

TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E SERVITIZAÇÃO APLICADAS À LOGÍSTICA REVERSA DE PNEUS: PROPOSIÇÃO DE FRAMEWORK CONCEITUAL PARA SISTEMAS CIRCULARES INTELIGENTES

Priscila Carvalho Marques – pcm22043@gmail.com
PPGCAMB – Universidade Federal de Pelotas
96010-020 – Pelotas – RS

Cícero Coelho de Escobar – cicero.escobar@gmail.com
PPGCAMB – Universidade Federal de Pelotas

Érico Kunde Corrêa – ericokundecorre@yahoo.com.br
PPGCAMB – Universidade Federal de Pelotas

Pascal Silas Thué – pascal.thue@ufpel.edu.br
PPGCAMB – Universidade Federal de Pelotas

Resumo: O avanço das demandas ambientais e da economia circular amplia a necessidade de sistemas logísticos mais integrados, rastreáveis e sustentáveis. Nesse contexto, a logística reversa de pneus pós-consumo apresenta desafios relacionados à dispersão territorial, à multiplicidade de agentes envolvidos e às limitações associadas à coordenação operacional e à integração informacional. Paralelamente, a transformação digital vem reconfigurando cadeias logísticas por meio da incorporação de tecnologias como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), blockchain e análise avançada de dados, ampliando capacidades de monitoramento, rastreabilidade e suporte à tomada de decisão. Associada a esse movimento, a servitização favorece modelos organizacionais mais colaborativos e orientados à sustentabilidade. Diante desse cenário, o estudo analisa como tecnologias digitais e modelos servitizados podem contribuir para a qualificação da logística reversa de pneus no Brasil. Metodologicamente, a pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e descritiva, fundamentada em revisão sistemática da literatura e análise bibliométrica desenvolvidas nas bases Scopus e Web of Science entre 2015 e 2025. Como principal contribuição teórica, propõe-se um framework conceitual integrado voltado à articulação entre infraestrutura digital, inteligência analítica, rastreabilidade e serviços ambientais inteligentes aplicados à cadeia reversa de pneus pós-consumo.

Palavras-chave: Economia circular; Servitização; Rastreabilidade digital; Inteligência logística; Cadeias reversas.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

DIGITAL TRANSFORMATION AND SERVITIZATION APPLIED TO TIRE REVERSE LOGISTICS: PROPOSITION OF A CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR INTELLIGENT CIRCULAR SYSTEMS

Abstract: *The advancement of environmental demands and the circular economy increases the need for more integrated, traceable, and sustainable logistics systems. In this context, reverse logistics of post-consumer tires presents challenges related to territorial dispersion, the multiplicity of stakeholders involved, and limitations associated with operational coordination and information integration. Simultaneously, digital transformation has been reshaping logistics chains through the incorporation of technologies such as artificial intelligence, Internet of Things (IoT), blockchain, and advanced data analytics, expanding monitoring, traceability, and decision-support capabilities. Associated with this movement, servitization promotes more collaborative and sustainability-oriented organizational models. In this scenario, the study analyzes how digital technologies and servitized models can contribute to improving tire reverse logistics in Brazil. Methodologically, the research is characterized as qualitative, exploratory, and descriptive, based on a systematic literature review and bibliometric analysis developed from the Scopus and Web of Science databases between 2015 and 2025. As its main theoretical contribution, the study proposes an integrated conceptual framework focused on articulating digital infrastructure, analytical intelligence, traceability, and intelligent environmental services applied to the reverse chain of post-consumer tires.*

Keywords: *Circular Economy; Servitization; Digital Traceability; Logistics Intelligence; Reverse Supply Chains.*

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades industriais, associada à expansão dos padrões globais de consumo, vem ampliando de forma expressiva a geração de resíduos sólidos, tornando a transição para modelos orientados à economia circular um dos maiores desafios ambientais da contemporaneidade (GEISSDOERFER et al., 2017). Nesse cenário, os pneus pós-consumo assumem posição particularmente crítica em razão de sua elevada durabilidade, composição complexa e ampla dispersão territorial dos pontos de descarte, fatores que tornam sua gestão ambiental e logística significativamente desafiadora.

No contexto brasileiro, embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Resolução CONAMA nº 416/2009 tenham representado avanços importantes na consolidação de mecanismos de responsabilidade compartilhada e destinação ambientalmente adequada, ainda persistem fragilidades estruturais relacionadas à rastreabilidade, à integração informacional e à articulação entre os diferentes agentes envolvidos na cadeia reversa. Na prática, observa-se que muitos sistemas ainda operam de maneira fragmentada, com limitações na circulação de informações, na coordenação logística e na capacidade de monitoramento dos fluxos reversos.

