PRODUTO & PRODUÇÃO, vol. 27, n.3, p. 157-173. 2026[*].

Aplicação da internet das coisas na logística reversa: um estudo de caso em inovação e sustentabilidade na economia circular

Fernando Rodrigo Souza
Centro Universitário União das Américas
e-mail: fernandorodrigosouza4@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-2874-5680

[*] RECEBIDO em 13/05/2026. ACEITO em 16/10/2026.

Resumo
A crescente necessidade de aumentar a eficiência dos sistemas de logística reversa e promover práticas alinhadas aos princípios da economia circular tem impulsionado a adoção de tecnologias digitais capazes de ampliar a rastreabilidade, o monitoramento e a otimização operacional dos fluxos de resíduos. Nesse contexto, a Internet das Coisas (*IoT*) destaca-se como uma tecnologia habilitadora da transformação digital aplicada à gestão sustentável de recursos. O presente estudo analisa os efeitos da implementação de dispositivos e sensores *IoT* na logística reversa de cartuchos e *toners* de impressoras pertencentes ao setor eletroeletrônico. Para tanto, foi conduzido um estudo de caso único em uma empresa de gestão ambiental sediada no estado de São Paulo, utilizando abordagem de métodos mistos baseada em quatro entrevistas semiestruturadas com profissionais técnicos e na análise documental de oito relatórios e registros operacionais referentes ao período de janeiro a dezembro de 2024. Os dados foram examinados por meio de triangulação de fontes, codificação temática e verificação documental dos indicadores operacionais. Os resultados demonstram que a utilização dos sensores permitiu reconfigurar as rotas de coleta, reduzindo a frequência semanal de viagens de quatro para duas operações (-50%), sem comprometer o volume médio coletado, mantido em aproximadamente 80 kg por semana. Observou-se ainda uma redução estimada de cerca de 2.600 km percorridos anualmente e uma economia aproximada de 520 litros de diesel por ano, resultando na diminuição das emissões associadas ao transporte. Adicionalmente, a utilização de componentes parcialmente reciclados na prototipagem dos sensores evidencia a convergência entre inovação tecnológica e práticas de economia circular. Conclui-se que a integração da *IoT* à logística reversa contribui para ganhos operacionais e ambientais mensuráveis, oferecendo evidências empíricas sobre o potencial das tecnologias digitais para aprimorar a eficiência de sistemas circulares de gestão de resíduos.

Palavras-chave: Internet das coisas; Logística reversa; Economia circular; Resíduos eletroeletrônicos; Sustentabilidade.

Abstract
The growing need to improve the efficiency of reverse logistics systems and advance practices aligned with circular economy principles has stimulated the adoption of digital technologies capable of enhancing traceability, monitoring, and operational optimization of waste flows. In this context, the Internet of Things (IoT) has emerged as a key enabling technology for digital transformation in sustainable resource management. This study analyzes the effects of implementing IoT-based devices and sensors in the reverse logistics of printer cartridges and toner cartridges within the electrical and electronic equipment sector. A single-case study was conducted in an environmental management company located in the state of São Paulo, Brazil, adopting a mixed-methods approach that combined four semi-structured interviews with technical professionals and documentary analysis of eight operational reports and monitoring records covering the period from January to December 2024. Data were examined through source triangulation, thematic coding, and documentary verification of operational indicators. The findings indicate that the implementation of IoT sensors enabled the reconfiguration of collection routes, reducing the number of weekly trips from four to two (-50%) while maintaining an average collection volume of approximately 80 kg per week. The initiative also resulted in an estimated reduction of nearly 2,600 km traveled annually and savings of approximately 520 liters of diesel fuel per year, contributing to lower transport-related emissions. Furthermore, the incorporation of partially recycled components into sensor prototyping demonstrates the practical convergence between technological innovation and circular economy principles. The study concludes that integrating IoT technologies into reverse logistics operations generates measurable operational and environmental benefits, providing empirical evidence of the potential of digital technologies to enhance the efficiency of circular waste management systems.

Keywords: *Internet of things; Reverse logistics; Circular economy; Electronic waste; Sustainability.*

1. Introdução.

A crescente pressão sobre os recursos naturais, associada ao aumento contínuo da geração de resíduos, tem evidenciado as limitações econômicas e ambientais dos modelos lineares de produção e consumo. Nesse contexto, abordagens fundamentadas nos princípios da economia circular emergem como alternativas capazes de promover a conservação de recursos, a redução de desperdícios e a extensão da vida útil dos produtos. Estudos seminais destacam que estratégias voltadas à manutenção, reutilização, remanufatura e recuperação de materiais constituem mecanismos essenciais para desacelerar os fluxos de descarte e ampliar a circularidade dos sistemas produtivos (Dalé; Roldan; Hansen, 2011). Complementarmente, modelos de negócios orientados ao uso e à servitização demonstram potencial para dissociar a geração de valor econômico do consumo intensivo de matérias-primas, reduzindo a necessidade de substituição prematura de produtos (Bressanelli; Adrodegari; Perona; Saccani, 2018).

O avanço da transformação digital tem ampliado significativamente as possibilidades de operacionalização desses princípios. Revisões recentes indicam que tecnologias associadas à Indústria 4.0 fornecem mecanismos de rastreabilidade, monitoramento e suporte à tomada de decisão que favorecem a implementação de práticas circulares em ambientes produtivos e logísticos (Awan; Sroufe; Shahbaz, 2021; Kirchherr; Yang, 2023). Entre essas tecnologias, a Internet das Coisas (*IoT*) destaca-se por permitir a coleta contínua de dados em tempo real, ampliando a visibilidade dos fluxos materiais e proporcionando maior controle sobre operações de transporte, armazenamento, recuperação e reinserção de recursos nos ciclos produtivos.

A adoção de práticas circulares também é impulsionada por fatores institucionais, regulatórios e mercadológicos. Sehnem, Jabbour, Rossetto, Campos e Sarquis (2015) evidenciam o papel das pressões regulatórias na reconfiguração das cadeias de suprimentos, enquanto Elia, Gnoni e Tornese (2017) ressaltam a necessidade de métricas e indicadores capazes de mensurar o desempenho circular das organizações. De forma complementar, Pagoropoulos, Pigosso e McAloone (2017) demonstram que recursos como rastreabilidade digital, sensoriamento inteligente e monitoramento contínuo constituem instrumentos fundamentais para transformar os princípios da economia circular em práticas operacionais efetivas. Nesse sentido, a literatura converge para a compreensão de que a transição para modelos circulares depende simultaneamente de mecanismos institucionais de indução e de capacidades tecnológicas que permitam medir, controlar e otimizar processos.

Nesse cenário, a Internet das Coisas tem sido amplamente reconhecida como uma tecnologia habilitadora da economia circular. Sua capacidade de conectar dispositivos físicos a plataformas digitais de monitoramento possibilita o acompanhamento em tempo real de processos, produtos e ativos logísticos, favorecendo decisões mais precisas e dinâmicas (Ashton, 2009; Atzori; Iera; Morabito, 2010). Por meio da utilização de sensores inteligentes e sistemas de comunicação integrados, torna-se possível monitorar níveis de ocupação, condições operacionais e padrões de utilização de recursos, ampliando a eficiência dos sistemas produtivos e logísticos (Kortuem; Kawsar; Sundramoorthy; Fitton, 2010; Klein; Pacheco; Righi, 2017; Zeng; Pang; Tang, 2024).

