57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES LOGÍSTICAS REVERSAS COM ASSISTÊNCIAS TÉCNICAS

Giuliano Messias da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
BR-101, km 60 - Litorâneo, São Mateus - ES
giuliano.m.silva@edu.ufes.br

Julya Motta de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
BR-101, km 60 - Litorâneo, São Mateus - ES
julya.m.oliveira@edu.ufes.br

Marcos Wagner Jesus Servare Junior
Universidade Federal do Espírito Santo
BR-101, km 60 - Litorâneo, São Mateus - ES
marcos.servare@ufes.br

RESUMO

O projeto de redes logísticas é uma decisão estratégica fundamental no gerenciamento de cadeias de suprimentos, sendo de grande complexidade. Este artigo apresenta um modelo matemãtico que considera o fluxo reverso, tanto para a fãbrica quanto para os centros de descarte, e introduz a assistência técnica como um novo participante na rede. A assistência técnica desempenha o papel de realizar reparos simples e reenviar os produtos para o varejo, o que adiciona novos fluxos à rede e aumenta sua complexidade. Foram avaliadas 15 instâncias de diferentes portes, utilizando uma técnica exata com o solver comercial CPLEX. Para todas as instâncias, foi possível alcançar a solução ótima, comprovando a eficãcia e aplicabilidade do modelo proposto.

PALAVRAS CHAVE. Projeto de Rede, Rede Logística, Logística reversa, Modelagem matemática.

Tópicos (L&T -Logística e Transportes, AD&GP - Pesquisa Operacional na Administração e Gestão da Produção, POI - PO na Indústria)

ABSTRACT

The design of logistics networks is a crucial and complex decision in supply chain management. This paper presents a mathematical model that incorporates reverse flows, both to the factory and disposal centers, and introduces technical assistance as a new participant in the network. Technical assistance performs simple repairs and returns products to retail, adding new flows and increasing the network's complexity. Fifteen instances of different sizes were tested using an exact solution technique with the commercial solver CPLEX. For all instances, optimal solutions were achieved, demonstrating the effectiveness and applicability of the proposed model.

KEYWORDS. Network Design, Logistic Network, Reverse Logistics, Math Modeling.

Paper topics (Logistics and Transportation, Operations Research in Management and Production Management, OR in Industry)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

1. Introdução

A logística desempenha um papel fundamental nas relações comerciais, sendo um fator crítico no planejamento gerencial e na tomada de decisões empresariais. As influências da logística, tanto em termos de custos quanto de participação no mercado, representam uma parcela significativa no sucesso de qualquer operação empresarial.

O principal objetivo dessas operações é garantir que o produto certo chegue ao cliente correto no momento adequado e no local designado, sempre com a maior agilidade e segurança possível. Para alcançar esse objetivo, o nível estratégico das empresas se torna determinante na tomada de decisões logísticas, uma vez que é a partir dessa esfera que se define como a cadeia de suprimentos será gerida e como as operações serão conduzidas de forma eficiente e eficaz.

Nesse contexto, o projeto de redes logísticas é uma decisão complexa e de grande importância no gerenciamento da cadeia de suprimentos. A escolha de onde e quando abrir novas instalações afeta diretamente os custos operacionais e o nível de serviço oferecido aos consumidores. A decisão de abertura de instalações envolve questões como a localização de centros de distribuição, centros de coleta, instalações de remanufatura e outras, além da definição dos fluxos entre essas unidades.

A implementação ou alteração de configurações logísticas exige altos investimentos de tempo e recursos, tornando essas decisões de longo prazo e com impactos substanciais no desempenho da organização. Ademais, a movimentação dos produtos pode ocorrer tanto no fluxo direto (de fornecedores para consumidores) quanto no fluxo reverso, que lida com a devolução de produtos para triagem, reparos, remanufatura ou descarte.

Nos últimos anos, observou-se um crescimento significativo nos fluxos reversos para remanufatura e recuperação de produtos, o que resultou em uma maior relevância da logística reversa. [Meade et al., 2007] justificam esse crescimento pela combinação de dois fatores principais: a crescente preocupação com os impactos ambientais e as pressões econômicas que influenciam diretamente os custos das empresas. Dessa forma, conceito de retorno de produtos evoluiu de uma simples operação de devolução para uma atividade integrada e crucial na cadeia de suprimentos.