Diante desse contexto, a logística reversa passa a assumir papel estratégico não apenas como instrumento operacional de destinação de resíduos, mas como elemento central para o fortalecimento da economia circular e da sustentabilidade industrial. Entretanto, sua efetiva consolidação ainda enfrenta entraves relacionados à baixa integração tecnológica, à descontinuidade informacional e à limitada capacidade de coordenação entre os atores que compõem cadeias reversas complexas (GUIDE; VAN WASSENHOVE, 2009).

Paralelamente, a transformação digital vem promovendo mudanças profundas na maneira como sistemas produtivos e logísticos são estruturados, monitorados e gerenciados. Tecnologias como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), blockchain e análise avançada de dados ampliam capacidades de rastreabilidade, inteligência analítica e suporte à tomada de decisão, favorecendo cadeias mais conectadas, eficientes e adaptativas (RAJPUT; SINGH, 2020; ZHANG et al., 2022; DUTTA et al., 2022). Mais do que ferramentas operacionais, essas tecnologias passam a representar possibilidades concretas de reconfiguração da gestão ambiental contemporânea.

Associada a esse movimento, a servitização amplia a lógica tradicional centrada exclusivamente em produtos, favorecendo modelos organizacionais mais colaborativos, integrados e orientados à sustentabilidade. Ao articular produtos, serviços e soluções digitais em arquiteturas inteligentes, a servitização contribui para o fortalecimento de ecossistemas capazes de integrar monitoramento contínuo, compartilhamento de informações e coordenação entre fabricantes, operadores logísticos, recicladores e agentes regulatórios (KOHTAMÄKI et al., 2022).

Apesar do avanço recente das discussões científicas, observa-se que a literatura ainda apresenta forte predominância de abordagens fragmentadas, frequentemente concentradas em aplicações tecnológicas isoladas e com limitada integração entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus pós-consumo. Essa lacuna compromete a construção

Realizações



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

de arquiteturas sistêmicas capazes de conectar infraestrutura digital, governança ambiental e inteligência logística em cadeias reversas complexas.

À luz dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à inovação, infraestrutura, consumo responsável e ação ambiental, o presente estudo se insere ao investigar como a convergência entre transformação digital e servitização pode fortalecer a logística reversa de pneus no Brasil sob a perspectiva da economia circular. Nesse contexto, propõe-se um framework conceitual integrado que articula infraestrutura digital, inteligência analítica, rastreabilidade e serviços ambientais inteligentes aplicados à cadeia reversa de pneus pós-consumo. A estrutura desenvolvida oferece uma base analítica para compreender a organização e o desempenho desses sistemas, contribuindo para o aprimoramento de sua integração, coordenação e capacidade de resposta diante das exigências contemporâneas de eficiência e sustentabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Economia circular e logística reversa

O aumento da geração de resíduos e das pressões ambientais tem impulsionado a consolidação da economia circular como paradigma estratégico para substituição de modelos lineares de produção e descarte por sistemas mais sustentáveis e regenerativos. Fundamentada na reutilização, recuperação e reinserção de materiais nos ciclos produtivos, a economia circular busca ampliar eficiência no uso de recursos e reduzir impactos ambientais (GEISSDOERFER et al., 2017).

Nesse contexto, a logística reversa desempenha função central ao viabilizar o retorno de resíduos e materiais pós-consumo aos ciclos produtivos ou a sistemas ambientalmente adequados de destinação (GUIDE; VAN WASSENHOVE, 2009). No Brasil, sua consolidação foi fortalecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que instituiu princípios relacionados à responsabilidade compartilhada e à destinação ambientalmente adequada dos resíduos (BRASIL, 2010).

Apesar dos avanços regulatórios, a operacionalização da logística reversa ainda enfrenta limitações relacionadas à baixa integração informacional, elevados custos logísticos e dificuldades de coordenação entre os agentes envolvidos. Em países de grande extensão territorial, como o Brasil, tais desafios tornam-se ainda mais complexos.

Nesse cenário, a integração entre fluxos materiais, sistemas de informação e mecanismos de governança ambiental torna-se essencial para ampliar rastreabilidade, eficiência operacional e suporte à tomada de decisão em cadeias reversas complexas.