Além dos ganhos operacionais, a literatura aponta que a disponibilidade contínua de dados favorece a implementação de estratégias de manutenção preditiva, otimização de rotas, redução de custos e melhoria da utilização dos recursos disponíveis (Ren et al., 2019; Brous; Janssen; Herder, 2020). Sob a perspectiva da economia circular, tais capacidades contribuem para ampliar a vida útil dos produtos, apoiar processos de recuperação de materiais e fortalecer iniciativas de reutilização e remanufatura (Spring; Araujo, 2017; Bressanelli et al., 2018).

Apesar do crescente interesse acadêmico e empresarial na convergência entre *IoT* e economia circular, permanecem lacunas relevantes relacionadas à avaliação empírica dos resultados obtidos em operações reais de logística reversa, particularmente no setor eletroeletrônico. Embora diversos estudos discutam os potenciais benefícios das tecnologias digitais, ainda são limitadas as evidências empíricas capazes de demonstrar seus impactos concretos sobre indicadores operacionais e ambientais em sistemas de coleta e recuperação de resíduos pós-consumo.

Essa lacuna torna-se especialmente relevante no contexto da logística reversa de cartuchos e *toners* de impressoras, segmento inserido na cadeia de resíduos eletroeletrônicos e caracterizado por desafios relacionados à eficiência das coletas, ao controle dos fluxos de materiais e à minimização dos custos operacionais e impactos ambientais associados ao transporte.

Diante desse contexto, o presente estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: como a Internet das Coisas pode contribuir para a melhoria do desempenho operacional e ambiental da logística reversa de cartuchos e *toners* de impressoras no contexto da economia circular?

Para responder a essa questão, realizou-se um estudo de caso em uma empresa de gestão ambiental localizada no estado de São Paulo e especializada na logística reversa de cartuchos e *toners* do setor eletroeletrônico. O objetivo da pesquisa consiste em analisar os efeitos da implementação de uma solução baseada em Internet das Coisas sobre a eficiência operacional da logística reversa, considerando indicadores relacionados à frequência de coletas, quilometragem percorrida, consumo de combustível e redução estimada de emissões associadas ao transporte. Ao fornecer evidências empíricas sobre a aplicação da *IoT* em operações de logística reversa, o estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a integração entre tecnologias digitais e economia circular, além de oferecer subsídios para a adoção de soluções tecnológicas em iniciativas voltadas à gestão sustentável de resíduos.

O artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta o referencial teórico sobre Internet das Coisas, economia circular e a convergência entre essas abordagens. A terceira seção descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. A quarta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir do estudo de caso. Por fim, a quinta seção reúne as considerações finais, as limitações da investigação e as recomendações para pesquisas futuras.

2. Referencial teórico.

2.1. A Internet das Coisas (*IoT*) como Arquitetura de Conectividade Digital.

Entende-se por Internet das Coisas (*IoT*) um arcabouço tecnológico que conecta objetos físicos a redes digitais, viabilizando a captura contínua de sinais operacionais e sua transformação em insumos para decisão. Ashton (2009) cunhou o conceito num contexto de aplicações de identificação automática; aqui, salientamos a dimensão instrumental da *IoT* para rastreabilidade e controle em cadeias reversas, em pesquisas que abordavam tecnologias de identificação por radiofrequência (*RFID*). Desde então, o conceito evoluiu para além da comunicação máquina a máquina (*M2M*), abrangendo dispositivos, sensores, *software* e serviços conectados, compondo um ecossistema capaz de operar com protocolos e domínios variados (Lahrouni; Semlali; Andrieux; Diouris; Ghammaz, 2025; Mendoza; Chávez; Mendoza, 2025). Nesse contexto, Waldner (2008) destaca que cada ser humano encontra-se potencialmente cercado por 1.000 a 5.000 objetos físicos, os quais podem ser integrados a esse ecossistema digital, evidenciando a ubiquidade e a escala da *IoT* no cotidiano contemporâneo.

A perspectiva atual sobre a Internet das Coisas (*IoT*) aponta para um crescimento contínuo e expressivo do número de dispositivos conectados. Enquanto as projeções anteriores da Gartner previam que, até 2020, aproximadamente 26 bilhões de dispositivos estariam conectados à *IoT*, os dados mais recentes indicam números significativamente mais altos (Wang; Liu; Yang; Li; Lyu, 2025; Chai; Wang; Guo; Li; Yin; Fang, 2025).

De acordo com a TechInsights (2023), até o final de 2023, havia cerca de 32 bilhões de dispositivos conectados à *IoT* globalmente, e essa base está projetada para crescer a uma taxa anual de 8%. Estima-se que, até 2028, o número de dispositivos conectados deverá atingir cerca de 46 bilhões. Essa evolução reflete a rápida expansão da *IoT* em diversas indústrias, como automotiva, saúde, manufatura e cidades inteligentes, com uma integração crescente em operações diárias e modelos de negócios.

Além disso, a Gartner (2023) projeta que o mercado global de *IoT* atingirá US$ 991 bilhões até 2028, com destaque para segmentos como automotivo, manufatura e automação predial. Esse crescimento será impulsionado pela adoção crescente de tecnologias de *IoT*, que não apenas ampliam a conectividade, mas também potencializam a eficiência operacional e inovam processos em uma variedade de setores. Esses números ilustram a tendência de adoção cada vez maior das tecnologias *IoT*, sugerindo que a conectividade e a digitalização de processos continuarão a se expandir nos próximos anos (Duguma; Bai, 2024; Yalli; Hasan; Badawi, 2024; Al Tareq; Rana; Mostofa; Rahman, 2024; Chai; Wang; Guo; Li; Yin; Fang, 2025).

A *IoT* constitui, portanto, uma infraestrutura composta por sensores, atuadores e tecnologias de conectividade capazes de integrar dispositivos físicos à análise digital (Atzori; Iera; Morabito, 2010; Duguma; Bai, 2024). Essa integração favorece a coleta e o processamento de dados antes inacessíveis, possibilitando decisões estratégicas baseadas em informações precisas. Zhang, Huang, Chiavetta e Porter (2022) destacam que sistemas de *big data*, quando alimentados por dados oriundos de sensores *IoT*, promovem melhorias significativas em processos como a análise da cadeia de suprimentos e a gestão de ativos.

Klein, Pacheco e Righi (2017) argumentam que a *IoT* transforma objetos isolados em produtos inteligentes, com capacidade computacional e conectividade, ampliando o uso de dados para fins estratégicos. Para Dalenogare, Benitez, Ayala e Frank (2018), essa inteligência incorporada permite que dados do cliente sejam integrados aos sistemas de gestão empresarial, otimizando o planejamento e a tomada de decisões (Choudhary; Guha; Pau; Mishra, 2025).

2.2. Economia Circular: Paradigma Sustentável para a Redefinição do Valor.

A economia circular propõe deslocar o foco da simples extração e descarte para regimes de uso e reuso que revalorizem produtos e materiais. Na prática, isso envolve políticas e procedimentos que favorecem remanufatura, reparo e reciclagem, ao mesmo tempo em que redesenham a métrica do valor econômico para incorporar retornos materiais ao ciclo produtivo, que prolongam o ciclo de vida dos bens, desacoplando o crescimento econômico do consumo intensivo de recursos naturais (Stahel, 2016; Geissdoerfer; Pieroni; Pigosso; Soufani, 2020; Otterbach; Fröhling, 2025).