Conforme [Dekker et al., 2013], o retorno de produtos não se limita mais a uma necessidade de reduzir desperdícios, mas se tornou uma estratégia que pode agregar valor à organização. Nesse cenário, a logística reversa não se limita ao transporte de produtos do consumidor de volta para o fabricante, mas envolve uma série de atividades complexas, como inspeção, triagem, recuperação de componentes e descarte responsável de materiais não reutilizáveis.

Com isso, na rede logística reversa, surgem novas instalações e processos e seus modelos podem considerar os fluxos reversos [Pishvaee et al., 2009]; [Servare Junior e Cardoso, 2020] e os fluxos integrados [Fleischmann et al., 2001]; [Lu e Bostel, 2007]; [Min e Ko, 2008]; [Pishvaee et al., 2010]; [Servare Junior et al., 2012], como centros de inspeção e centros de descarte, para lidar adequadamente com os produtos retornados. Essas instalações desempenham papéis essenciais no processo de remanufatura e recuperação, permitindo ao fabricante reaproveitar componentes ou, em casos onde o reaproveitamento não seja viável, realizar o descarte de maneira ambientalmente responsável.

Em particular, os centros de inspeção desempenham um papel crucial na avaliação da condição dos produtos retornados, determinando se eles podem ser remanufaturados ou se devem ser descartados. A forma como esses processos são organizados afeta diretamente a eficiência da rede logística reversa e, consequentemente, os custos operacionais. Ademais, essa gestão também precisa estar alinhada às exigências regulatórias, como as que envolvem a destinação final dos resíduos, para evitar penalidades legais e garantir a sustentabilidade do processo.

Além disso, a logística reversa tem sido objeto de discussões acadêmicas e práticas em

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

diversos trabalhos da literatura, principalmente devido aos fatores ambientais e às crescentes demandas de regulamentação. O impacto de legislações ambientais, como a Lei 12.305 de 2010 [Brasil, 2010], que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tem impulsionado a pesquisa e a prática na área de logística reversa. A PNRS estabelece responsabilidades para diferentes agentes da cadeia produtiva, como fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, para garantir o manejo adequado dos resíduos, desde sua produção até seu descarte ou reaproveitamento.

A adoção dessa política tem levado as empresas a reestruturar suas cadeias logísticas, incorporando práticas de logística reversa para atender às exigências legais, bem como para se alinhar às expectativas dos consumidores e melhorar sua imagem corporativa. Além disso, a crescente conscientização sobre as questões ambientais tem incentivado mais empresas a investirem em processos de recuperação e reutilização de materiais, o que pode ser vantajoso em termos financeiros quanto na imagem da empresa.

Diante do crescente interesse por parte de empresas e pesquisadores na otimizações das operações de logística reversa, é fundamental que sejam projetadas redes logísticas eficientes que levem em consideração os custos e a localização das instalações. Para isso, a modelagem matemática desempenha um papel importante, permitindo a análise de diferentes cenários e a identificação das soluções mais eficientes.

Com isso, o objetivo deste trabalho é propor um modelo matemático que integre novos elementos para o fluxo reverso de produtos, visando otimizar os processos de remanufatura, recuperação e descarte. A implementação de modelos como este pode auxiliar empresas na tomada de decisões sobre onde localizar suas instalações de recuperação e remanufatura, bem como na definição de fluxos de produtos entre essas instalações.

Este trabalho está estruturado em sete seções. A Seção 1 apresenta a introdução, contextualizando a importância do tema e os objetivos do estudo. A Seção 2 realiza uma revisão da literatura, abordando os principais trabalhos e avanços na área de logística reversa e modelagem matemática para redes logísticas. Na Seção 3, é apresentada a modelagem matemática proposta, com detalhes sobre as variáveis, restrições e objetivos. A Seção 4 descreve os experimentos computacionais realizados para testar o modelo, enquanto a Seção 5 apresenta as considerações finais, com a análise dos resultados obtidos e sugestões para futuras pesquisas. Por fim, são apresentados os agradecimentos e as referências utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2. Revisão de Literatura

[Fleischmann et al., 2001] propuseram um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para minimizar os custos em sistemas logísticos que envolvem centros de recuperação, fabricação, distribuição e descarte, que podem ou não ser ativados. Para ilustrar a aplicação do modelo, os autores analisaram casos de remanufatura de copiadoras na Europa, baseados na coleta de máquinas usadas pelos clientes, e o processo de reciclagem de papel, que representa uma parcela significativa dos resíduos domésticos.