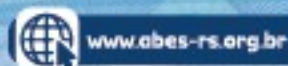
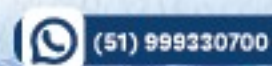
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



2.2. Cadeia de pneus pós-consumo e desafios ambientais

A cadeia de pneus pós-consumo destaca-se pela elevada complexidade logística e ambiental decorrente da durabilidade dos materiais, da heterogeneidade de sua composição e da ampla dispersão geográfica dos pontos de descarte. Quando destinados inadequadamente, resíduos pneumáticos podem provocar impactos ambientais e sanitários relevantes, incluindo proliferação de vetores e riscos de contaminação ambiental (CONAMA, 2009).

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 416/2009 fortaleceu mecanismos de responsabilidade compartilhada e metas de coleta e destinação ambientalmente adequada. Entre as principais alternativas de valorização destaca-se o coprocessamento em fornos de clínquer, possibilitando aproveitamento energético e redução parcial do consumo de combustíveis fósseis.

Entretanto, a logística reversa de pneus ainda apresenta limitações relacionadas à dispersão territorial, variabilidade dos fluxos coletados e multiplicidade de agentes envolvidos nos processos de coleta, transporte, triagem e destinação. Além disso, a reduzida integração entre os elos da cadeia compromete rastreabilidade, previsibilidade operacional e eficiência sistêmica.

Dessa forma, a cadeia reversa de pneus configura-se como desafio associado não apenas à gestão de resíduos, mas também à governança ambiental, integração tecnológica e construção de sistemas circulares mais inteligentes e sustentáveis.

2.3. Transformação digital aplicada à gestão ambiental

A transformação digital corresponde à incorporação de tecnologias digitais nos processos organizacionais e decisórios, promovendo mudanças estruturais na forma como sistemas produtivos e logísticos são monitorados e gerenciados (RAJPUT; SINGH, 2020). No contexto ambiental, essas tecnologias ampliam capacidades relacionadas à rastreabilidade, monitoramento operacional e suporte analítico à tomada de decisão.

Entre as principais tecnologias destacam-se inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), blockchain, big data e computação em nuvem. Na logística reversa, essas ferramentas vêm sendo utilizadas para previsão da geração de resíduos, otimização de rotas, rastreamento de materiais e gerenciamento de fluxos reversos complexos (ZHANG; WANG; LIU, 2022; GARRIDO-HIDALGO et al., 2019).

O blockchain, por sua vez, apresenta potencial para fortalecer transparência, confiabilidade informacional e rastreabilidade dos resíduos ao longo da cadeia logística (DUTTA et al., 2022).

Apesar dos avanços observados, a literatura ainda evidencia predominância de aplicações fragmentadas e com limitada integração entre infraestrutura digital, coordenação logística e

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

sustentabilidade ambiental. Nesse sentido, torna-se necessário avançar para modelos analíticos integrados capazes de conectar tecnologias digitais, governança ambiental e economia circular.

2.4. Servitização e integração de serviços ambientais

A servitização corresponde à transição de modelos centrados exclusivamente na comercialização de produtos para sistemas que integram produtos, serviços e soluções digitais, buscando ampliar eficiência operacional e geração de valor (KOHTAMÄKI; PARIDA; OGHENEVWEDE, 2022).

No contexto ambiental, essa abordagem favorece modelos mais colaborativos e orientados à circularidade, incorporando monitoramento, rastreabilidade e serviços digitais aplicados à gestão ambiental. Na logística reversa de pneus, a servitização possibilita o desenvolvimento de plataformas de gestão, sistemas de rastreamento em tempo real e modelos colaborativos envolvendo fabricantes, operadores logísticos, recicladores e agentes regulatórios.

Além de ampliar a previsibilidade operacional e a integração das informações, os modelos servitizados tornam as cadeias reversas mais adaptativas e capazes de responder com maior eficiência aos desafios logísticos e ambientais contemporâneos.

Apesar desse potencial, a literatura ainda apresenta limitada integração entre servitização, transformação digital e logística reversa de pneus pós-consumo. Predominam estudos fragmentados, frequentemente concentrados em aplicações tecnológicas isoladas, sem articulação consistente entre infraestrutura digital, governança ambiental e coordenação logística. Como consequência, reduz-se a capacidade de construção de sistemas reversos efetivamente inteligentes e orientados à circularidade.

Diante dessa lacuna, este estudo propõe um framework conceitual voltado à articulação entre tecnologias digitais, serviços ambientais e gestão colaborativa da cadeia reversa de pneus. Mais do que uma estrutura tecnológica, a proposta busca contribuir para o desenvolvimento de sistemas mais conectados, rastreáveis, sustentáveis e alinhados aos desafios ambientais contemporâneos.

3. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de natureza exploratória, desenvolvida a partir da integração entre revisão sistemática integrativa da literatura e análise bibliométrica, com o objetivo de compreender de que maneira a transformação digital e a servitização vêm sendo incorporadas à logística reversa de pneus no contexto da economia circular. A articulação entre essas abordagens metodológicas possibilitou examinar simultaneamente a configuração estrutural da produção científica e as principais tendências analíticas relacionadas à digitalização de cadeias reversas, ampliando a consistência interpretativa e a robustez teórico-conceitual da investigação.

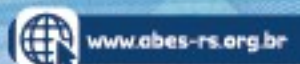
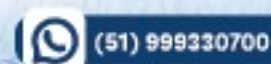
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



A análise bibliométrica permitiu identificar padrões de evolução científica, redes de colaboração, relações de coocorrência temática e níveis de consolidação do campo investigado, enquanto a revisão sistemática integrativa favoreceu o aprofundamento qualitativo das contribuições teóricas, das aplicações tecnológicas predominantes e das limitações recorrentes identificadas na literatura. Conforme discutem Aria e Cuccurullo (2017) e Donthu et al. (2021), a integração entre revisão sistemática e bibliometria constitui abordagem metodológica relevante para mapeamento, síntese e interpretação de campos científicos emergentes e multidisciplinares.

A coleta de dados foi realizada nas bases Scopus e Web of Science, selecionadas em razão de sua ampla cobertura multidisciplinar e elevada relevância na indexação de estudos relacionados à sustentabilidade, logística, economia circular e transformação digital. O recorte temporal compreendeu o período de 2015 a 2025, considerando a intensificação recente das discussões científicas relacionadas à Indústria 4.0, digitalização de sistemas produtivos e aplicações de tecnologias inteligentes na gestão ambiental e logística.

A estratégia de busca foi estruturada a partir da combinação de descritores relacionados à logística reversa, transformação digital, servitização, economia circular e pneus pós-consumo, utilizando operadores booleanos aplicados aos campos de título, resumo e palavras-chave. Adicionalmente, foram realizadas verificações complementares por meio de análise cruzada de referências e rastreamento de citações relevantes, visando ampliar a aderência temática do corpus e reduzir limitações associadas aos processos de indexação das bases consultadas.

Os critérios de elegibilidade priorizaram artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, redigidos em inglês ou português e diretamente relacionados à interface entre tecnologias digitais, gestão ambiental, servitização e logística reversa. Foram excluídos documentos duplicados, estudos sem aderência temática ao escopo da pesquisa, publicações sem revisão por pares e trabalhos cuja abordagem não apresentasse relação direta com sistemas reversos ou economia circular.

O processo de seleção seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), assegurando transparência, rastreabilidade e rigor metodológico às etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. Após a aplicação dos critérios estabelecidos, o corpus final da pesquisa foi composto por 28 artigos científicos. A composição final do conjunto analisado reflete o caráter ainda emergente e fragmentado da literatura especificamente relacionada à convergência entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus pós-consumo.

Os dados bibliográficos foram organizados e analisados com o auxílio dos softwares VOSviewer e Bibliometrix, permitindo a construção de redes de coautoria, coocorrência de palavras-chave e identificação de clusters temáticos. As análises contemplaram indicadores relacionados à centralidade, densidade e interconectividade das redes científicas, possibilitando examinar níveis de fragmentação, especialização temática e articulação intelectual do campo investigado.