Nesse sentido, o modelo circular reorganiza os processos produtivos com foco na suficiência, substituindo a lógica de descarte por estratégias de reaproveitamento e valorização dos resíduos. Kalmykova, Sadagopan e Rosado (2018) ressaltam que a economia circular vem ganhando destaque, especialmente na Europa, por seu potencial em gerar empregos, reduzir custos com matérias-primas, estabilizar preços e mitigar os impactos ambientais. Além disso, promove maior segurança no fornecimento e fomenta a inovação empresarial em direção à sustentabilidade (Kirchherr; Yang, 2023; Khajuria; Verma; Vella; Zanini-Freitag; Xin; Murthy; Arora; Sylva; Menon; Pardeshi; Kral; Liu, 2025).

A adoção da EC requer reestruturação nos modelos de negócio, incluindo o redesenho da rede de valor e das propostas direcionadas aos consumidores (Centobelli; Cerchione; Chiaroni; Del Vecchio; Urbinati, 2020). Tal mudança implica compromissos estratégicos com a redução do uso de recursos e preservação ambiental. Mhatre, Panchal, Singh e Bibyan (2021) apontam que o paradigma circular está sendo incorporado a diversos setores produtivos, promovendo transformações significativas no modo como se concebem e descartam produtos e serviços.

Ainda assim, Elia, Gnoni e Tornese (2017) indicam a existência de lacunas significativas no desenvolvimento de métricas e indicadores específicos para mensuração da circularidade, especialmente em níveis microeconômicos (Shevchenko; Shams Esfandabadi; Ranjbari; Saidani; Mesa; Shevchenko; Yannou; Cluzel, 2024; De Koning; Kassahun; Tekinerdogan, 2024; Kahandawa; Jayasinghe; Gomis, 2025). Portanto, embora a EC seja promissora, sua efetiva implementação depende de avanços metodológicos que permitam avaliar seu desempenho de maneira padronizada (Kirchherr; Yang, 2023; Zhou, 2025).

2.3. Convergência entre *IoT* e Economia Circular: Sinergias Tecnológicas para Sustentabilidade.

A integração da *IoT* aos modelos de economia circular permite avanços na gestão inteligente de recursos e na rastreabilidade de produtos ao longo do ciclo de vida. Conforme Pagoropoulos, Pigosso e McAloone (2017), sensores inteligentes conectados possibilitam a coleta sistemática de dados, promovendo maior visibilidade e controle sobre processos produtivos, logísticos e de descarte. Alcayaga, Wiener e Hansen (2019) reforçam que, a partir desses dados, é possível monitorar o desempenho de produtos como eletrônicos, promovendo avaliações contínuas e estratégicas de circularidade (Sassanelli; Arriga; Zanin; D'Adamo; Terzi, 2022).

O modelo de negócios baseado em *IoT* evolui para permitir interações autônomas entre objetos e usuários, viabilizando a coleta de dados contextuais (Kortuem; Kawsar; Sundramoorthy; Fitton, 2010). Han, Heshmati e Rashidghalam (2020) argumentam que, com sensores embarcados, é possível acompanhar as condições de uso dos produtos, identificar falhas e promover ações corretivas que

estendam sua vida útil. Assim, a *IoT* fornece subsídios fundamentais para estratégias de reparo, reutilização e remanufatura, pilares centrais da EC (Yasmeen; Longsheng, 2025).

Bressanelli, Adrodegari, Perona e Saccani (2018) apontam que a coleta contínua de dados permite ajustes no *design* dos produtos para aumentar sua durabilidade e eficiência. Os mesmos autores destacam o potencial da *IoT* para viabilizar atualizações funcionais de componentes digitais, reduzindo a necessidade de substituição completa. Alcayaga, Wiener e Hansen (2019) complementam que os dados de uso também contribuem para decisões mais precisas na recuperação de produtos em fim de vida.

Além disso, Kristoffersen, Blomsma, Mikalef e Li (2020) propõem estratégias circulares baseadas em *IoT* para empresas de manufatura, incluindo a utilização compartilhada de produtos monitorados em tempo real. Lin, Yu e Chen (2019) destacam que a arquitetura digital da *IoT* proporciona um suporte robusto para o desenvolvimento de sistemas circulares, alinhando atividades operacionais aos princípios da sustentabilidade.

A literatura que conecta digitalização e circularidade opera em dois eixos: definição conceitual e instrumentos operacionais. Kirchherr, Yang, Schulze-Spüntrup, Heerink e Hartley (2023) revisitam a definição de economia circular e destacam sua heterogeneidade conceitual; em complemento, Pagoropoulos, Pigosso e McAloone (2017) mapeiam como ferramentas digitais (rastreabilidade, sensores e *analytics*) operacionalizam a transição. Estudos empíricos, por sua vez, demonstram canais concretos: Klein, Pacheco e Righi (2017) discutem a transformação dos produtos em 'objetos inteligentes' e as implicações para modelos de negócio; Dalenogare, Benitez, Ayala e Frank (2018) quantificam ganhos de desempenho industrial associados à adoção de tecnologias 4.0; e Alcayaga, Wiener e Hansen (2019) apresentam a arquitetura conceitual de sistemas "*smart-circular"*. Juntos, esses trabalhos sugerem que a convergência tecnológica atua sobretudo como capacidade de mensuração (dados que permitem decisões), capacidade de controle (atuadores e automação) e capacidade de *redesign* (*insights* para *ecodesign*).

Por fim, Awan, Sroufe e Shahbaz (2021) enfatizam que o uso conjunto de *IoT* e *big data* pode transformar o setor manufatureiro, ao integrar informações sobre consumo, logística reversa e disponibilidade de materiais. Essa integração possibilita o planejamento de ações mais eficazes de reaproveitamento, redução de resíduos e reestruturação das cadeias produtivas, contribuindo para a consolidação de um modelo econômico regenerativo e resiliente.

3. Metodologia.

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso único, de natureza aplicada, abordagem qualitativa e finalidade exploratório-descritiva, desenvolvido com o propósito de analisar os efeitos da implementação de uma solução baseada em Internet das Coisas (*IoT*) na logística reversa de cartuchos e *toners* de impressoras pertencentes ao setor eletroeletrônico. A estratégia metodológica adotada é compatível com investigações que buscam compreender fenômenos contemporâneos inseridos em contextos organizacionais reais, nos quais as fronteiras entre o fenômeno estudado e o ambiente em que ocorre não são claramente definidas (Yin, 2014).

A unidade de análise corresponde a uma empresa especializada em gestão ambiental e logística reversa, localizada no estado de São Paulo, cuja atuação contempla a coleta, o transporte, a triagem e a destinação ambientalmente adequada de cartuchos e *toners* pós-consumo. A organização atende predominantemente clientes corporativos e implementou uma solução baseada em sensores *IoT* para monitoramento remoto dos níveis de preenchimento dos recipientes utilizados na armazenagem temporária dos resíduos coletados.

A coleta de dados foi realizada entre janeiro e dezembro de 2024 e combinou evidências qualitativas e quantitativas provenientes de múltiplas fontes, buscando ampliar a robustez analítica do estudo por meio da triangulação metodológica (Denzin, 2017). Foram conduzidas quatro entrevistas semiestruturadas com profissionais diretamente envolvidos na implantação, manutenção e operação da solução tecnológica, selecionados por critério de relevância e conhecimento do processo investigado.

O roteiro das entrevistas contemplou questões relacionadas: (i) ao funcionamento da solução *IoT* implementada; (ii) às alterações promovidas nos processos de coleta e transporte após a adoção dos sensores; (iii) aos impactos observados sobre a eficiência operacional; (iv) às contribuições percebidas para a gestão dos resíduos; e (v) às oportunidades de aprimoramento do sistema. As entrevistas foram

registradas, transcritas e posteriormente submetidas à análise de conteúdo temática, conforme os procedimentos descritos por Kvale e Brinkmann (2014).

