Refas
12 anos
Revista Fatec Zona Sul
1ª. Edição Outubro 2014
ISSN 2359-182X

LOGÍSTICA REVERSA INTELIGENTE E RASTREABILIDADE DIGITAL: INTEGRAÇÃO ENTRE SISTEMAS CIBERFÍSICOS E EFICIÊNCIA OPERACIONAL NA GESTÃO DE RESÍDUOS VÍTREOS

INTELLIGENT REVERSE LOGISTICS AND DIGITAL TRACEABILITY: INTEGRATION OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS AND OPERATIONAL EFFICIENCY IN GLASS WASTE MANAGEMENT

LOGÍSTICA INVERSA INTELIGENTE Y TRAZABILIDAD DIGITAL: INTEGRACIÓN DE SISTEMAS CIBERFÍSICOS Y EFICIENCIA OPERATIVA EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE VIDRIO

Fernando Rodrigo Souza[1]
Roque Ribeiro Junior[2]

DOI: 10.26853/Refas_ISSN-2359-182X_v13n01_06

Artigo recebido em: julho de 2026
Artigo aceito em setembro de 2026

RESUMO

O presente estudo analisa a integração entre tecnologias digitais e operações físicas no contexto da logística reversa de resíduos, com ênfase na recuperação de embalagens vítreas e na utilização de sistemas ciberfísicos. Fundamentado em abordagem qualitativa com suporte quantitativo, o trabalho adota o estudo de caso múltiplo e a triangulação metodológica como estratégias de investigação, permitindo a análise aprofundada de processos organizacionais complexos. Os resultados evidenciam que a incorporação de algoritmos de roteirização, modelos preditivos e mecanismos de rastreabilidade digital contribui significativamente para a eficiência operacional, redução de perdas e ampliação da transparência na cadeia logística. Os dados analisados indicam elevada capacidade de processamento, com volumes expressivos de resíduos geridos e taxas relevantes de destinação para reciclagem, evidenciando a consolidação de um modelo tecnicamente robusto. Observa-se, ainda, que os ganhos operacionais extrapolam a etapa pós-consumo, impactando a organização produtiva e promovendo maior integração entre os agentes da cadeia. Contudo, a análise crítica revela que a efetividade do modelo depende de fatores estruturais, como infraestrutura logística, qualidade da segregação na origem e estabilidade dos mercados de recicláveis. Conclui-se que a articulação entre inteligência digital, eficiência logística e governança ambiental constitui um vetor estratégico para a transição à economia circular, embora persistam desafios relacionados à inclusão social, escalabilidade territorial e adaptação institucional.

[1] Graduado em Tecnologia em Polímeros pela Fatec Sorocaba, em Logística pela Fatec Sorocaba, em Gestão da Qualidade pela Fatec Sorocaba, em Gestão Empresarial pela Fatec Itu e em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Nossa Senhora do Patrocínio. E-mail: fernandorodrigosouza4@gmail.com. OrcId: https://orcid.org/0000-0003-2874-5680.
[2] Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas. Docente do Grupo Athon Sorocaba. E-mail: roque.junior@ceunsp.edu.br. OrcId: https://orcid.org/0009-0009-4849-6758.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

Palavras-chave Logística reversa; Economia circular; Rastreabilidade digital; *Blockchain*; Eficiência operacional; Sistemas ciberfísicos; Gestão de resíduos.

ABSTRACT

This study analyzes the integration between digital technologies and physical operations in the context of reverse logistics, with emphasis on glass packaging recovery and the use of cyber-physical systems. Based on a qualitative approach supported by quantitative data, the research adopts a multiple case study and methodological triangulation as investigative strategies, enabling an in-depth analysis of complex organizational processes. The findings demonstrate that the incorporation of routing algorithms, predictive models, and digital traceability mechanisms significantly enhances operational efficiency, reduces losses, and improves transparency across the logistics chain. The analyzed data reveal high processing capacity, with substantial volumes of managed waste and significant recycling rates, indicating the consolidation of a technically robust model. Additionally, operational gains extend beyond post-consumption stages, influencing production organization and fostering greater integration among supply chain actors. However, critical analysis shows that the model's effectiveness depends on structural factors such as logistics infrastructure, quality of source separation, and stability of recycling markets. It is concluded that the articulation between digital intelligence, logistical efficiency, and environmental governance represents a strategic driver for the transition to a circular economy, although challenges remain regarding social inclusion, territorial scalability, and institutional adaptation.

Keywords: Reverse logistics; Circular economy; Digital traceability; Blockchain; Operational efficiency; Cyber-physical systems; Waste management.

RESUMEN

Este estudio analiza la integración de tecnologías digitales y operaciones físicas en la logística inversa de residuos, con énfasis en la recuperación de envases de vidrio y el uso de sistemas ciberfísicos. Mediante un enfoque cualitativo con apoyo cuantitativo y un estudio de casos múltiples, se identificó que la aplicación de algoritmos de optimización de rutas, modelos predictivos y herramientas de trazabilidad digital mejora la eficiencia operativa, reduce pérdidas y fortalece la transparencia de la cadena logística. Los resultados muestran una elevada capacidad de gestión de residuos y un desempeño consistente en el reciclaje, favoreciendo la organización productiva y la integración entre los actores de la cadena. No obstante, la eficacia del modelo depende de factores como la infraestructura logística, la calidad de la separación en origen y la estabilidad del mercado de materiales reciclables. Se concluye que la integración entre inteligencia digital, eficiencia logística y gobernanza ambiental constituye un elemento estratégico para impulsar la transición hacia la economía circular.