[Kutanoglu e Lohiya, 2008] apresentaram uma formulação para a seleção de políticas de estoque e modos de transporte para reposição de peças, considerando o nível de serviço baseado no tempo. O modelo foi testado em cenários com uma e três instalações, utilizando a linguagem de modelagem GAMS e o solver CPLEX [IBM, 2013].

[Chaves e Alcântara, 2009] investigaram a evolução da logística reversa por meio de uma revisão da literatura, destacando o aumento do interesse e do volume de publicações sobre o tema ao longo do tempo. O estudo foi conduzido com base em consultas a bases de dados eletrônicas e acervos de bibliotecas nacionais e internacionais. Na época, constatou-se que a logística reversa ainda estava em fase inicial de desenvolvimento, com um número crescente de estudos buscando definir

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

seu escopo e consolidar seus conceitos. Apesar do avanço nas publicações, os autores identificaram lacunas na operacionalização da logística reversa, especialmente em setores estratégicos.

[Pishvaee et al., 2010] desenvolveram um modelo bi-objetivo de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), visando simultaneamente minimizar custos e maximizar o nível de serviço oferecido aos clientes. A abordagem considera a participação de centros de distribuição, inspeção, recuperação e descarte como elementos da rede logística integrada. Além do fluxo entre as instalações, o modelo avalia a viabilidade da abertura de centros de produção, distribuição, inspeção e descarte.

Considerando os fluxos integrados, [Min e Ko, 2008] propuseram uma modelagem matemática para o problema integrado que considevara a utilização de reparo, inspenção e remanufatura para redistribuição.

Nesta linha, [Servare Junior et al., 2012] apresentam uma modelagem matemática para o retorno de produtos incluindo a utilização de centro de distribuição de varejistas no fluxo direto e de assistências técnicas no fluxos reversos. A inclusão dos novos participantes aumentou a complexidade do problema e aumentou signficativamente o número de variáveis. Os autores utilizaram o solver CPLEX [IBM, 2013] para encontrar as soluções ótimas até onde fosse possível resolver o problema.

[Demajorovic et al., 2014] realizaram um estudo qualitativo sobre a Cooperativa Vira-Lata, destacando seu papel na integração de empresas e cooperativas em fluxos reversos de resíduos. A pesquisa envolveu entrevistas semiestruturadas com representantes da cooperativa, empresas parceiras e um representante da Prefeitura de São Paulo.

[¸Celebi, 2015] utilizou uma abordagem baseada em Algoritmos Genéticos para otimizar um modelo de minimização de custos totais na logística reversa. Já [Servare Junior et al., 2018] propuseram um modelo matemático de Programação Não-Linear Inteira Mista aplicado à localização de estoques em redes logísticas.

Com isso, [Servare Junior e Cardoso, 2020] propuseram um modelo matemático para a postergação de tempo no projeto de redes logísticas reversas, com foco no óleo de cozinha usado em Vitória, ES. O estudo buscou minimizar custos e otimizar a localização de instalações, como centros de tratamento e estoques, considerando diferentes cenários de capacidade e horizonte de planejamento. Utilizando um solver comercial, o modelo foi validado com dados reais, demonstrando eficiência na redução de custos e na estruturação da cadeia de suprimentos reversa.

[Goeldner et al., 2020] compararam os sistemas de logística reversa de pneus, pilhas e baterias no Brasil, destacando a importância da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e dos acordos setoriais para a gestão adequada desses resíduos. Os autores analisaram seis aspectos: fluxo reverso, objetivos e metas, gestão dos sistemas, número de postos de coleta, contrapartida das empresas e quantidade de resíduos retornados. O estudo revelou que o sistema de pneus, gerido pela Reciclanip, é mais estruturado e eficiente, com metas claras e ampla cobertura de postos de coleta. Já o sistema de pilhas e baterias carece de metas definidas e apresenta uma distribuição menos eficiente dos pontos de coleta. Com isso, os autores sugerem melhorias, como maior fiscalização e conscientização dos consumidores, para otimizar ambos os sistemas.