Complementarmente, realizou-se análise documental de oito relatórios operacionais internos e registros gerados pelos sensores instalados nos pontos de coleta monitorados. Os documentos continham informações relativas à frequência das coletas, quilometragem percorrida, volume de resíduos recolhidos, consumo estimado de combustível e indicadores operacionais associados ao funcionamento do sistema. A utilização dessas evidências permitiu confrontar e validar as informações obtidas durante as entrevistas.

Os sensores empregados no projeto foram instalados em recipientes destinados ao armazenamento temporário de cartuchos e *toners* descartados pelos clientes. O sistema realizava o monitoramento remoto dos níveis de preenchimento e transmitia alertas quando a capacidade atingia aproximadamente 70% de ocupação, permitindo o planejamento das rotas de coleta com base na demanda efetiva e não em cronogramas fixos previamente estabelecidos.

A análise dos dados qualitativos foi realizada mediante codificação temática, buscando identificar padrões recorrentes relacionados aos efeitos da tecnologia sobre a operação logística. Os dados quantitativos foram submetidos à verificação documental e à análise comparativa entre o período anterior e posterior à implementação da solução *IoT*, considerando indicadores como frequência de coletas, distância percorrida e consumo estimado de combustível.

Para estimar a redução das emissões associadas ao transporte, utilizou-se o volume anual de diesel economizado em decorrência da otimização das rotas. O cálculo foi realizado com base em um fator médio de emissão de 2,68 kg CO_2e por litro de diesel consumido, amplamente utilizado em inventários corporativos e estudos de emissões veiculares, permitindo estimar os benefícios ambientais decorrentes da redução do consumo de combustível.

Com o objetivo de fortalecer a confiabilidade dos resultados, empregou-se a triangulação entre entrevistas, documentos operacionais e registros gerados pelos sensores. Adicionalmente, foram adotados procedimentos de validação cruzada das informações e de rastreabilidade dos dados analisados, contribuindo para a consistência das interpretações e para a transparência do processo investigativo.

A Figura 1 apresenta, de forma sintética, o fluxo metodológico adotado na pesquisa, contemplando as etapas de coleta, tratamento, triangulação e análise dos dados.

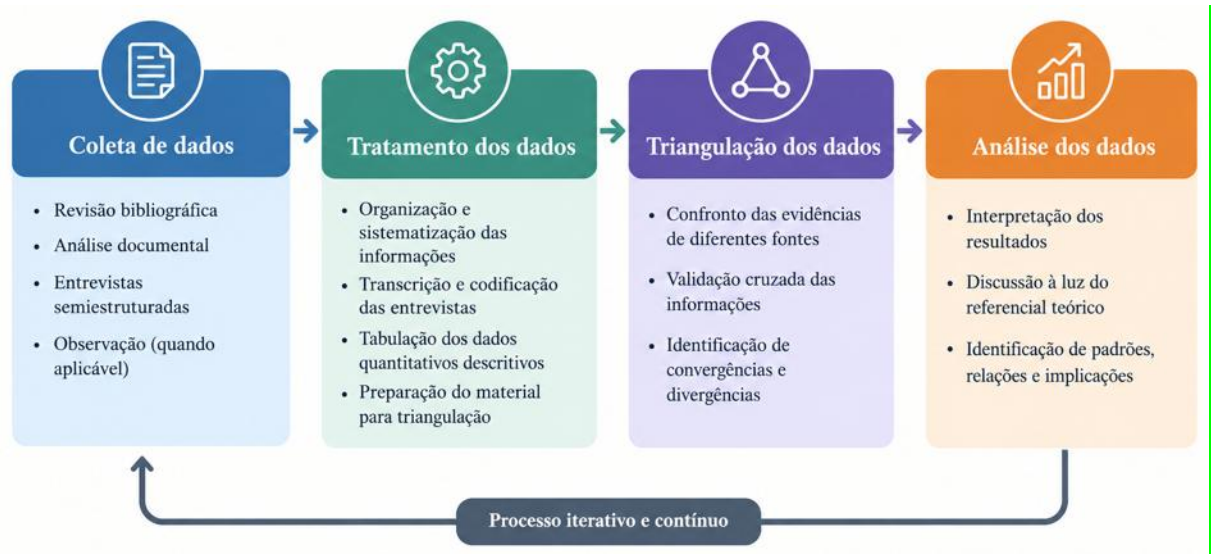


Figura 1 - Fluxo metodológico da pesquisa. Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com auxílio de IA (*ChatGPT*).

A Figura 1 sintetiza, portanto, o percurso metodológico da pesquisa, evidenciando a articulação sequencial e integrada entre coleta, tratamento, triangulação e análise dos dados, de modo a assegurar maior consistência, coerência e rigor na interpretação das evidências obtidas.

4. Resultados e discussões.

A análise dos dados empíricos evidenciou que a implementação de uma solução baseada na Internet das Coisas (*IoT*) esteve associada à melhoria de indicadores operacionais da logística reversa de cartuchos e *toners* de impressoras, especialmente no que se refere à frequência das coletas e à utilização dos recursos logísticos. A instalação de sensores inteligentes em seis pontos estratégicos permitiu o monitoramento contínuo do nível de preenchimento dos compartimentos de armazenamento, com emissão de alertas quando o volume alcançava 70% da capacidade máxima. Esse mecanismo alterou o critério de acionamento das coletas, anteriormente orientado por uma lógica predominantemente temporal, para uma lógica baseada nas condições efetivamente observadas nos pontos de coleta. Como consequência, tornou-se possível reorganizar a sequência das visitas e priorizar os pontos com maior nível de preenchimento, reduzindo deslocamentos que poderiam ocorrer sem carga suficiente para justificar a viagem.

A principal alteração observada após a implementação da solução foi a redução de quatro para duas viagens semanais, correspondente a 50%, sem alteração do volume médio coletado, mantido em aproximadamente 80 kg por semana. Mais do que indicar uma redução quantitativa da frequência das viagens, esse resultado permite identificar dois mecanismos operacionais associados à mudança observada. O primeiro corresponde à substituição de um critério fixo de acionamento por um critério baseado em limiar (*threshold*), mediante o monitoramento do nível de preenchimento dos recipientes. O segundo refere-se à priorização dinâmica dos pontos de coleta, considerando simultaneamente o nível de ocupação e a localização dos recipientes, favorecendo uma utilização mais eficiente da capacidade de transporte disponível.

A redução de 50% nas viagens semanais deve, portanto, ser interpretada como resultado observado no contexto específico analisado e associado à alteração do processo de planejamento das coletas, e não como efeito automaticamente generalizável da adoção da *IoT*. A disponibilidade de informações em tempo real ampliou a visibilidade sobre as condições dos pontos de coleta e criou condições informacionais para o ajuste das rotas, enquanto a manutenção do volume médio coletado sugere que a redução da frequência das viagens não comprometeu o volume semanal recolhido no período analisado.

A relação entre a solução tecnológica e os ganhos observados, entretanto, deve ser compreendida de maneira contextualizada. A eficiência decorrente do acionamento por limiar e da priorização dos pontos depende de fatores como densidade da rede de coleta, distribuição espacial dos clientes, frequência de geração dos resíduos, capacidade dos recipientes e condições de tráfego. Em redes com baixa densidade de pontos ou em situações nas quais os deslocamentos apresentem elevada distância média, a redução das viagens poderá não produzir ganhos proporcionais, uma vez que o custo marginal de deslocamento pode limitar os benefícios obtidos pela racionalização das rotas. Dessa forma, o estudo não permite afirmar que a mesma magnitude de redução seria reproduzida em outros contextos, mas evidencia um mecanismo operacional passível de investigação e adaptação em redes com características semelhantes.