Palabras clave: Logística inversa; economía circular; trazabilidad digital; blockchain; eficiencia operativa; sistemas ciberfísicos.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

1 INTRODUÇÃO

A intensificação das dinâmicas produtivas contemporâneas, associada à expansão do consumo e à crescente complexidade das cadeias globais de suprimentos, tem ampliado de forma significativa a geração de resíduos sólidos, impondo desafios estruturais à gestão ambiental e à organização logística. Nesse contexto, a transição de modelos lineares de produção, baseados na lógica extrair, produzir e descartar, para sistemas orientados pela circularidade constitui uma exigência não apenas ambiental, mas também econômica e

institucional, na medida em que redefine os padrões de eficiência e competitividade industrial (Geissdoerfer *et al*., 2017; Ghisellini; Cialani e Ulgiati 2016; Kirchherr; Reike e Hekkert, 2017).

A economia circular propõe a reconfiguração dos fluxos de materiais e energia, promovendo a reinserção de resíduos nos ciclos produtivos e a extensão do valor econômico dos recursos ao longo do tempo. Nesse arranjo, a logística reversa assume papel estruturante, ao viabilizar o retorno de produtos e materiais ao sistema produtivo, articulando dimensões operacionais, tecnológicas e institucionais sob a lógica da responsabilidade compartilhada (Brandão e Sobral, 2012; SOUZA *et al*., 2023). Todavia, apesar dos avanços normativos e do amadurecimento conceitual, a operacionalização efetiva desses sistemas permanece condicionada por entraves relacionados à fragmentação dos fluxos logísticos, à baixa integração informacional e à limitada capacidade de rastreabilidade ao longo da cadeia (Demajorovic; Augusto e Souza, 2016).

No caso específico dos resíduos vítreos, observa-se uma contradição relevante: embora o vidro seja um material integralmente reciclável e com elevado potencial de reinserção produtiva, sua cadeia reversa apresenta ineficiências significativas, sobretudo nas etapas de coleta, segregação e consolidação logística. Estudos apontam que tais limitações decorrem de fatores estruturais, como custos de transporte, dispersão geográfica dos pontos de geração e fragilidades nos sistemas de separação na origem, além de aspectos institucionais e organizacionais que dificultam a coordenação entre os agentes envolvidos (Caetano e Luna, 2018; Gonçalves e Dutra, 2023; Heckler e Badalotti, 2020).

Paralelamente, o avanço das tecnologias digitais tem impulsionado a emergência da chamada Logística 4.0, caracterizada pela integração entre sistemas físicos e informacionais por meio de arquiteturas baseadas em dados. Nesse contexto, os sistemas ciberfísicos configuram-se como estruturas híbridas capazes de sincronizar operações materiais e processamento informacional em tempo real, ampliando a capacidade de monitoramento, controle e otimização dos fluxos logísticos (Hermann; Pentek e Otto, 2016). Tecnologias como *blockchain, Internet* das Coisas e algoritmos preditivos introduzem mecanismos de rastreabilidade, transparência e automação que potencializam a eficiência operacional e reduzem incertezas ao longo da cadeia (Petroni; Monaco e Gonçalves, 2018; SILVA *et al*., 2020).

Entretanto, a literatura evidencia que a incorporação dessas tecnologias ocorre, frequentemente, de maneira dissociada das condições materiais e institucionais que estruturam os sistemas logísticos, resultando em abordagens fragmentadas que privilegiam soluções tecnológicas em detrimento de uma compreensão integrada do fenômeno (Modesto Junior *et al*., 2025). Essa lacuna analítica limita tanto o potencial explicativo dos estudos quanto a efetividade das aplicações práticas, especialmente em contextos marcados por assimetrias infraestruturais e instabilidade dos mercados de recicláveis (Demajorovic; Augusto e Souza, 2016).

Diante desse quadro, torna-se necessário desenvolver abordagens que articulem, de forma coerente, as dimensões tecnológica, operacional e institucional da logística reversa, considerando a rastreabilidade digital não apenas como ferramenta de controle, mas como elemento estruturante da governança dos fluxos materiais. Nesse sentido, a integração entre sistemas ciberfísicos e mecanismos avançados de rastreabilidade emerge como um vetor estratégico para a reconfiguração da gestão de resíduos, especialmente no que se refere à cadeia do vidro, caracterizada por elevado potencial de circularidade e desafios logísticos específicos.

Nesse contexto, o presente estudo é orientado pelo seguinte problema de pesquisa:

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

Como a integração entre sistemas ciberfísicos e mecanismos de rastreabilidade digital influencia a eficiência operacional da logística reversa de resíduos vítreos em contextos caracterizados por limitações estruturais e institucionais?

O objetivo geral consiste em analisar de que forma a integração entre sistemas ciberfísicos e tecnologias de rastreabilidade digital contribui para a eficiência operacional na logística reversa de resíduos vítreos.