Realização



Apoio Institucional

REBOB
REDES DE
BIOECONOMIA

Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



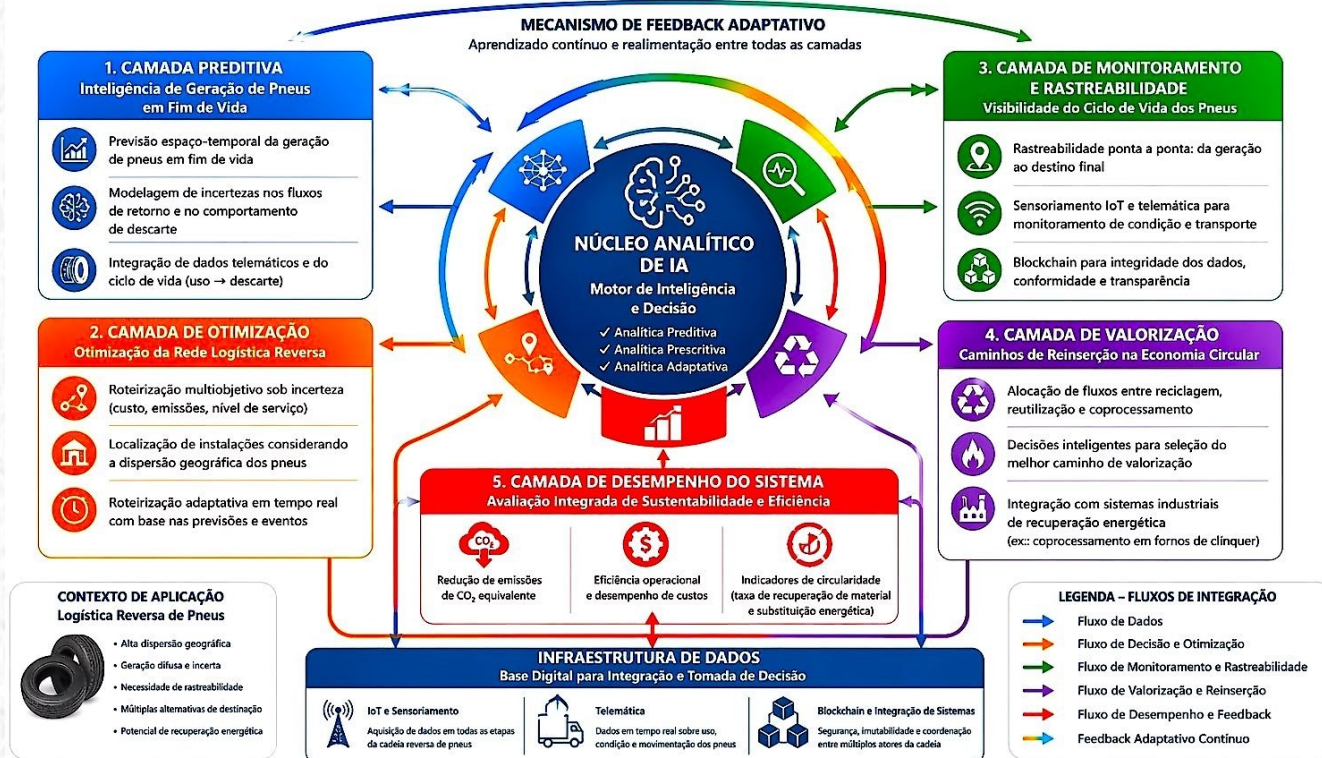
www.abes-rs.org.br

Na etapa qualitativa, os estudos selecionados foram analisados a partir de categorias relacionadas às aplicações de tecnologias digitais, mecanismos de rastreabilidade, integração logística, inteligência analítica, modelos servitizados e contribuições para a circularidade dos sistemas reversos. Essa sistematização permitiu identificar convergências analíticas, lacunas estruturais e limitações associadas à integração entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus pós-consumo.

A partir da articulação entre revisão sistemática integrativa e análise bibliométrica, foi possível construir uma interpretação integrada das dinâmicas científicas do campo, subsidiando a proposição de um framework conceitual voltado à qualificação de sistemas reversos mais inteligentes, rastreáveis e orientados à sustentabilidade operacional. A proposição do framework decorreu da síntese interpretativa das convergências teóricas, tecnológicas e operacionais identificadas na literatura analisada, buscando integrar infraestrutura digital, inteligência analítica, rastreabilidade e coordenação logística em perspectivas alinhadas aos princípios da economia circular.

Framework Integrado de Inteligência Artificial para Logística Reversa Circular de Pneus (FIA-LRC)

Arquitetura sistêmica para cadeias reversas de pneus orientada por dados, otimização e circularidade



O framework integra inteligência artificial, dados e operações logísticas para transformar sistemas reversos de pneus em cadeias inteligentes, adaptativas e orientadas à economia circular e à descarbonização industrial.