[Da Silva et al., 2023] analisaram os desafios enfrentados por pequenos negócios farmacêuticos na implementação da logística reversa de medicamentos vencidos ou em desuso, com foco em quatro microempresas localizadas no Agreste Pernambucano. A pesquisa, de abordagem qualitativa, utilizou entrevistas semiestruturadas e observação não participante para coletar dados, que foram analisados por meio da técnica de análise de conteúdo. Os resultados mostraram que três das quatro empresas realizavam parcialmente a logística reversa, com pouca efetividade, evidenciando a falta de conhecimento sobre legislações ambientais e a ausência de infraestrutura adequada.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

O estudo destacou a necessidade de treinamentos para os profissionais e de maior conscientização dos consumidores sobre o descarte correto de medicamentos. Além disso, ressaltou-se a importância de parcerias entre os elos da cadeia de suprimentos e de incentivos fiscais para viabilizar a logística reversa. Os autores concluíram que a efetividade da logística reversa no setor farmacêutico depende da colaboração entre empresas, governo e sociedade, além da fiscalização adequada para garantir o cumprimento das normas.

3. Modelagem Matemática

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do funcionamento da rede logística reversa considerada neste artigo. Através da figura, é possível observar claramente as inter-relações entre os participantes da rede, assim como os fluxos diretos e reversos. O fluxo direto refere-se ao retorno de produtos reparados aos varejistas. Além disso, a figura destaca a introdução de um novo participante, a assistência técnica, que desempenha um papel importante nesse processo. A assistência técnica é responsável por realizar reparos nos produtos retornados, o que adiciona um novo nível de complexidade à rede logística reversa.

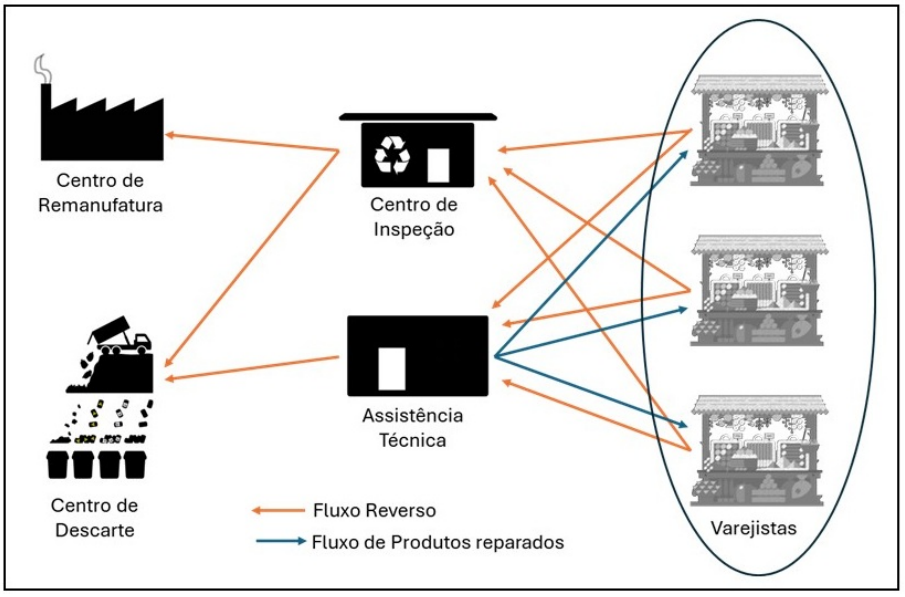


Figura 1: teste

Com isso, a figura ilustra uma rede logística reversa composta por diversos participantes: varejistas, assistências técnicas, centros de inspeção, centros de descarte e centros de remanufatura. O fluxo de produtos retornados pode seguir dois caminhos principais: o produto pode ser enviado para a assistência técnica ou para o centro de inspeção. Na assistência técnica, o produto pode ser reparado e devolvido ao varejista ou enviado ao centro de descarte. No centro de inspeção, os produtos são triados, e os que podem ser reaproveitados seguem para o centro de remanufatura, enquanto os irreparáveis são destinados ao descarte.

Assim, com base na Figura 1, o modelo matemático proposto considera todas as interações e fluxos descritos na imagem. O modelo visa otimizar a rede logística reversa, levando em conta os fluxos entre as diferentes instalações e os custos associados. A seguir, serão apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo matemático, que são essenciais para a formulação posterior.

Conjuntos

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

- K: Conjunto de varejistas.
- L: Conjunto de centros de coleta/inspeção.
- I: Conjunto de centros de produção.
- M: Conjunto de centros de descarte.
- S: Conjunto de assistências técnicas.
- N: Conjunto de níveis de capacidade.