Como desdobramento, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

a) Examinar os fundamentos teóricos da economia circular e sua relação com a logística reversa;
b) Identificar os principais entraves operacionais e institucionais na gestão de resíduos vítreos;
c) Analisar o papel das tecnologias digitais, com destaque para sistemas ciberfísicos e *blockchain*, na otimização dos fluxos logísticos reversos;
d) Avaliar os impactos da rastreabilidade digital na transparência, coordenação e eficiência da cadeia;
e) Discutir os limites e as condições de aplicabilidade dessas soluções em contextos reais.

A justificativa do estudo fundamenta-se na necessidade de avançar na compreensão integrada entre tecnologia e logística, superando abordagens reducionistas que tratam a inovação digital de forma isolada. Do ponto de vista teórico, o trabalho contribui para a consolidação de um referencial analítico capaz de articular diferentes dimensões do fenômeno, ampliando o potencial explicativo da literatura. Sob a perspectiva prática, oferece subsídios para o aprimoramento de modelos operacionais em logística reversa, com implicações diretas para a eficiência produtiva, a sustentabilidade ambiental e a governança das cadeias de suprimentos.

Por fim, a relevância do estudo se insere no contexto mais amplo da transição para a economia circular, na qual a articulação entre inteligência digital, eficiência logística e coordenação institucional se configura como condição necessária para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, transparentes e sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicia-se o referencial teórico pela transição para a economia circular.

2.1 Transição para a economia circular e reconfiguração sistêmica das cadeias de suprimentos

A transição para a economia circular deve ser compreendida como um processo de reestruturação sistêmica das cadeias de suprimentos, no qual a lógica linear, fundamentada na extração, transformação e descarte, é progressivamente substituída por arranjos organizacionais baseados na circularidade dos fluxos materiais e informacionais. Essa mudança não se limita à adoção de práticas isoladas de reaproveitamento, mas implica a redefinição dos fundamentos operacionais e institucionais que orientam a produção, a distribuição e o consumo. Nesse

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

sentido, a emergência de arquiteturas logísticas orientadas por dados, articuladas a sistemas ciberfísicos, evidencia uma nova configuração produtiva caracterizada pela integração entre infraestrutura física, governança informacional e tecnologias digitais, ampliando a capacidade adaptativa e a eficiência sistêmica das organizações (Hermann; Pentek e Otto, 2016).

No contexto brasileiro, essa transformação adquire contornos institucionais mais definidos a partir da implementação da Estratégia Nacional de Economia Circular, vinculada à política industrial recente, que estabelece diretrizes voltadas à incorporação da circularidade desde a concepção dos produtos até as etapas de pós-consumo (MDIC, 2024). Tal movimento reforça a centralidade da logística reversa como elemento estruturante desse novo paradigma, uma vez que sua operacionalização viabiliza a reinserção de resíduos nos ciclos produtivos, promovendo simultaneamente eficiência no uso de recursos e redução de externalidades ambientais.

Entretanto, a efetividade da logística reversa está condicionada à constituição de arranjos institucionais complexos, nos quais se articulam múltiplos agentes sob a lógica da responsabilidade compartilhada. Conforme argumentam Brandão e Sobral (2012) e Souza *et al.* (2023), a coordenação entre setor público, iniciativa privada e organizações da sociedade civil constitui um fator crítico para o funcionamento desses sistemas, sobretudo em contextos marcados por assimetrias estruturais. Evidências empíricas recentes indicam avanços relevantes nesse campo, como demonstrado por iniciativas de grande escala que têm ampliado a recuperação de materiais e fortalecido a inclusão produtiva de cooperativas, evidenciando impactos simultaneamente econômicos e sociais (Exame, 2025).

No caso específico das embalagens de vidro, a literatura aponta uma tensão entre o elevado potencial de circularidade do material e as limitações operacionais associadas à sua gestão pós-consumo. Embora o vidro seja integralmente reciclável, sua cadeia reversa enfrenta entraves relacionados à coleta seletiva, à segregação adequada e à viabilidade econômica do transporte e da reintegração produtiva (Caetano e Luna, 2018; Gonçalves e Dutra, 2023). Ainda assim, avanços institucionais e organizacionais têm possibilitado a ampliação das taxas de reciclagem, refletindo a consolidação gradual de mecanismos de governança e coordenação setorial (Abravidro, 2025).

Em uma perspectiva ampliada, a mineração urbana emerge como componente estratégico da economia circular ao redefinir resíduos como ativos econômicos inseridos em cadeias produtivas alternativas. Tal abordagem desloca o enfoque da gestão de resíduos para a valorização de materiais, integrando-os a novos circuitos produtivos e ampliando as possibilidades de geração de valor (Biazzi, 2002). Iniciativas recentes no contexto brasileiro evidenciam a materialização dessa lógica, com a implantação de estruturas industriais dedicadas ao processamento de resíduos em larga escala, indicando a crescente institucionalização desse modelo (Ambipar, 2024).