Figura 1 – Framework conceitual para integração entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Realização

ABES-RS

Correalizadores

UFRGS **PUCRS**
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Apio Institucional

CYTED
CENTRO DE TECNOLOGIA PARA A ECONOMIA CIRCULAR
REGICULA

AIDIS

REBOB
RETIRO E RECONSTRUÇÃO DE BARRAS DE OXIGÊNIO
RECURSOS TECNOLÓGICOS E INOVATIVOS

(51) 999330700

abes-rs@abes-rs.org.br

www.abes-rs.org.br

O framework proposto estrutura-se como uma arquitetura analítica integrada voltada à articulação entre infraestrutura digital, rastreabilidade operacional, inteligência analítica e serviços ambientais orientados por dados aplicados à cadeia reversa de pneus. Sua lógica fundamenta-se na integração entre fluxos materiais, informações ambientais e mecanismos inteligentes de coordenação logística, favorecendo o fortalecimento de sistemas reversos mais adaptativos, colaborativos e alinhados aos princípios da sustentabilidade operacional e da economia circular.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Tendências científicas e consolidação do campo interdisciplinar

A análise bibliométrica evidenciou crescimento expressivo da produção científica relacionada à transformação digital aplicada à logística reversa e à economia circular, sobretudo a partir de 2020, período marcado pela intensificação das agendas globais de sustentabilidade, digitalização industrial e descarbonização produtiva. Esse movimento demonstra a consolidação progressiva de um campo interdisciplinar orientado à convergência entre tecnologias digitais, gestão ambiental e sistemas logísticos circulares.

Os resultados indicaram predominância de estudos associados à inteligência artificial aplicada à logística, Internet das Coisas (IoT), blockchain, rastreabilidade digital e otimização de fluxos reversos. Observou-se elevada proximidade conceitual entre os descritores “circular economy”, “reverse logistics”, “digital transformation” e “supply chain management”, evidenciando crescente articulação entre inovação tecnológica, sustentabilidade sistêmica e inteligência operacional (RAJPUT; SINGH, 2020; GEISSDOERFER et al., 2017).

Sob a perspectiva analítica, verificou-se que a transformação digital vem assumindo papel estratégico na reconfiguração das cadeias reversas ao ampliar capacidades de monitoramento, rastreabilidade e suporte à tomada de decisão em ambientes logísticos complexos (FANG; LI; CHEN, 2023; OLWADE; ADEBAYO; SALAMI, 2024).

Entretanto, apesar da expansão quantitativa das publicações, identificou-se reduzida incidência de estudos direcionados especificamente à logística reversa de pneus pós-consumo. Paralelamente, verificou-se baixa centralidade temática das discussões relacionadas à servitização, sugerindo que a integração entre serviços inteligentes, plataformas digitais e sistemas reversos ainda permanece incipiente na literatura internacional.

Outro aspecto relevante refere-se à predominância de abordagens tecnocêntricas e operacionalmente fragmentadas. Em grande parte dos estudos analisados, as tecnologias digitais são aplicadas de maneira isolada, sem integração consistente entre inteligência analítica, coordenação logística e governança ambiental. Tal fragmentação limita a consolidação de arquiteturas sistêmicas orientadas à circularidade e à sustentabilidade operacional.

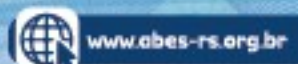
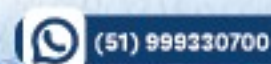
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Dessa forma, os resultados evidenciam importante lacuna científica relacionada ao desenvolvimento de modelos integrados capazes de articular transformação digital, servitização e gestão ambiental em cadeias reversas complexas.

4.2. Aplicações digitais na logística reversa de resíduos complexos

A revisão sistemática permitiu identificar aplicações digitais voltadas à qualificação da logística reversa, incluindo previsão de geração de resíduos, roteirização inteligente, rastreamento em tempo real, automação logística e suporte analítico à tomada de decisão.

Os estudos analisados demonstraram que aplicações fundamentadas em inteligência artificial vêm sendo utilizadas para otimização dinâmica de rotas, previsão de volumes gerados e ampliação da eficiência logística, contribuindo para redução de custos operacionais e emissões associadas ao transporte reverso (ZHANG; WANG; LIU, 2022).

Paralelamente, tecnologias fundamentadas em IoT apresentaram potencial para ampliação da rastreabilidade e da visibilidade operacional em cadeias reversas complexas, favorecendo integração informacional e monitoramento contínuo dos fluxos logísticos (GARRIDO-HIDALGO et al., 2019).

Outro eixo recorrente refere-se ao uso de blockchain como mecanismo voltado à confiabilidade informacional e à transparência nos processos de destinação ambiental, reduzindo assimetrias informacionais entre os agentes envolvidos nos sistemas reversos (DUTTA et al., 2022; WILSON; BHANDARI; TAYLOR, 2021).

Apesar dos avanços identificados, observou-se predominância de aplicações fragmentadas e baixa interoperabilidade entre sistemas, dificultando a consolidação de estruturas logísticas efetivamente inteligentes, colaborativas e orientadas à circularidade.