Parâmetros

- d_k: Demanda do varejista $k \in K$ (unidades de produto).
- $r_k \in [0, 1]$: Fração de retornos para coleta do varejista $k \in K$.
- $x_k \in [0, 1]$: Fração de retornos para assistência técnica do varejista $k \in K$.
- $s \in [0, 1]$: Fração de produtos coletados que são descartados.
- $h \in [0, 1]$: Fração de produtos em assistência técnica que são descartados.
- cap_l^n: Capacidade do centro de coleta $l \in L$ no nível $n \in N$ (unidades).
- cap_i^n: Capacidade do centro de produção $i \in I$ no nível $n \in N$ (unidades).
- cap_m^n: Capacidade do centro de descarte $m \in M$ no nível $n \in N$ (unidades).
- cap_s^n: Capacidade da assistência técnica $s \in S$ no nível $n \in N$ (unidades).
- h_l^n: Custo fixo de abrir o centro de coleta $l \in L$ no nível $n \in N$ (em \$).
- f_i^n: Custo fixo de abrir o centro de produção $i \in I$ no nível $n \in N$ (em \$).
- a_m^n: Custo fixo de abrir o centro de descarte $m \in M$ no nível $n \in N$ (em \$).
- fs_s^n: Custo fixo de abrir a assistência técnica $s \in S$ no nível $n \in N$ (em \$).
- c_{kl}: Custo de transporte por unidade do varejista $k \in K$ para o centro de coleta $l \in L$ (\$/unidade).
- c_{ks}: Custo de transporte por unidade do varejista $k \in K$ para a assistência técnica $s \in S$ (\$/unidade).
- c_{li}: Custo de transporte por unidade do centro de coleta $l \in L$ para o centro de produção $i \in I$ (\$/unidade).
- c_{lm}: Custo de transporte por unidade do centro de coleta $l \in L$ para o centro de descarte $m \in M$ (\$/unidade).
- c_{sm}: Custo de transporte por unidade da assistência técnica $s \in S$ para o centro de descarte $m \in M$ (\$/unidade).
- c_{sk}: Custo de transporte por unidade da assistência técnica $s \in S$ para o varejista $k \in K$ (\$/unidade).

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

Variáveis de Decisão

- z_{kl}: Fluxo de produtos coletados do varejista $k \in K$ para o centro de coleta $l \in L$ (unidades).
- v_{ks}: Fluxo de produtos enviados para assistência do varejista $k \in K$ para a assistência técnica $s \in S$ (unidades).
- w_{li}: Fluxo de produtos recuperados do centro de coleta $l \in L$ para o centro de remanufatura $i \in I$ (unidades).
- u_{lm}: Fluxo de produtos descartados do centro de coleta $l \in L$ para o centro de descarte $m \in M$ (unidades).
- t_{sm}: Fluxo de produtos descartados da assistência técnica $s \in S$ para o centro de descarte $m \in M$ (unidades).
- q_{sk}: Fluxo de produtos reparados da assistência técnica $s \in S$ para o varejista $k \in K$ (unidades).
- y_l^n: 1 se o centro de coleta $l \in L$ está aberto no nível $n \in N$, 0 caso contrário.
- y_s^n: 1 se a assistência técnica $s \in S$ está aberta no nível $n \in N$, 0 caso contrário.
- y_m^n: 1 se o centro de descarte $m \in M$ está aberto no nível $n \in N$, 0 caso contrário.
- y_i^n: 1 se o centro de remanufatura $i \in I$ está aberto no nível $n \in N$, 0 caso contrário.

Considerando os conjuntos, parâmetros e variáveis definidos anteriormente, e conforme modelagem matemática apresentada por [Servare Junior et al., 2012], a seguir é apresentado o modelo matemático que realiza o planejamento e decisão de abertura de instações com níveis de capacidade considerando o fluxo reverso.

$$\begin{aligned}\min \quad & \sum_{l\in L}\sum_{n\in N} h_l^n y_l^n + \sum_{i\in I}\sum_{n\in N} f_i^n y_i^n + \sum_{m\in M}\sum_{n\in N} a_m^n y_m^n + \sum_{s\in S}\sum_{n\in N} fs_s^n y_s^n \\ & + \sum_{k\in K}\sum_{l\in L} c_{kl} z_{kl} + \sum_{l\in L}\sum_{i\in I} c_{li} w_{li} + \sum_{l\in L}\sum_{m\in M} c_{lm} u_{lm} \\ & + \sum_{k\in K}\sum_{s\in S} c_{ks} v_{ks} + \sum_{s\in S}\sum_{m\in M} c_{sm} t_{sm} + \sum_{s\in S}\sum_{k\in K} c_{sk} q_{sk}\end{aligned} \tag{1}$$