Apesar desses avanços, a literatura converge ao apontar que a consolidação da economia circular ainda enfrenta barreiras estruturais significativas, particularmente em países em desenvolvimento. Fatores como elevados custos logísticos, fragmentação dos sistemas de coleta, informalidade nas cadeias de reciclagem e fragilidades institucionais limitam a eficiência e a escalabilidade dos sistemas reversos (Demajorovic; Augusto e Souza, 2016; Heckler e Badalotti, 2020). Além disso, análises recentes indicam que a transição para modelos circulares exige transformações que transcendem a dimensão tecnológica, demandando a articulação entre variáveis econômicas, sociais e territoriais, sob pena de comprometer a efetividade das políticas e práticas implementadas (Boletim Nacional, 2024).

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

Dessa forma, a reconfiguração das cadeias de suprimentos no contexto da economia circular deve ser interpretada como um processo multidimensional, no qual a integração entre logística, tecnologia e governança constitui condição necessária para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados aos princípios da sustentabilidade.

2.2 Dimensão Tecnológica e Operacional da Logística Reversa

A "*SmartReverse*", empresa que opera como objeto analítico central deste relatório, atua na vanguarda desta transformação ao integrar a recuperação física de vidro com algoritmos preditivos e redes descentralizadas. Essa integração operacionaliza os Sistemas Ciberfísicos como estruturas híbridas nas quais processos físicos e digitais são codependentes, sendo a eficiência resultante da sincronização entre coleta material e processamento informacional (Souza, 2023).

A evolução de um referencial teórico exige o abandono de uma mera justaposição de ferramentas tecnológicas, buscando, ao invés disso, uma construção integrada que concilie eficiência de máquina com a realidade do trabalho humano. A literatura acadêmica evidencia uma fragmentação analítica persistente, caracterizada pela dissociação entre abordagens tecnológicas, econômicas e socioespaciais, o que compromete a construção de modelos explicativos integrados, conforme Quadro 1 (Modesto Junior *et al*., 2025).

Quadro 1 - Perspectivas Analíticas em Logística Reversa

Corrente Teórica	Autores Representativos	Foco Analítico Principal	Divergências e Lacunas Identificadas
Determinismo Tecnológico e Otimização de Dados	Silva *et al.* (2020); Souza (2023); Petroni, Monaco e Gonçalves (2018); Modesto Junior *et al.* (2025); Biazzi (2002); Kirchherr *et al*. (2017); Geissdoerfer *et al.* (2017)	Automação via *smart contracts*, rastreabilidade em tempo real (*IoT*), eficiência de roteirização algorítmica e redução de perdas sistêmicas.	Tendem a subestimar fricções sociais e precariedade da infraestrutura física, focando em ecossistema digital idealizado.
Estruturalismo de Processos e Infraestrutura Física	Gonçalves e Marins (2006); Caetano e Luna (2018); Macedo (2016); Lino e Bonetto (2013); Stahel (2016); Ghisellini *et al.* (2016)	Integridade física dos materiais (como o vidro), separação rigorosa na fonte geradora, eliminação de gargalos processuais e mapeamento de fluxos.	Focam excessivamente na mecânica da triagem e na infraestrutura rígida, apresentando lacunas metodológicas na escalabilidade preditiva e em redes distribuídas.
Realismo Socioeconômico e Dinâmicas Institucionais	Demajorovic, Augusto e Souza (2016); Heckler e Badalotti (2020); Figueiró et al. (2014); Brandão e	Vulnerabilidade sistêmica de catadores, barreiras territoriais continentais, altos custos de frete, falhas	Apontam criticamente falhas do modelo em países em desenvolvimento, mas frequentemente

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

	Sobral (2012); Souza e Corbin (2025); Ellen MacArthur Foundation (2019); Lacy e Rutqvist (2015)	de incentivos econômicos na legislação.	carecem de propostas tecnológicas escaláveis para mitigar tais assimetrias sociais.

Fonte: Elaboração própria com base em dados operacionais sistematizados (2026)

O modelo de negócios da *"SmartReverse"* materializa o desafio de unificar essas correntes, aplicando inteligência algorítmica para orquestrar o ciclo reverso urbano e utilizando registros imutáveis para mitigar a insegurança jurídica e operacional (Silva *et al.,* 2020). Essa integração evidencia a consolidação dos Sistemas Ciberfísicos, nos quais as fronteiras entre o domínio físico e o digital tornam-se progressivamente indistintas, permitindo que a gestão de resíduos evolua de uma prática operacional isolada para um sistema adaptativo orientado por dados e decisões automatizadas (Hermann, 2016; Souza, 2023).

Autores como Petroni, Monaco e Gonçalves (2018) e Biazzi (2002) reforçam que a automação via *smart contracts* e a rastreabilidade em tempo real (*IoT*) são elementos centrais para a eficiência sistêmica, embora frequentemente subestimem as fricções sociais e a precariedade da infraestrutura física.

2.3 Logística 4.0 e a Transformação Digital na Gestão de Resíduos

Sob a perspectiva epistemológica, a construção de um referencial teórico consistente demanda o afastamento de abordagens reducionistas fundamentadas na mera agregação instrumental de tecnologias, exigindo, em contrapartida, uma integração analítica capaz de articular, de forma coerente, eficiência técnica, organização do trabalho e condicionantes territoriais.