Sob essa perspectiva, os resultados reforçam que o principal desafio contemporâneo não reside apenas na adoção de tecnologias digitais, mas na capacidade de integrá-las de forma sistêmica à governança ambiental e à coordenação logística das cadeias reversas.

4.3. Limitações estruturais dos modelos atualmente empregados

Os resultados evidenciam que as principais limitações identificadas na literatura decorrem menos da ausência de tecnologias disponíveis e mais da reduzida integração entre dados, processos, agentes econômicos e mecanismos de governança ambiental presentes nos sistemas de logística reversa.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Grande parte das pesquisas concentra-se em soluções operacionais específicas — como rastreamento, automação logística e otimização de transporte — sem considerar a complexidade sistêmica inerente aos fluxos reversos contemporâneos. Essa fragmentação compromete a articulação entre previsão, monitoramento, inteligência analítica e desempenho ambiental.

No caso da cadeia de pneus pós-consumo, tais limitações tornam-se ainda mais relevantes em razão da elevada dispersão territorial dos pontos de geração, da variabilidade dos fluxos coletados e da multiplicidade de agentes envolvidos nas etapas de coleta, transporte, triagem e valorização energética.

Além disso, verificou-se escassez de estudos voltados à integração entre servitização e transformação digital aplicada à logística reversa. Embora existam avanços relacionados à digitalização industrial, poucos trabalhos exploram modelos colaborativos fundamentados em monitoramento contínuo, rastreabilidade integrada e serviços ambientais inteligentes.

Outra limitação identificada refere-se à baixa centralidade das questões ambientais nas arquiteturas analisadas. Em diversos estudos, os benefícios ambientais aparecem como consequências indiretas de ganhos operacionais, e não como elementos estruturantes da lógica sistêmica dos modelos desenvolvidos.

Dessa forma, os resultados indicam necessidade crescente de transição de modelos fragmentados para arquiteturas integradas capazes de conectar transformação digital, inteligência logística, servitização e governança ambiental em sistemas orientados à circularidade.

4.4. Framework conceitual e diretrizes integradas para qualificação da logística reversa

A partir da integração entre revisão sistemática, análise bibliométrica e interpretação crítica das lacunas identificadas, propõe-se um framework conceitual orientado à articulação entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus sob a perspectiva da economia circular.

Diferentemente das abordagens predominantemente operacionais identificadas na literatura, o framework proposto estrutura-se como arquitetura sistêmica fundamentada na integração entre fluxos físicos, informacionais e decisórios. Sua lógica central parte do entendimento de que a eficiência da logística reversa contemporânea depende da articulação entre rastreabilidade digital, inteligência analítica, coordenação logística e governança ambiental.

O modelo organiza-se em quatro eixos interdependentes: integração de dados e rastreabilidade digital; inteligência analítica e suporte à decisão; servitização e gestão colaborativa; e alinhamento entre logística reversa, circularidade e descarbonização industrial.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

No primeiro eixo, tecnologias como IoT, blockchain e computação em nuvem atuam como infraestrutura de suporte à coleta, processamento e compartilhamento de informações em tempo real. O segundo eixo incorpora inteligência artificial e análise preditiva como mecanismos de otimização logística e qualificação da tomada de decisão.

O terceiro eixo relaciona-se à constituição de ecossistemas colaborativos de serviços ambientais inteligentes envolvendo fabricantes, operadores logísticos, recicladores e agentes regulatórios. Por fim, o quarto eixo desloca a logística reversa de uma lógica centrada exclusivamente na destinação de resíduos para uma perspectiva orientada à recuperação de valor, eficiência sistêmica e sustentabilidade industrial.

Nesse contexto, destaca-se o coprocessamento em fornos de clínquer como alternativa relevante de valorização energética dos pneus pós-consumo no Brasil, alinhando a logística reversa às agendas contemporâneas de transição ecológica e descarbonização produtiva.

Sob a perspectiva metodológica, a proposição do framework aproxima-se dos fundamentos da Design Science Research (DSR), ao estruturar um artefato conceitual orientado à resolução de problemas complexos relacionados à gestão ambiental de resíduos pneumáticos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JR., 2015).