Conforme apresentado na Tabela 1, a implementação da solução baseada em *IoT* esteve associada à redução de 50% no número de viagens semanais, à manutenção do volume médio coletado e à estimativa de redução proporcional do consumo de diesel e das emissões de CO_2. A distinção entre esses indicadores é relevante: enquanto a quantidade de viagens e o volume coletado constituem indicadores diretamente apresentados nos registros analisados, os valores relativos ao consumo anual de diesel e às emissões correspondem a estimativas calculadas a partir da frequência das viagens, da média de consumo e de um fator de emissão adotado. Assim, tais resultados devem ser interpretados como estimativas de impacto potencial associadas à alteração do padrão operacional, e não como medições diretas de consumo ou de emissões.

Tabela 1 - Indicadores de desempenho após implementação da solução *IoT* na logística reversa.

Indicador	Situação anterior	Situação após *IoT*	Variação	Observações
Número de viagens semanais	4	2	-50%	Roteirização otimizada por sensores
Volume médio coletado (kg/semana)	80	80	0%	Mantido com menor deslocamento
Consumo anual de diesel (L)	1.040*	520	-50%	Estimativa baseada na frequência das viagens e na média de consumo
Emissão anual de CO_2 (kg)**	2.787	1.394	-50%	Estimativa calculada mediante fator de 2,68 kg CO_2/L de diesel
Custo logístico total	-	-	Redução qualitativa	Dados internos não divulgados

*Estimativa baseada na frequência das viagens e na média de consumo.
**Estimativa calculada mediante fator médio de emissão de 2,68 kg CO_2/L de diesel.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Tabela 1 deve ser lida, portanto, como uma síntese dos indicadores operacionais e das estimativas derivadas dos registros internos, evitando-se interpretar os valores estimados como medições diretas de combustível consumido ou de emissões efetivamente quantificadas. A manutenção de aproximadamente 80 kg coletados por semana, simultaneamente à redução da frequência das viagens, constitui a principal evidência de racionalização operacional identificada no estudo. Os valores estimados de aproximadamente 520 L de diesel e 2.600 km anuais representam, por sua vez, uma projeção baseada no novo padrão de deslocamento, cuja confirmação em outros períodos exigiria acompanhamento longitudinal e registros sistemáticos de consumo.

Além dos efeitos relacionados à operação logística, foram identificadas evidências de incorporação de princípios da economia circular na própria concepção dos dispositivos desenvolvidos. Cada sensor utilizou aproximadamente 66 gramas de plástico ABS reciclado e 12 gramas de cobre provenientes de resíduos eletrônicos descartados. Considerando as seis unidades instaladas, o material reutilizado corresponde a aproximadamente 396 gramas de plástico e 72 gramas de metais não ferrosos. Esse resultado evidencia que a circularidade não foi considerada apenas no gerenciamento dos resíduos coletados, mas também na composição material da própria solução tecnológica, ainda que em escala experimental.

A fase de prototipagem foi conduzida durante três meses, em ambiente controlado, contemplando testes sob diferentes condições de temperatura, umidade e conectividade. Os ajustes realizados nesse período contribuíram para a estabilização do sistema, que apresentou disponibilidade de 97,5% e um registro de falha pontual, posteriormente solucionada por atualização de *firmware*. Esses dados constituem evidências do comportamento técnico do protótipo no contexto estudado, mas não são suficientes para estabelecer uma medida universal de confiabilidade da solução, especialmente porque o período de observação, o número de dispositivos e as condições operacionais analisadas são delimitados pelo estudo de caso.

No âmbito econômico, os registros analisados indicaram uma economia estimada de aproximadamente R$ 8.400,00 em combustível e manutenção ao longo de um ano. O valor, contudo, deve ser interpretado com cautela, pois os dados internos relativos ao custo logístico total não foram disponibilizados de forma integral. Dessa maneira, a informação representa uma estimativa apresentada no contexto do caso estudado, e não uma mensuração independente e auditável do retorno econômico da tecnologia. Segundo os registros analisados, parte desse valor foi direcionada à atualização do *software* de monitoramento e à manutenção preventiva dos sensores.

A racionalização das rotas constitui, nesse sentido, o principal mecanismo empírico identificado. A redução das viagens semanais de quatro para duas, mantendo-se aproximadamente 80

kg de materiais coletados por semana, indica que a reorganização do processo permitiu preservar o volume médio recolhido com menor frequência de deslocamento. A estimativa de aproximadamente 520 L de diesel economizados por ano e de cerca de 2.600 km não percorridos decorre dessa alteração do padrão operacional e deve ser compreendida como projeção calculada a partir dos registros disponíveis, não como medição direta do combustível efetivamente economizado.

As entrevistas com os profissionais envolvidos no desenvolvimento e na operação da solução também permitiram identificar desafios relacionados à integração entre *hardware* e conectividade. Segundo os relatos, essas dificuldades foram enfrentadas inicialmente com apoio técnico externo. Posteriormente, a empresa promoveu capacitação da equipe interna por meio de um programa técnico de 10 horas, possibilitando a realização de atividades básicas de manutenção dos dispositivos e de análise das informações produzidas pelos sensores. Esse aspecto evidencia que os resultados tecnológicos observados não decorreram exclusivamente da instalação dos dispositivos, mas envolveram também processos de aprendizagem e desenvolvimento de capacidades internas para utilização da solução.

Em conjunto, os resultados indicam que a aplicação da *IoT* no contexto investigado contribuiu para a reorganização do processo de coleta e para a melhoria de determinados indicadores operacionais, especialmente pela combinação entre monitoramento em tempo real, acionamento baseado em limiar e priorização dos pontos de coleta. A manutenção do volume médio coletado, associada à redução da frequência das viagens, constitui a principal evidência de eficiência operacional identificada. Os efeitos ambientais e econômicos, por sua vez, são apresentados como estimativas derivadas dos registros disponíveis e devem ser validados por séries históricas mais extensas e por medições diretas de consumo, distância percorrida e emissões.

Desse modo, a experiência analisada não permite sustentar uma generalização estatística dos resultados, mas oferece evidências contextualmente delimitadas sobre mecanismos pelos quais a *IoT* pode apoiar a racionalização da logística reversa. A possibilidade de aplicação em outras organizações dependerá de condições como densidade da rede de coleta, distribuição espacial dos pontos, volume e regularidade da geração de resíduos, infraestrutura de conectividade e capacidade organizacional para interpretar e utilizar os dados produzidos. A principal contribuição do caso reside, portanto, menos na magnitude específica dos ganhos registrados e mais na explicitação da relação entre sensoriamento, disponibilidade de informação, tomada de decisão logística e racionalização dos deslocamentos, fornecendo uma base analítica para investigações posteriores em diferentes configurações de logística reversa.

5. Considerações finais.

O presente estudo teve como objetivo investigar os impactos da adoção da Internet das Coisas (*IoT*) na logística reversa de resíduos eletrônicos, enfatizando sua contribuição para a transição de modelos lineares para circulares, em consonância com os princípios da economia circular. A análise empírica foi realizada por meio de um estudo de caso em uma empresa situada na cidade de São Paulo, especializada na coleta e gestão de cartuchos e *toners* de impressoras, permitindo analisar, em contexto organizacional específico, de que maneira a incorporação de tecnologias digitais pode apoiar a racionalização de processos associados à logística reversa e à economia circular.