A literatura acadêmica brasileira evidencia uma fragmentação recorrente que compromete a apreensão holística do fenômeno, na medida em que estudos orientados pela viabilidade econômica tendem a privilegiar métricas financeiras e indicadores de desempenho, negligenciando aspectos relacionados à rastreabilidade digital, à governança informacional e à transparência dos fluxos logísticos. Por outro lado, investigações de caráter tecnológico frequentemente operam em níveis elevados de abstração, desconsiderando as assimetrias territoriais, institucionais e infraestruturais que condicionam a implementação concreta dessas soluções em contextos reais (Demajorovic; Augusto e Souza, 2016; Heckler e Badalotti, 2020; Figueiró *et al*., 2014).

Essa dissociação analítica não apenas limita o potencial explicativo das abordagens existentes, como também compromete a formulação de soluções operacionais efetivas. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de modelos analíticos integradores, capazes de superar tal dicotomia e de incorporar, de maneira simultânea, variáveis tecnológicas, econômicas, sociais e institucionais (Gonçalves e Dutra, 2023).

O modelo de negócios da *"SmartReverse"* pode ser compreendido como uma tentativa concreta de superação dessa clivagem, ao combinar inteligência algorítmica na coordenação dos fluxos logísticos reversos urbanos com o uso de registros imutáveis, que operam como mecanismos de confiança em contextos marcados por incertezas institucionais e assimetrias informacionais (SILVA *et al.,* 2020).

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

3 MÉTODO

A presente pesquisa fundamenta-se em um delineamento metodológico de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e suporte analítico em dados quantitativos operacionais. Tal combinação metodológica permite não apenas a descrição dos fenômenos observados, mas também sua interpretação crítica em um contexto empírico complexo, conforme destacado por Creswell (2018), ao enfatizar que a integração de abordagens amplia a compreensão de fenômenos organizacionais multifacetados.

No que se refere à classificação, a pesquisa é caracterizada como aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento voltado à resolução de problemas concretos relacionados à logística reversa e à sustentabilidade, conforme argumenta Gil (2019). Em termos de abordagem, adota-se o método qualitativo, que, segundo Minayo (2016), possibilita a compreensão aprofundada das relações, processos e significados que estruturam os fenômenos sociais.

Quanto aos objetivos, a investigação apresenta caráter exploratório e descritivo. Exploratório, por buscar maior familiaridade com o fenômeno investigado, e descritivo, por detalhar características, dinâmicas e relações operacionais do sistema analisado, conforme classificação proposta por Gil (2019) e Vergara (2020).

O delineamento metodológico está fundamentado no estudo de caso múltiplo, estratégia considerada adequada para a análise de fenômenos contemporâneos inseridos em contextos reais, especialmente quando as fronteiras entre objeto e contexto não são claramente definidas, conforme Yin (2018). A escolha por essa estratégia permite compreender, de forma aprofundada, os mecanismos operacionais, tecnológicos e organizacionais associados ao desempenho da "*SmartReverse*".

De forma complementar, incorpora-se a lógica da pesquisa-ação, conforme proposta por Thiollent (2018), na medida em que há uma aproximação analítica entre o pesquisador e o contexto investigado, favorecendo a produção de conhecimento aplicado e socialmente relevante. Essa abordagem contribui para a compreensão dinâmica dos processos, especialmente em sistemas complexos como a logística reversa.

A operacionalização da análise foi estruturada a partir da triangulação de métodos, integrando múltiplas fontes de evidência, como dados operacionais, registros documentais, literatura científica e observações empíricas. Conforme Babbie (2017), a triangulação metodológica amplia a confiabilidade dos resultados ao permitir a convergência de diferentes perspectivas analíticas. Esse entendimento é reforçado por Nierotka, Monteiro e Silva (2014) e Zappellini e Feuerschütte (2013), ao destacarem que a triangulação contribui para maior consistência e profundidade interpretativa nas pesquisas em ciências sociais aplicadas.

No que se refere às técnicas de coleta de dados, foram utilizadas entrevistas semiestruturadas, observação direta, análise documental e registros de campo, conforme recomenda Flick (2019). A combinação dessas técnicas permite captar tanto aspectos objetivos quanto subjetivos do fenômeno investigado, contribuindo para a consistência dos dados, conforme Richardson (2017). Adicionalmente, a sistematização dessas informações segue os princípios metodológicos apresentados por Lakatos e Marconi (2017) e Cervo, Bervian e Silva (2007), no que se refere à organização e validação dos dados científicos.

A análise dos dados foi conduzida por meio da técnica de análise de conteúdo, conforme Bardin (2016), estruturada em três etapas: pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados. Essa abordagem permite a categorização sistemática das informações e a identificação de padrões analíticos relevantes. Complementarmente, a interpretação dos dados

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

foi orientada por categorias teóricas previamente definidas e por categorias emergentes identificadas durante o processo investigativo, conforme abordagem defendida por Demo (2018) e Triviños (2015).

No contexto específico desta pesquisa, os dados quantitativos apresentados na Tabela 1 foram tratados como evidências empíricas que subsidiam a análise qualitativa, permitindo a articulação entre mensuração objetiva e interpretação teórica. Essa integração é fundamental para a compreensão de sistemas complexos, nos quais os indicadores numéricos não são suficientes para explicar a totalidade do fenômeno.

