq, . URL: <https://www.arconic.com/>.
- Forrester, J. W. (1997). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society*, 48, 1037–1041.
- Lagarinhos, C. A., & Tenório, J. A. (2013). Reverse logistics for post-consumer tires in brazil. *Polímeros*, 23, 49–58.
- Lagarinhos, C. A. F. (2011). *Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa*. Ph.D. thesis Universidade de São Paulo.
- Pedram, A., Yusoff, N. B., Udoney, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60, 460–470.
- Ramos, K. C. S., & Ramos Filho, L. S. N. (2008). A logística reversa dos pneus inservíveis, .
- RMAI (2017). Pneus verdes contam com avaliação de ciclo de vida, . URL: <http://rmai.com.br/pneus-verdes-contam-com-avaliacao-de-ciclo-de-vida/>.
- Simic, V., & Dabic-Ostojic, S. (2017). Interval-parameter chance-constrained programming model for uncertainty-based decision making in tire retreading industry. *Journal of cleaner production*, 167, 1490–1498.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. HD30. 2 S7835 2000.
- 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, 367–394.
- Yadollahinia, M., Teimoury, E., & Paydar, M. M. (2018). Tire forward and reverse supply chain design considering customer relationship management. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 215–228.