A implementação de sensores inteligentes em pontos estratégicos de coleta esteve associada a melhorias observadas na eficiência operacional, especialmente pela redução da frequência das viagens logísticas e pela manutenção do volume médio coletado. As reduções estimadas no consumo de combustível e nas emissões de gases de efeito estufa decorrem dos cálculos realizados a partir da alteração do padrão de deslocamentos e, portanto, não correspondem a medições diretas de consumo ou de emissões. O monitoramento sistemático dos níveis de preenchimento, realizado a partir de dados disponibilizados pelos sensores, possibilitou o acionamento das coletas segundo um critério baseado em limiar e favoreceu a reorganização das rotas, contribuindo para a redução dos deslocamentos semanais de quatro para duas viagens. Não obstante, os dados analisados não permitem atribuir diretamente à *IoT*, de forma isolada, todos os ganhos identificados, nem sustentar que a mesma magnitude de resultado seria obtida em diferentes contextos operacionais.

No âmbito ambiental, destaca-se o reaproveitamento de resíduos eletrônicos na fabricação dos próprios sensores, com a utilização de aproximadamente 396 gramas de plástico ABS reciclado e 72

gramas de metais não ferrosos nas seis unidades instaladas. Essa prática evidencia a incorporação de princípios de circularidade também na concepção material da solução tecnológica, ampliando a análise para além da função operacional dos sensores e demonstrando uma aplicação concreta, embora localizada e de pequena escala, do reaproveitamento de materiais provenientes de resíduos eletrônicos. Dessa forma, o caso analisado apresenta evidência empírica de uma prática de circularidade associada ao desenvolvimento da solução, sem permitir, contudo, mensurar seu impacto ambiental global ou compará-lo quantitativamente com alternativas convencionais de fabricação.

A análise crítica dos dados também revelou que a implementação da solução esteve condicionada a aspectos organizacionais e técnicos relacionados à capacidade de incorporação da tecnologia. Nesse contexto, a capacitação técnica dos colaboradores e o suporte técnico externo durante a etapa inicial de integração entre *hardware* e conectividade foram elementos identificados no processo de implantação. A capacitação posterior da equipe interna, realizada por meio de programa técnico de 10 horas, favoreceu a realização de atividades básicas de manutenção e análise dos dados gerados. Esses elementos sugerem que a adoção de soluções *IoT* em operações de menor escala requer não apenas infraestrutura tecnológica, mas também desenvolvimento de competências para sua utilização e manutenção. Entretanto, a evidência disponível não permite classificar esses fatores como determinantes em termos causais, devendo eles ser compreendidos como condições organizacionais identificadas no contexto estudado.

Do ponto de vista acadêmico, a presente investigação contribui para a discussão interdisciplinar que articula tecnologias digitais, logística reversa e economia circular ao apresentar evidências empíricas de um caso específico de aplicação da *IoT* na gestão de resíduos eletrônicos. Os resultados permitem compreender como o sensoriamento do nível de preenchimento, o acionamento baseado em limiar e a reorganização das rotas podem se articular para racionalizar deslocamentos em uma operação de logística reversa. A contribuição do estudo reside, portanto, na explicitação desses mecanismos operacionais e das condições contextuais em que foram observados, e não na demonstração de uma relação universal entre adoção de *IoT* e desempenho sustentável. Nesse sentido, os achados podem subsidiar futuras investigações destinadas à construção e à validação de modelos comparativos ou replicados em diferentes configurações organizacionais e setoriais.

No âmbito prático, o estudo evidencia que a adoção de tecnologias digitais pode apoiar melhorias operacionais em cadeias de logística reversa de menor escala, desde que exista compatibilidade entre a solução tecnológica, as características da operação e a capacidade organizacional de utilizar os dados produzidos. A arquitetura tecnológica analisada apresenta potencial de adaptação para outros contextos que enfrentem desafios relacionados ao monitoramento dos pontos de coleta, à organização das rotas e à utilização eficiente dos recursos logísticos. Essa possibilidade, contudo, deve ser compreendida como potencial de aplicação, e não como resultado empiricamente comprovado em outros segmentos, uma vez que a pesquisa foi delimitada a uma única organização e a uma configuração específica de logística reversa.

Embora tenham sido identificadas melhorias relevantes nos indicadores operacionais analisados, as limitações associadas ao estudo de caso e à natureza de parte dos indicadores utilizados restringem a generalização dos resultados. Recomenda-se, portanto, a realização de estudos longitudinais que combinem registros contínuos dos sensores com dados administrativos de viagens, quilometragem, consumo de combustível, volume coletado, custos operacionais e ocorrências de manutenção, permitindo avaliar a estabilidade dos efeitos ao longo do tempo e identificar possíveis variações sazonais. A utilização de estratégias de *event sampling* (ESM), quando tecnicamente adequada à arquitetura dos sensores, também poderá ampliar a resolução temporal das observações e permitir análises mais precisas dos eventos de coleta e dos padrões de geração dos resíduos. Estudos comparativos entre organizações ou redes de diferentes densidades também poderão contribuir para verificar em que condições os mecanismos identificados neste caso produzem resultados semelhantes ou distintos.

Conclui-se que a convergência entre *IoT* e economia circular apresenta potencial para apoiar a reconfiguração de processos de logística reversa, particularmente por meio da ampliação da visibilidade sobre os fluxos de materiais e da utilização dessas informações no planejamento dos deslocamentos. No caso analisado, a principal evidência empírica corresponde à redução de 50% das viagens semanais, com manutenção do volume médio coletado, enquanto as reduções de consumo de diesel e de emissões de CO_2 constituem estimativas derivadas desse novo padrão operacional. A experiência também

evidenciou a utilização de materiais provenientes de resíduos eletrônicos na fabricação dos sensores e a necessidade de capacitação para a apropriação organizacional da tecnologia. Assim, em lugar de sustentar uma generalização dos resultados, o estudo oferece um conjunto de evidências contextualmente delimitadas e um percurso analítico que pode orientar investigações futuras, especialmente quanto à adoção de sensores concebidos segundo critérios de circularidade, ao estabelecimento de rotinas de validação e qualidade dos dados e ao acompanhamento longitudinal dos impactos operacionais, econômicos e ambientais. Essas três frentes constituem, simultaneamente, possibilidades de aprofundamento da pesquisa e referências práticas para organizações interessadas em avaliar soluções digitais aplicadas à logística reversa.

Referências.

ADEYINKA, O.; TAIWO, A. ***Enhancing waste management efficiency through strategic logistics optimization***. 2024. DOI: https://doi.org/10.5281/ZENODO.14535876. Disponível em: https://doi.org/10.5281/ZENODO.14535876. Acesso em: 26 set. 2026.

ALCAYAGA, A.; WIENER, M.; HANSEN, E. G. *Towards a framework of smart-circular systems: an integrative literature review*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 221, p. 622-634, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.085. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619304743. Acesso em: 26 set. 2026.

AL TAREQ, A.; RANA, M. J.; MOSTOFA, M. R.; RAHMAN, M. S. *Impact of IoT and embedded system on semiconductor industry: a case study*. ***Control Systems and Optimization Letters***, v. 2, n. 2, p. 211-216, 2024. DOI: https://doi.org/10.59247/csol.v2i2.111. Disponível em: https://ejournal.csol.or.id/index.php/csol/article/view/111. Acesso em: 26 set. 2026.