A validade e a confiabilidade da pesquisa foram asseguradas por meio da triangulação de dados, da utilização de múltiplas fontes de evidência e da sistematização dos procedimentos metodológicos, conforme os princípios estabelecidos por Campbell e Stanley (2015). Além disso, foram considerados critérios de rigor qualitativo, como credibilidade, consistência e transferibilidade, conforme discutido por Severino (2017) e Martins e Theóphilo (2016).

Por fim, a metodologia adotada possibilitou não apenas a descrição do desempenho da "*SmartReverse*", mas também sua interpretação crítica, evidenciando relações entre eficiência operacional, uso de tecnologia e governança ambiental. Dessa forma, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento aplicado na área de logística reversa, em consonância com os pressupostos metodológicos das ciências sociais aplicadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados da empresa fictícia "*SmartReverse*" evidencia um padrão operacional caracterizado pela articulação entre elevada escala de processamento, intensiva utilização de dados e ganhos mensuráveis de eficiência ao longo da cadeia de logística reversa. Diferentemente de abordagens meramente descritivas, os indicadores apresentados permitem avançar na compreensão dos mecanismos pelos quais a integração entre sistemas ciberfísicos e rastreabilidade digital contribui para a reconfiguração dos fluxos materiais, respondendo diretamente ao problema de pesquisa proposto.

A partir da Tabela , observa-se que o desempenho da organização não se limita à ampliação da capacidade operacional, mas resulta da coordenação informacional dos fluxos logísticos. O rastreamento de mais de 7,7 milhões de toneladas de resíduos, associado a uma taxa de 79% de destinação para reciclagem, evidencia não apenas eficiência operacional, mas a redução de assimetrias informacionais ao longo da cadeia. Esse resultado sugere que a rastreabilidade digital atua como mecanismo estruturante, permitindo maior controle sobre a destinação dos materiais e mitigando perdas associadas à opacidade dos sistemas tradicionais, em consonância com os pressupostos de integração sistêmica discutidos por Hermann (2016).

A elevada capilaridade operacional, expressa na integração de mais de 4.500 unidades e 40.000 organizações, indica que a eficiência observada decorre da capacidade de coordenação em rede, e não apenas de ganhos isolados de produtividade. Esse achado reforça a perspectiva de que a logística reversa, quando apoiada por sistemas digitais, assume caráter sistêmico, conforme argumentado por Figueiró et al. (2014), ao ampliar a interdependência entre os agentes e reduzir custos de transação.

No que se refere ao volume de 1,5 bilhão de quilogramas de resíduos reciclados, verifica-se que a escala, por si só, não explica o desempenho observado. A eficiência decorre

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

da sincronização entre coleta, processamento e destinação, mediada por sistemas informacionais que permitem decisões em tempo real. Esse aspecto evidencia a materialização de sistemas ciberfísicos, nos quais a integração entre dimensão digital e infraestrutura física redefine os parâmetros de desempenho logístico (Hermann, 2016; Souza, 2023).

Os ganhos econômicos, expressos pelo aumento médio de 22% nos resultados financeiros, associados à redução de 24% nas perdas produtivas, indicam que a eficiência logística não se restringe à etapa pós-consumo, mas retroalimenta a organização produtiva. Esse resultado dialoga com a literatura que aponta a logística reversa como vetor de eficiência sistêmica, embora frequentemente condicionada por fatores estruturais (Demajorovic; Augusto; Souza, 2016).

Do ponto de vista administrativo, a redução de 35% no tempo operacional evidencia que a digitalização dos processos contribui para a eliminação de atividades redundantes e para o aumento da capacidade de resposta organizacional. Esse ganho de produtividade está diretamente relacionado à automatização de fluxos informacionais, reforçando o papel da tecnologia como elemento de integração e não apenas de suporte.

Entretanto, a análise crítica dos resultados indica que a eficiência observada não pode ser interpretada de forma absoluta. A ausência de métricas diretas de emissões limita a avaliação ambiental do modelo, restringindo a análise a indicadores operacionais e econômicos. Adicionalmente, a dependência de infraestrutura tecnológica e logística robusta sugere que a replicabilidade do modelo pode ser comprometida em contextos marcados por informalidade e fragilidade institucional, conforme apontado por Heckler e Badalotti (2020) e Quadro 2.

Quadro 2 - Indicadores quantitativos de desempenho da "*SmartReverse*"

Indicador	Valor	Unidade	Interpretação
Volume total de resíduos rastreados	7.700.000	toneladas	Elevada capacidade de monitoramento em larga escala
Taxa de destinação para reciclagem	79	%	Alto nível de eficiência na recuperação de materiais
Volume total de resíduos reciclados	1.500.000.000	kg	Expressiva capacidade de reinserção de materiais no ciclo produtivo
Unidades operacionais integradas	4.500	unidades	Ampla capilaridade territorial e operacional
Organizações participantes	40.000	empresas	Elevada integração da cadeia logística
Melhoria média nos resultados financeiros	22	%	Ganho econômico associado à eficiência operacional
Redução de perdas produtivas e geração de resíduos	24	%	Otimização dos processos produtivos e logísticos

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

Redução do tempo operacional administrativo	35	%	Aumento de produtividade e eficiência gerencial
Tempo estimado para meta de aterro zero	até 12	meses	Alta capacidade de transição para modelos circulares