Sujeito à:

$$\sum_{l\in L} z_{kl} = r_k \cdot d_k, \quad \forall k \in K \tag{2}$$

$$\sum_{s\in S} v_{ks} = x_k \cdot d_k, \quad \forall k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{k\in K} z_{kl} = \sum_{i\in I} w_{li} + \sum_{m\in M} u_{lm}, \quad \forall l \in L \tag{4}$$

$$\sum_{m\in M} u_{lm} = s \cdot \sum_{k\in K} z_{kl}, \quad \forall l \in L \tag{5}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

$$\sum_{k \in K} v_{ks} = \sum_{m \in M} t_{sm} + \sum_{k \in K} q_{sk}, \quad \forall s \in S \tag{6}$$

$$\sum_{m \in M} t_{sm} = h \cdot \sum_{k \in K} v_{ks}, \quad \forall s \in S \tag{7}$$

$$\sum_{k \in K} z_{kl} \leq \sum_{n \in N} \text{cap}_l^n y_l^n, \quad \forall l \in L \tag{8}$$

$$\sum_{k \in K} v_{ks} \leq \sum_{n \in N} \text{cap}_s^n y_s^n, \quad \forall s \in S \tag{9}$$

$$\sum_{l \in L} u_{lm} + \sum_{s \in S} t_{sm} \leq \sum_{n \in N} \text{cap}_m^n y_m^n, \quad \forall m \in M \tag{10}$$

$$\sum_{l \in L} w_{li} \leq \sum_{n \in N} \text{cap}_i^n y_i^n, \quad \forall i \in I \tag{11}$$

$$\sum_{n \in N} y_l^n \leq 1, \quad \forall l \in L \tag{12}$$

$$\sum_{n \in N} y_s^n \leq 1, \quad \forall s \in S \tag{13}$$

$$\sum_{n \in N} y_m^n \leq 1, \quad \forall m \in M \tag{14}$$

$$\sum_{n \in N} y_i^n \leq 1, \quad \forall i \in I \tag{15}$$

$$z_{kl}, v_{ks}, w_{li}, u_{lm}, t_{sm}, q_{sk} \geq 0, \quad \forall k \in K, l \in L, i \in I, m \in M, s \in S \tag{16}$$

$$y_l^n, y_s^n, y_m^n, y_i^n \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in L, s \in S, m \in M, i \in I, n \in N \tag{17}$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total incluindo custos fixos de abertura ($h_l^n y_l^n$, $f_i^n y_i^n$, $a_m^n y_m^n$ e $fs_s^n y_s^n$) e custos de transporte ($c_{kl} z_{kl}$, $c_{ks} v_{ks}$, $c_{li} w_{li}$, $c_{lm} u_{lm}$, $c_{sm} t_{sm}$ e $c_{sk} q_{sk}$). Para que se possa estimar o custo total, o projeto da rede logística reversa deve considerar as restrições impostas ao modelo. Primeiramente, os varejistas devem enviar uma parcela dos produtos para o centro de inspeção e para a assistência técnica, conforme apresentado nas Equações (2) e (3), respectivamente.

As restrições (4) asseguram a igualdade entre os fluxos de entrada e saída de um centro de inspeção, ou seja, tudo que chega vindo dos varejistas é igual a tudo que pode ser reaproveitado indo para os centros de remanufatura ou se encaminha para o descarte no centros de destacarte. Já a Equação (5) indica que uma parte de tudo que é enviado para um centro de inspeção é descartado.

Da mesma forma, o fluxo na assistência técnica é representado na Equação (6) que garante que tudo que chega à uma assistência técnica é igual a tudo que sai dela, indo para o descarte ou devolvido para o varejista. Com isso, a Equação (7) indica que uma parte de tudo que é enviado para uma assistência técnica é descartado.

Por sua vez, as Equações (8), (9), (10) e (11) limitam as capacidades dos centro de inspeção, assistência técnica, centro de descarte e centro de remanafatura, respectivamente. Para

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

garantir que no máximo um nível de capacidade vai ser aberto por localidade, as restrições (12), (13), (14) e (15) apresentam esse limite para os centro de inspeção, assistência técnica, centro de descarte e centro de remanafatura, respectivamente.