ANDRONIE, M. et al. *Remote big data management tools, sensing and computing technologies, and visual perception and environment mapping algorithms in the Internet of Robotic Things*. ***Electronics***, v. 12, n. 1, 22, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics12010022. Disponível em: https://www.mdpi.com/2079-9292/12/1/22. Acesso em: 26 set. 2026.

ASHTON, K. *That "Internet of Things" thing*. ***RFID Journal***, 2009. Disponível em: https://www.rfidjournal.com/that-internet-of-things-thing. Acesso em: 26 set. 2026.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. *The Internet of Things: a survey*. ***Computer Networks***, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128610001568. Acesso em: 26 set. 2026.

AWAN, U.; SROUFE, R.; SHAHBAZ, M. *Industry 4.0 and the circular economy: a literature review and recommendations for future research*. ***Business Strategy and the Environment***, v. 30, n. 4, p. 2038-2060, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/bse.2731. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bse.2731. Acesso em: 26 set. 2026.

BOWEN, G. A. *Document analysis as a qualitative research method*. ***Qualitative Research Journal***, v. 9, n. 2, p. 27-40, 2009. DOI: https://doi.org/10.3316/QRJ0902027. Disponível em: https://www.emerald.com/qrj/article-abstract/9/2/27/360733/Document-Analysis-as-a-Qualitative-Research-Method?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 26 set. 2026.

BRESSANELLI, G.; ADRODEGARI, F.; PERONA, M.; SACCANI, N. *Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies*. ***Sustainability***, v. 10, n. 3, 639, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/su10030639. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/639. Acesso em: 26 set. 2026.

BROUS, P.; JANSSEN, M.; HERDER, P. *The dual effects of the Internet of Things (IoT): a systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations*. ***International Journal of Information***

Management, v. 51, 101952, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.05.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401218309022. Acesso em: 26 set. 2026.

CENTOBELLI, P.; CERCHIONE, R.; CHIARONI, D.; DEL VECCHIO, P.; URBINATI, A. *Designing business models in circular economy: a systematic literature review and research agenda*. ***Business Strategy and the Environment***, v. 29, n. 4, p. 1734-1749, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/bse.2466. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bse.2466. Acesso em: 26 set. 2026.

CHAI, A. et al. *AS-MPCA: an adaptive scheduling algorithm for industrial Internet of Things based on multi-population co-evolution*. ***Internet of Things***, v. 31, 101596, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101596. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S254266052500109X?via%3Dihub. Acesso em: 26 set. 2026.

CHOUDHARY, V. et al. *An overview of smart agriculture using Internet of Things (IoT) and web services*. ***Environmental and Sustainability Indicators***, v. 26, 100607, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100607. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972725000285?via%3Dihub. Acesso em: 26 set. 2026.

DALÉ, L. B. C.; ROLDAN, L. B.; HANSEN, P. B. *Analysis of sustainability incorporation by industrial supply chain in Rio Grande do Sul state (Brazil)*. ***Journal of Operations and Supply Chain Management***, v. 4, n. 1, p. 25-36, 2011. DOI: https://doi.org/10.12660/joscmv4n1p25-36. Disponível em: https://periodicos.fgv.br/joscm/article/view/11158. Acesso em: 26 set. 2026.

DALENOGARE, L. S.; BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. *The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance*. ***International Journal of Production Economics***, v. 204, p. 383-394, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527318303372. Acesso em: 26 set. 2026.

DE KONING, I.; KASSAHUN, A.; TEKINERDOGAN, B. *Benchmarking circularity in supply chains: a systematic literature review*. ***Journal of Environmental Management***, v. 366, 121676, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121676. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724016621. Acesso em: 26 set. 2026.

DENZIN, N. K. ***The research act***: *a theoretical introduction to sociological methods*. 1. ed. Londres: Routledge, 2017.

DUGUMA, A. L.; BAI, X. *How the Internet of Things technology improves agricultural efficiency*. ***Artificial Intelligence Review***, v. 58, n. 2, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-024-11046-0. Acesso em: 26 set. 2026.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. *Measuring circular economy strategies through index methods: a critical analysis*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 142, p. 2741-2751, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616318273. Acesso em: 26 set. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. ***Building prosperity***: *circular economy opportunities in the built environment*. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2024b. Disponível em: https://sites.ellenmacarthurfoundation.org/pt/page/building-prosperity. Acesso em: 26 set. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Mudanças climáticas e economia circular**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2024c. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/clima/visao-geral. Acesso em: 26 set. 2026.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. ***Navigating the circular economy reporting landscape***. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2024a. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/navigating-the-circular-economy-reporting-landscape. Acesso em: 26 set. 2026.

FLYVBJERG, B. *Five misunderstandings about case-study research*. ***Qualitative Inquiry***, v. 12, n. 2, p. 219-245, 2006. DOI: https://doi.org/10.1177/1077800405284363. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1077800405284363. Acesso em: 26 set. 2026.

GARTNER. ***Market guide for IoT platforms***. 2023. Disponível em: https://www.gartner.com/en/documents/5499495. Acesso em: 26 set. 2026.

GEISSDOERFER, M.; PIERONI, M. P. P.; PIGOSSO, D. C. A.; SOUFANI, K. *Circular business models: a review*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 277, 123741, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620337860. Acesso em: 26 set. 2026.

HAN, J.; HESHMATI, A.; RASHIDGHALAM, M. *Circular economy business models with a focus on servitization*. ***Sustainability***, v. 12, n. 21, 8799, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/su12218799. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8799. Acesso em: 26 set. 2026.

KAHANDAWA, R.; JAYASINGHE, R. S.; GOMIS, K. *CirDEF: standardised information framework to address the information needs of circularity indicators*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 510, 145611, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145611. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625009618. Acesso em: 26 set. 2026.

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. *Circular economy: from review of theories and practices to development of implementation tools*. ***Resources, Conservation and Recycling***, v. 135, p. 190-201, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302573. Acesso em: 26 set. 2026.

KHAJURIA, A.; VERMA, P.; VELLA, A.; ZANINI-FREITAG, D.; XIN, H.; MURTHY, I. K.; ARORA, J. K.; SYLVA, K.; MENON, L.; PARDESHI, S.; KRAL, U.; LIU, X. *The SDG accelerator: circular economy solutions through efficient sustainable consumption*. ***Circular Economy***, v. 4, n. 2, 100140, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cec.2025.100140. Disponível em: https://www.sciopen.com/article/10.1016/j.cec.2025.100140. Acesso em: 26 set. 2026.

KIRCHHERR, J. et al. *Conceptualizing the circular economy (revisited): an analysis of 221 definitions*. ***Resources, Conservation and Recycling***, v. 194, 107001, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923001318. Acesso em: 26 set. 2026.

KLEIN, A. Z.; PACHECO, F. B.; RIGHI, R. R. *Internet of Things-based products/services: process and challenges on developing the business models*. ***JISTEM - Journal of Information Systems and Technology Management***, v. 14, n. 3, p. 439-461, 2017. DOI: https://doi.org/10.4301/S1807-17752017000300009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/jistm/a/QzvTrQ9f5cXtCPgWz9qNKCz/. Acesso em: 26 set. 2026.

KORTUEM, G.; KAWSAR, F.; FITTON, D.; SUNDRAMOORTHY, V. *Smart objects as building blocks for the Internet of Things*. ***IEEE Internet Computing***, v. 14, n. 1, p. 44-51, jan./fev. 2010. DOI: https://doi.org/10.1109/MIC.2009.143. Disponível em: https://knowledge.lancashire.ac.uk/id/eprint/5401/. Acesso em: 26 set. 2026.