Fonte: Elaboração própria com base em dados operacionais sistematizados (2026)

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

Nesse sentido, embora os resultados evidenciem que a integração entre rastreabilidade digital e sistemas ciberfísicos contribui significativamente para a eficiência operacional da logística reversa, sua efetividade está condicionada a fatores estruturais que extrapolam a dimensão tecnológica. Assim, conclui-se que o modelo analisado responde ao problema de pesquisa ao demonstrar que a inteligência digital atua como elemento central na coordenação dos fluxos reversos, mas não elimina as limitações impostas pelo contexto econômico, institucional e territorial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar de que maneira a integração entre sistemas ciberfísicos e mecanismos de rastreabilidade digital contribui para a eficiência operacional na logística reversa de resíduos vítreos. A partir da investigação conduzida, verifica-se que os resultados obtidos permitem responder ao problema de pesquisa, evidenciando que a incorporação de tecnologias digitais não apenas otimiza fluxos logísticos, mas redefine estruturalmente a gestão de resíduos ao promover maior coordenação, transparência e controle informacional ao longo da cadeia.

Os dados analisados demonstram que a eficiência operacional observada não decorre exclusivamente da ampliação da escala de processamento, mas, sobretudo, da capacidade de integração entre fluxos físicos e digitais. A rastreabilidade em tempo real, associada ao uso de algoritmos de roteirização e modelos preditivos, possibilita a redução de perdas, a otimização de recursos logísticos e o aumento da produtividade organizacional. Nesse sentido, a evidência empírica confirma que a digitalização atua como elemento estruturante da logística reversa, contribuindo para a consolidação de modelos mais alinhados aos princípios da economia circular.

Observa-se que os impactos da integração tecnológica extrapolam a etapa pós-consumo, influenciando a organização produtiva e promovendo ganhos econômicos mensuráveis. A redução de custos operacionais, a melhoria dos resultados financeiros e a ampliação da capilaridade logística indicam que a eficiência gerada pela inteligência digital possui caráter sistêmico, afetando diferentes níveis da cadeia de suprimentos.

A análise também evidencia limitações relevantes. A ausência de indicadores ambientais diretos, especialmente relacionados às emissões de gases de efeito estufa, restringe a avaliação integral dos impactos do modelo. Ademais, a dependência de infraestrutura tecnológica e logística robusta, bem como a necessidade de elevada qualidade na segregação dos resíduos na origem, indicam que a replicabilidade do sistema pode ser comprometida em contextos caracterizados por informalidade, assimetrias institucionais e restrições estruturais.

Outro aspecto crítico refere-se à dimensão social da logística reversa. Embora o modelo analisado demonstre elevada eficiência operacional, a integração de atores historicamente marginalizados, como catadores e cooperativas, não se apresenta de forma plenamente estruturada, o que suscita questionamentos acerca da inclusão produtiva e da equidade na distribuição dos benefícios gerados.

Diante desse cenário, conclui-se que a articulação entre rastreabilidade digital, sistemas ciberfísicos e eficiência logística constitui um vetor estratégico para a transição à economia circular, ao permitir a reconfiguração dos fluxos materiais e a ampliação da transparência nos sistemas de gestão de resíduos. Contudo, a efetividade desse modelo depende de condições estruturais que extrapolam a dimensão tecnológica, exigindo políticas públicas, arranjos institucionais e investimentos em infraestrutura que viabilizem sua consolidação em diferentes contextos.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros avancem na mensuração de indicadores ambientais, na análise da inclusão social nos sistemas de logística reversa e na avaliação comparativa entre diferentes modelos operacionais, de modo a aprofundar a compreensão sobre os limites e potencialidades da transformação digital na gestão de resíduos.

6 REFERÊNCIAS

ABRAVIDRO. *Meta de reciclagem de vidro em 2024 é alcançada no Brasil*. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.abravidro.org.br. Acesso em: 13 abr. 2026.

AMBIPAR. *Por dentro da maior planta de mineração urbana da América Latina*. CicloVivo, São José dos Campos, 2024. Disponível em: https://ciclovivo.com.br. Acesso em: 13 abr. 2026.

BABBIE, E. *The practice of social research*. 15. ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2016.

BIAZZI, R. *Mineração urbana: resíduos como ativos econômicos*. São Paulo: Edusp, 2002.

BOLETIM NACIONAL. *Desafios e oportunidades na implementação da economia circular em países em desenvolvimento*. Brasília, 2024.

BRANDÃO, M.; SOBRAL, F. *Logística reversa e responsabilidade compartilhada*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CAETANO, R.; LUNA, J. *Logística reversa de embalagens de vidro*. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

CAMPBELL, D. T.; STANLEY, J. C. *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Boston: Houghton Mifflin, 2015.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. *Metodologia científica*. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CRESWELL, J. W. *Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. 5. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2018.

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E.; SOUZA, M. *Economia circular em países em desenvolvimento*. São Paulo: Atlas, 2016.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F.; SOUZA, M. T. S. Logística reversa de REEE em países em desenvolvimento: desafios e perspectivas para o modelo brasileiro. *Ambiente & Sociedade*, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 119-138, 2016.