Assim, o framework proposto ultrapassa uma abordagem meramente descritiva e contribui para o desenvolvimento de sistemas reversos mais inteligentes, rastreáveis, colaborativos e alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade e inovação ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam que a transformação digital e a servitização possuem potencial estratégico para qualificar a logística reversa de pneus no contexto da economia circular, especialmente ao favorecer maior integração entre rastreabilidade, inteligência analítica, coordenação logística e governança ambiental. Em cadeias reversas marcadas por elevada complexidade operacional e dispersão territorial, a articulação entre tecnologias digitais e serviços ambientais colaborativos amplia possibilidades de monitoramento, integração informacional e suporte à tomada de decisão.

A análise da literatura demonstrou crescimento expressivo das pesquisas relacionadas à convergência entre transformação digital, sustentabilidade e logística reversa, sobretudo nos últimos anos. Entretanto, também revelou que grande parte dos estudos ainda permanece fragmentada, concentrando-se em aplicações tecnológicas isoladas e com limitada integração entre infraestrutura digital, gestão ambiental e modelos colaborativos orientados à circularidade.

Nesse cenário, o framework conceitual proposto constitui a principal contribuição teórica do estudo ao integrar, em uma mesma arquitetura analítica, elementos relacionados à rastreabilidade digital,

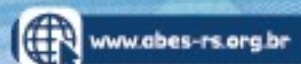
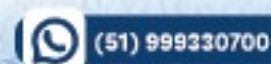
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



inteligência logística, servitização e sustentabilidade operacional. Mais do que propor uma estrutura tecnológica, o modelo busca contribuir para a construção de sistemas reversos mais conectados, colaborativos e alinhados às demandas contemporâneas de transição ecológica e descarbonização produtiva.

Além das contribuições acadêmicas, o estudo também apresenta implicações relevantes para gestores, formuladores de políticas públicas e agentes envolvidos na cadeia reversa de pneus, ao evidenciar oportunidades de integração entre tecnologias digitais, governança ambiental e serviços inteligentes aplicados à gestão de resíduos complexos.

Por fim, reconhece-se que a pesquisa possui limitações associadas ao seu caráter teórico-conceitual e à ainda reduzida quantidade de estudos especificamente direcionados à integração entre transformação digital, servitização e logística reversa de pneus pós-consumo. Dessa forma, recomenda-se que investigações futuras avancem na validação empírica do framework proposto, por meio de estudos de caso, aplicações em contextos operacionais reais e análises comparativas envolvendo diferentes cadeias reversas e modelos de economia circular.

REFERÊNCIAS

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, Amsterdam, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 1 out. 2009.

DONTHU, Naveen et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, Amsterdam, v. 133, p. 285–296, 2021.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JR., José Antônio Valle. *Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUTTA, Pratik et al. Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Oxford, v. 142, 2022.

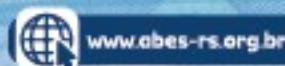
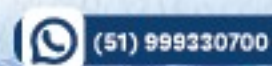
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



FANG, Xiaoyu; LI, Yue; CHEN, Ming. Digital transformation and sustainable supply chain management: A systematic review and future research agenda. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 382, 2023.

GARRIDO-HIDALGO, Carlos et al. IoT applications in waste collection logistics and smart cities: A review. *Waste Management*, Oxford, v. 87, p. 566–580, 2019.

GEISSDOERFER, Martin et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 143, p. 757–768, 2017.

GUIDE, V. Daniel R.; VAN WASSENHOVE, Luk N. *The evolution of closed-loop supply chain research*. Operations Research, Catonsville, v. 57, n. 1, p. 10–18, 2009.

HABERT, Guilherme et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in cement and clinker production: A review. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 275, 2020.

KOHTAMÄKI, Marko; PARIDA, Vinit; OGHENEVWEDE, Emmanuel Y. Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm. *Journal of Business Research*, Amsterdam, v. 104, p. 380–392, 2022.

OLAWADE, David B.; ADEBAYO, Kehinde J.; SALAMI, Ridwan O. Artificial intelligence and sustainability transitions in logistics systems. *Sustainable Futures*, Amsterdam, v. 8, 2024.

RAJPUT, Shradha; SINGH, Surya Prakash. Connecting circular economy and Industry 4.0. *International Journal of Information Management*, Oxford, v. 49, p. 98–113, 2020.

WILSON, James; BHANDARI, Ravi; TAYLOR, Mark. Blockchain-enabled reverse logistics systems and sustainable waste governance. *Resources, Conservation and Recycling*, Amsterdam, v. 168, 2021.

ZHANG, Yong; WANG, Lei; LIU, Chen. Artificial intelligence applications in reverse logistics and waste management systems. *Waste Management*, Oxford, v. 138, p. 410–422, 2022.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