KRISTOFFERSEN, E.; BLOMSMA, F.; MIKALEF, P.; LI, J. *The smart circular economy: a digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies*. ***Journal of Business Research***, v. 120, p. 241-261, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296320304987. Acesso em: 26 set. 2026.

KVALE, S.; BRINKMANN, S. ***InterViews***: *learning the craft of qualitative research interviewing*. 3. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2014.

LADLEY, J. ***Data governance***: *how to design, deploy and sustain an effective data governance program*. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2019.

LAHROUNI, K.; SEMLALI, H.; ANDRIEUX, G.; DIOURIS, J.-F.; GHAMMAZ, A. *A systematic literature review on spectrum detection for Cognitive Radio-Internet of Things networks*. ***Ad Hoc Networks***, v. 175, 103857, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.103857. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870525001052. Acesso em: 26 set. 2026.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LIN, K.-P.; YU, C.-M.; CHEN, K.-S. *Production data analysis system using novel process capability indices-based circular economy*. ***Industrial Management & Data Systems***, v. 119, n. 8, p. 1655-1668, 2019. DOI: https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2019-0166. Disponível em: https://www.emerald.com/imds/article-abstract/119/8/1655/179790/Production-data-analysis-system-using-novel?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 26 set. 2026.

MENDOZA, A. P.; CHÁVEZ, J. L. C.; MENDOZA, R. T. *Applications and methodologies of Internet of Things in warehouses and inventory management: a systematic literature review*. ***Procedia Computer Science***, v. 253, p. 1236-1245, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.185. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050925001930. Acesso em: 26 set. 2026.

MHATRE, P.; PANCHAL, R.; SINGH, A.; BIBYAN, S. *A systematic literature review on the circular economy initiatives in the European Union*. ***Sustainable Production and Consumption***, v. 26, p. 187-202, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550920302232. Acesso em: 26 set. 2026.

MINAYO, M. C. de S. **O desafio do conhecimento**: pesquisa qualitativa em saúde. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 2014.

OTTERBACH, N.; FRÖHLING, M. *Raw material criticality assessments as decision-making support for corporate circular economy strategies: a systematic review*. ***Resources, Conservation and Recycling***, v. 219, 108299, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108299. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925001788. Acesso em: 26 set. 2026.

PAGOROPOULOS, A.; PIGOSSO, D. C. A.; MCALOONE, T. C. *The emergent role of digital technologies in the circular economy: a review*. ***Procedia CIRP***, v. 64, p. 19-24, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047. Disponível em: https://orbit.dtu.dk/en/publications/the-emergent-role-of-digital-technologies-in-the-circular-economy/. Acesso em: 26 set. 2026.

REDMAN, T. C. ***Data driven***: *profiting from your most important business asset*. Boston: Harvard Business Press, 2008.

REN, S.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; SAKAO, T.; HUISINGH, D.; ALMEIDA, C. M. V. B. *A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: a framework, challenges and future research directions*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 210, p.

1343-1365, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618334255. Acesso em: 26 set. 2026.

SASSANELLI, C.; ARRIGA, T.; ZANIN, S.; D'ADAMO, I.; TERZI, S. *Industry 4.0 driven result-oriented PSS: an assessment in the energy management*. ***International Journal of Energy Economics and Policy***, v. 12, n. 4, p. 186-203, 2022. DOI: https://doi.org/10.32479/ijeep.13313. Disponível em: https://www.econjournals.com.tr/index.php/ijeep/article/view/13313. Acesso em: 26 set. 2026.

SEHNEM, S.; JABBOUR, C. J. C.; ROSSETTO, A. M.; CAMPOS, L. M. de S.; SARQUIS, A. B. *Green Supply Chain Management*: uma análise da produção científica recente (2001-2012). ***Production***, v. 25, n. 3, p. 465-481, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-65132014005000006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/prod/a/v3DX3TszZBngWjqjjtWytJt/. Acesso em: 26 set. 2026.

SHEVCHENKO, T.; SHAMS ESFANDABADI, Z.; RANJBARI, M.; SAIDANI, M.; MESA, J.; SHEVCHENKO, S.; YANNOU, B.; CLUZEL, F. *Metrics in the circular economy: an inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda*. ***Ecological Indicators***, v. 165, 112182, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112182. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X24006393. Acesso em: 26 set. 2026.

SPRING, M.; ARAUJO, L. *Product biographies in servitization and the circular economy*. ***Industrial Marketing Management***, v. 60, p. 126-137, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.07.001. Disponível em: https://research.manchester.ac.uk/en/publications/product-biographies-in-servitization-and-the-circular-economy/. Acesso em: 26 set. 2026.

STAHEL, W. R. *The circular economy*. ***Nature***, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016. DOI: https://doi.org/10.1038/531435a. Disponível em: https://www.nature.com/articles/531435a. Acesso em: 26 set. 2026.

TECHINSIGHTS. ***Global connected and IoT device installed base forecast, 2018–2028***. 2023. Disponível em: https://www.techinsights.com/blog/global-connected-and-iot-device-installed-base-forecast-2018-2028. Acesso em: 26 set. 2026.

TURSKIS, Z.; ŠNIOKIENĖ, V. *IoT-driven transformation of circular economy efficiency: an overview*. ***Mathematical and Computational Applications***, v. 29, n. 4, 49, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/mca29040049. Disponível em: https://www.mdpi.com/2297-8747/29/4/49. Acesso em: 26 set. 2026.

VOULGARIDIS, K.; LAGKAS, T.; ANGELOPOULOS, C. M.; NIKOLETSAS, S. E. *IoT and digital circular economy: principles, applications, and challenges*. ***Computer Networks***, v. 219, 109456, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109456. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138912862200490X. Acesso em: 26 set. 2026.

WALDNER, J.-B. ***Nanocomputers and swarm intelligence***. Londres: ISTE Ltd.; Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

WANG, J.; LIU, Z.; YANG, X.; LI, M.; LYU, Z. *The Internet of Things under federated learning: a review of the latest advances and applications*. ***Computers, Materials & Continua***, v. 82, n. 1, p. 1-39, 2025. DOI: https://doi.org/10.32604/cmc.2024.058926. Disponível em: https://www.techscience.com/cmc/v82n1/59255. Acesso em: 26 set. 2026.

YALLI, J. S.; HASAN, M. H.; BADAWI, A.; ABUBAKAR BADAWI, A. *Internet of Things (IoT): origin, embedded technologies, smart applications, and its growth in the last decade*. ***IEEE Access***, v. 12, p. 91357-91382, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3418995. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/10570411/. Acesso em: 26 set. 2026.

YASMEEN, H.; LONGSHENG, C. *Advancing circular economy in the equipment manufacturing sector: the role of environmental management systems, innovation and policy support*. ***Journal of Environmental Management***, v. 380, 124967, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124967. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479725009430. Acesso em: 26 set. 2026.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ZENG, F.; PANG, C.; TANG, H. *Sensors on Internet of Things systems for the sustainable development of smart cities: a systematic literature review*. ***Sensors***, v. 24, n. 7, 2074, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24072074. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/7/2074. Acesso em: 26 set. 2026.

ZHANG, Y.; HUANG, Y.; CHIAVETTA, D.; PORTER, A. L. *An introduction of advanced tech mining: technical emergence indicators and measurements*. ***Technological Forecasting and Social Change***, v. 182, 121855, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121855. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162522003791. Acesso em: 26 set. 2026.

ZHOU, Y. *AI-driven digital circular economy with material and energy sustainability for Industry 4.0*. ***Energy and AI***, v. 20, 100508, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100508. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666546825000400. Acesso em: 26 set. 2026.