As restrições de não-negatividade das variáveis são representadas pela Equação (16) e, por fim, a Equação (17) descrevem a natureza binária das variáveis de decisão de localização de instalações.

4. Experimentos Computacionais

Foram criados 15 cenários diferentes, com o objetivo de realizar uma análise de comportamento a partir do aumento do número de participantes na rede. Três grupos de instâncias foram produzidos de acordo com a quantidade de participantes em cada cenário: o primeiro grupo, Instâncias 1-5, com um número reduzido de tipos de instalações; o segundo grupo, Instâncias 6-10, com um aumento na quantidade dessas; e o terceiro grupo, Instâncias 11-15, com um aumento adicional. A Tabela 1 apresenta as instâncias de teste.

A Tabela 1 apresenta o tamanho dos conjuntos considerados em cada instância.

Tabela 1: Tamanho dos conjuntos para as 15 instâncias.

Instância	K	L	I	M	S
1	5	5	5	1	2
2	7	7	7	3	3
3	10	4	7	3	3
4	10	6	10	4	4
5	10	8	12	6	5
6	15	10	20	8	5
7	25	12	22	10	5
8	25	12	25	11	6
9	50	14	30	12	10
10	55	16	35	12	12
11	75	16	60	14	14
12	100	25	80	30	20
13	150	40	120	30	25
14	200	50	150	30	30
15	250	60	200	35	35

Todas as instâncias foram resolvidas utilizando o solver comercial CPLEX 12.6 [IBM, 2013], com tempo limite de até duas horas por execução. Os testes foram realizados em uma máquina de 64 bits com processador Intel Core i7-10750H de 2,6GHz, 32GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. A Tabela 2 apresenta os tempos de resolução (em segundos) para cada uma das instâncias. Observa-se que as instâncias de pequeno porte foram resolvidas quase que instantaneamente (menos de 0,1 segundos), enquanto as de porte médio mantiveram tempos inferiores a 10 segundos. Para os cenários mais complexos (Instâncias 12 a 15), o tempo de processamento cresceu de forma mais expressiva, atingindo cerca de dois minutos na maior instância.

Embora o modelo tenha alcançado soluções ótimas para todas as instâncias, os tempos de execução crescem de forma mais expressiva à medida que a complexidade das instâncias aumenta. Isso sugere que, para cenários muito grandes, o uso de técnicas exatas como o CPLEX pode ser desafiador devido à limitação de tempo computacional. No entanto, a eficácia do modelo em encontrar soluções ótimas para todos os cenários testados demonstra sua aplicabilidade em problemas de redes logísticas reversas de diferentes escalas.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

Tabela 2: Tempo de resolução das instâncias pelo CPLEX [IBM, 2013] (em segundos).

Instância	Tempo (s)
1	0.12
2	0.25
3	0.41
4	0.85
5	1.34
6	3.62
7	9.78
8	12.04
9	23.51
10	36.87
11	85.66
12	212.45
13	467.18
14	738.52
15	1002.31

5. Considerações Finais

Este trabalho apresentou um modelo matemático para o projeto de redes logísticas reversas incluindo um novo ator, a assistência técnica. A abordagem proposta foi testada em 15 instâncias de diferentes tamanhos, sendo todas resolvidas por técnicas exatas, utilizando o solver comercial CPLEX [IBM, 2013]. Os resultados indicaram que, nestes cenários, o CPLEX foi capaz de encontrar soluções ótimas dentro de um tempo computacional razoável, conforme demonstrado na Tabela 2.

Além disso, o modelo proposto apresenta uma contribuição significativa para a modelos de redes logísticas reversas, ao integrar o novo elemento da assistência técnica no fluxo reverso, o que amplia o escopo das soluções disponíveis. A possibilidade de otimizar a localização das instalações, a centralização de estoques e os fluxos de transporte entre elas, resultando em uma redução dos custos totais da cadeia de suprimentos, reforça a aplicabilidade prática da ferramenta.

Futuras pesquisas podem focar no desenvolvimento de modelos mais robustos que sejam capazes de se adaptar às mudanças dinâmicas do ambiente de negócios ao longo do ciclo de vida da cadeia de suprimentos considerando os fluxos diretos e novos agentes participantes neste fluxo. Além disso, incorporar a incerteza da demanda em cadeias de suprimentos multi-produtos e multi-períodos representa uma linha promissora de pesquisa, com relevante aplicação prática. Outra adoção para este problema é incluir outras funções objetivos, como, por exemplo a minimização de níveis de serviço.