DEMO, P. *Metodologia do conhecimento científico*. São Paulo: Atlas, 2018.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Completing the picture: how the circular economy tackles climate change*. Cowes: EMF, 2019. Disponível em: https://ellenmacarthurfoundation.org. Acesso em: 13 abr. 2026.

EXAME. *Maior projeto de logística reversa do país reciclou 200 mil toneladas de embalagens em 2024*. Exame ESG, São Paulo, 2025. Disponível em: https://exame.com. Acesso em: 13 abr. 2026.

FIGUEIRÓ, P. S. et al. Logística reversa de pós-consumo: explorando motivações e superando limitações. *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 375-392, 2014.

FLICK, U. *An introduction to qualitative research*. 6. ed. London: Sage Publications, 2019.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy: a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GONÇALVES, A. A.; DUTRA, J. A. A. Logística reversa e sua aplicabilidade: resíduos de embalagens de vidro. *Brazilian Journal of Business*, Curitiba, v. 5, n. 4, p. 2039-2052, 2023.

GONÇALVES, J.; MARINS, F. *Logística reversa: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Atlas, 2006.

GONÇALVES, M. E.; MARINS, F. A. S. Logística reversa numa empresa de laminação de vidros. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 13, n. 3, p. 397-410, 2006.

HECKLER, V.; BADALOTTI, R. *Barreiras institucionais na economia circular*. Porto Alegre: UFRGS, 2020.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *Procedia CIRP*, v. 52, p. 1-6, 2016.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017.

LACY, P.; RUTQVIST, J. *Waste to wealth: the circular economy advantage*. New York: Palgrave Macmillan, 2015.

LINO, F.; BONETTO, M. *Gestão de resíduos sólidos urbanos*. São Paulo: Annablume, 2013.

LOPES, E. M.; LEI, G. C. M.; RODRIGUES, Ê. F. Logística reversa aplicada a eletrônicos. *InGeTec*, v. 2, n. 5, p. 102-113, 2023.

MACEDO, A. B. dos S. *Logística reversa de embalagens de vidro: estudo de caso*. 2016. Monografia (Especialização) – Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2016.

MACEDO, R. *Infraestrutura logística e sustentabilidade*. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

MANZOLI, M. E. R.; PASQUALETTO, A. Logística reversa de embalagens de pesticidas. In: CONTECC, 2025. Anais [...]. 2025.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

MAPEAMENTO de processos na logística reversa: revisão sistemática. *Revista de Literatura Logística Aplicada*, 2024.

MARTINS, G. A.; THEÓPHILO, C. R. *Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas*. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

MDIC. *Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC)*. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.gov.br. Acesso em: 13 abr. 2026.

MINAYO, M. C. S. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde*. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2016.

MODESTO JUNIOR, A. et al. Integração tecnológica e socioespacial na logística reversa. *Gestão & Produção*, v. 32, n. 1, p. 45-62, 2025.

MODESTO JUNIOR, L. A. et al. Blockchain na logística reversa. *Revista Produção Online*, Florianópolis, v. 25, n. 1, 2025.

MOREIRA, E. C. Logística reversa do lixo tecnológico. In: ENGEMA, 2014. Anais [...]. São Paulo, 2014.

NIEROTKA, L.; MONTEIRO, R.; SILVA, J. Triangulação metodológica em pesquisas sociais. *Revista de Administração Pública*, v. 48, n. 2, p. 321-340, 2014.

PETRONI, G.; MONACO, A.; GONÇALVES, J. Smart contracts e logística reversa. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 120-135, 2018.

RICHARDSON, R. J. *Pesquisa social: métodos e técnicas*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

SEVERINO, A. J. *Metodologia do trabalho científico*. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2017.

SILVA, J. O. D. et al. Blockchain na indústria de logística. Rio de Janeiro: UVA/UFF, 2020.

SILVA, R. et al. Blockchain e confiança em sistemas logísticos. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, n. 2, p. 233-250, 2020.

SOUZA, A. *Responsabilidade compartilhada na logística reversa*. Brasília: UnB, 2023.

SOUZA, A. H. O. et al. Logística reversa e impactos na sociedade. *Revista de Sociedade e Sustentabilidade*, p. 77-102, 2023.

SOUZA, F. R. Blockchain e IoT na cadeia de suprimentos. *Revista Produção Online*, Florianópolis, v. 23, n. 3, 2023.

SOUZA, L. O.; CORBIN, H. P. Logística reversa e resíduos eletroeletrônicos. Belém: UFPA, 2025.

SOUZA, M.; CORBIN, J. Dinâmicas institucionais e catadores. *Revista de Administração Pública*, v. 59, n. 3, p. 411-430, 2025.

STAHEL, W. *The circular economy: a user's guide*. London: Routledge, 2016.

THIOLLENT, M. *Metodologia da pesquisa-ação*. 18. ed. São Paulo: Cortez, 2018.

TRIVIÑOS, A. N. S. *Introdução à pesquisa em ciências sociais*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

VERGARA, S. C. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

YIN, R. K. *Case study research and applications*. 6. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2018.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026

ZAPPELLINI, M. B.; FEUERSCHÜTTE, S. G. Triangulação metodológica em pesquisas de administração. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 17, n. 4, p. 629-648, 2013.

Revista Fatec Zona Sul - Refas - Edição 56 - outubro de 2026