Além disso, o uso de heurísticas e metaheurísticas para resolver instâncias ainda maiores, considerando a necessidade de soluções rápidas e eficientes, também é uma área que poderia ser explorada, visando aprimorar as respostas para problemas complexos.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e à Universidade Federal do Espírito Santo pelo financiamento deste trabalho.

Referências

Brasil (2010). Lei n 12.305, de 2 de agosto de 2010. institui a política nacional de resíduos sólidos e dá outras providências. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 2 maio 2025.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

¸Celebi, D. (2015). Inventory control in a centralized distribution network using genetic algorithms: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 87:532–539. ISSN 0360-8352. URL https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.035.

Chaves, G. L. D. e Alcântara, R. L. C. (2009). Logística reversa: Uma análise da evolução do tema através de revisão da literatura. In *Anais do XXIX ENEGEP*, Salvador. ABEPRO. URL www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_617_12512.pdf.

Da Silva, L. A., Santos, J. G. a., e Pinto, F. M. S. C. (2023). Logística reversa no setor farmacêutico: análise dos desafios para os pequenos negócios. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, 14(2):2136 – 2160. ISSN 2178-9010. URL http://dx.doi.org/10.7769/gesec.v14i2.1696.

Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., e van Wassenhove, L. N. (2013). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer Science & Business Media.

Demajorovic, J., Caires, E. F., Gonçalves, L. N. d. S., e Silva, M. J. d. C. (2014). Integrando empresas e cooperativas de catadores em fluxos reversos de resíduos sólidos pós-consumo: o caso vira-lata. *Cadernos EBAPE.BR*, 12(spe):513 – 532. ISSN 1679-3951. URL http://dx.doi.org/10.1590/1679-39519020.

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., e Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2):156 – 173. URL https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x.

Goeldner, I. S., Tokarz, B., Ambrozi, J., Rebellato, P. H., Fagundes, A. B., Pereira, D., e Beuren, F. H. (2020). Sistemas de logística reversa de pneus, pilhas e baterias implantados no brasil: uma análise comparativa. *Revista Produção Online*, 20(1):3 – 27. ISSN 1676-1901. URL http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v20i1.3241.

IBM (2013). IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, Version 12.6.0.0.

Kutanoglu, E. e Lohiya, D. (2008). Integrated inventory and transportation mode selection: A service parts logistics system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5):665 – 683. URL https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.02.001.

Lu, Z. e Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2):299–323. ISSN 0305-0548. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.002.

Meade, L., Sarkis, J., e Presley, A. (2007). The theory and practice of reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 3(1):56. ISSN 1742-7975. URL http://dx.doi.org/10.1504/IJLSM.2007.012070.

Min, H. e Ko, H.-J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113 (1):176–192. ISSN 0925-5273. URL http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.01.017.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br

Pishvaee, M. S., Farahani, R. Z., e Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & operations research*, 37(6): 1100–1112. URL https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.09.018.

Pishvaee, M. S., Kianfar, K., e Karimi, B. (2009). Reverse logistics network design using simulated annealing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(1 - 4):269 – 281. ISSN 1433-3015. URL http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2194-5.

Servare Junior, M. W. J. e Cardoso, P. A. (2020). Modelo matemático para postergação de tempo no projeto de rede logística reversa com níveis de capacidade. *Brazilian Journal of Production Engineering - BJPE*, p. 1 – 22. ISSN 2447-5580. URL http://dx.doi.org/10.47456/bjpe.v6i7.32475.

Servare Junior, M. W. J., Cardoso, P. A., Cruz, M. M. d. C., e Paiva, M. H. M. (2018). Mathematical model for supply chain design with time postponement. *TRANSPORTES*, 26(4):1 – 15. ISSN 2237-1346. URL http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v26i4.1324.

Servare Junior, M., Ribeiro, G., e Chaves, G. (2012). Um modelo matemático para redes logísticas com fluxos diretos e reversos e novos integrantes. In *Anais do XXXIII ENEGEP*, p. 1–14, Bento Gonçalves. ABEPRO. URL www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2012_TN_WIC_162_943_21087.pdf.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212558
https://proceedings.science/p/212558?lang=pt-br