



Eficiência termoambiental na logística reversa de pneus: integração entre energia e exergia

Thermoenvironmental efficiency in end-of-life tire reverse logistics: integrating energy and exergy

Recebimento: 3/8/2025 - Aceite: 19/3/2026 – Publicação: 28/4/2026

Processo de Avaliação: Double Blind Review – <https://doi.org/10.22567/rep.v15i1.1125>

Fernando Rodrigo Souza

fernando.souza59@fatec.sp.gov.br

<https://orcid.org/0000-0003-2874-5680>

Faculdade de Tecnologia de Sorocaba.

RESUMO

A crescente demanda por modelos de desenvolvimento sustentáveis tem impulsionado a transição da economia linear para a economia circular, sobretudo em setores com elevada complexidade logística e energética, como o reaproveitamento de pneus inservíveis. Este artigo tem como objetivo avaliar o desempenho de uma unidade regional de logística reversa no Estado de São Paulo por meio de uma abordagem integrada de contabilidade emergética e análise exergética. Trata-se de um estudo de caso instrumental, baseado em triangulação metodológica que combina revisão bibliográfica sistemática, análise documental e entrevistas semiestruturadas. A contabilidade emergética foi utilizada para estimar o custo energético total incorporado ao sistema, em unidades de energia solar equivalente (sej), enquanto a análise exergética permitiu mensurar perdas de qualidade energética e irreversibilidades nos processos operacionais. Os resultados revelam o reaproveitamento de aproximadamente 15.000 GJ de exergia e $3,0 \times 10^{17}$ sej de energia por mês, com índice de rendimento emergético (EYR) igual a 20. Conclui-se que a integração entre energia e exergia fornece uma métrica consistente e complementar para avaliação de sistemas logísticos complexos, contribuindo com subsídios técnicos e metodológicos à formulação de políticas públicas voltadas à circularidade sustentável em contextos regionais.

Palavras-chave: logística reversa, emergética, exergia, sustentabilidade, pneus inservíveis



ABSTRACT

The growing demand for sustainable development has driven the transition from a linear to a circular economy, especially in sectors with complex energy and logistics systems, such as end-of-life tire reuse. This study aims to evaluate the performance of a regional reverse logistics facility in the State of São Paulo through an integrated approach combining energy accounting and exergy analysis. An instrumental case study was conducted using methodological triangulation, including systematic literature review, document analysis, and semi-structured interviews. Energy accounting was applied to estimate the total embedded energy cost in solar equivalent joules (sej), while exergy analysis quantified energy quality losses and process irreversibilities. The results indicate the monthly recovery of approximately 15,000 GJ of exergy and 3.0×10^{17} sej of energy, with an energy yield ratio (EYR) of 20. It is concluded that the integration of energy and exergy provides a consistent and complementary metric for assessing complex logistics systems and offers technical and methodological insights to support public policies aimed at sustainable circularity in regional contexts.

Keywords: reverse logistics, energy, exergy, sustainability, end-of-life tires

1. INTRODUÇÃO

O predomínio do modelo linear nas estruturas produtivas contemporâneas revela-se insustentável, especialmente frente ao agravamento das crises ambientais e à crescente escassez de recursos naturais. Como alternativa, a economia circular propõe a reintegração de materiais e energia aos sistemas produtivos por meio de ciclos fechados e estratégias regenerativas (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017). Nesse panorama, a logística reversa emerge como mecanismo técnico-institucional indispensável à implementação de práticas circulares em cadeias produtivas (Leite, 2017; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015).

No Brasil, a Lei nº 12.305/2010 instituiu um marco legal ao estabelecer a corresponsabilidade entre os diversos agentes econômicos pelo ciclo de vida dos produtos (Brasil, 2010). Contudo, estudos recentes indicam que a efetivação dessa política enfrenta barreiras estruturais, como a ausência de incentivos econômicos, a fragmentação institucional e a escassez de métricas técnicas que expressem adequadamente a eficiência e os impactos sistêmicos dos

modelos logísticos (Silva, Ribeiro, Mello, & Domingos, 2022; Freitas, Araújo, Oliveira, & Amorim, 2023).

Nesse contexto, a avaliação exergetica desponta como ferramenta analítica robusta na aferição crítica de sistemas de reaproveitamento, ao quantificar perdas entrópicas e potenciais remanescentes de transformação útil. Por meio do conceito de exergia, definido como a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser extraída de um sistema em relação ao meio ambiente de referência, torna-se possível quantificar o grau de degradação energética e identificar as principais irreversibilidades dos processos (Moran, Shapiro, Boettner, & Bailey, 2020; Dincer & Rosen, 2020). Enquanto a energia total permanece constante, conforme a primeira lei da termodinâmica, a exergia é irreversivelmente dissipada devido a imperfeições entrópicas dos processos reais, o que confere a essa abordagem um papel estratégico na racionalização dos fluxos energéticos ao longo da cadeia produtiva.

Particularmente em resíduos complexos, como os pneus inservíveis, a exergia oferece uma métrica robusta para avaliar a viabilidade técnica de rotas de reaproveitamento, seja na recuperação material ou energética, permitindo orientar intervenções que maximizem o aproveitamento útil dos recursos residuais (Çengel & Boles, 2014; Bejan, 2016). De modo complementar, a análise emergética quantifica a energia incorporada cumulativamente ao longo da cadeia produtiva, traduzindo complexidades sistêmicas em métricas comparáveis de sustentabilidade em unidades de energia solar equivalente, proporciona uma leitura sistêmica da sustentabilidade (Odum, 1996; Giannetti, Almeida, Bonilla & Silva, 2013).

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo geral avaliar, sob as óticas exergetica e emergética, o desempenho de um modelo regional de logística reversa de pneus inservíveis no Estado de São Paulo. Especificamente, busca-se: (i) mapear os fluxos materiais e energéticos envolvidos; (ii) identificar ineficiências sistêmicas associadas à perda de qualidade energética e ao consumo oculto de recursos; e (iii) propor diretrizes operacionais sustentadas por princípios de circularidade e racionalidade termoambiental.

A pesquisa justifica-se pela carência de estudos integrados que combinem exergia e emergia na análise de modelos logísticos no contexto brasileiro, especialmente em unidades operacionais regionais. Espera-se, assim, oferecer subsídios conceituais e metodológicos que contribuam para o

redesenho de práticas logísticas mais eficientes, ambientalmente robustas e territorialmente sustentáveis.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Logística Reversa na Transição para a Economia Circular

A logística, outrora restrita à movimentação física de insumos, consolidou-se como um eixo estratégico que articula racionalidade operacional, criação de valor e sustentabilidade socioambiental. Estudos evidenciam que essa área ultrapassou seu papel tradicional de suporte, passando a integrar de forma sistêmica as decisões empresariais voltadas à criação de valor e à competitividade, com foco na sincronização entre transporte, armazenagem e informação (Ballou, 1993; Christopher, 2018; Bertaglia, 2020; Novaes, 2021). Essa evolução teórica e prática incorporou também os desafios ambientais, o que impulsionou o desenvolvimento da logística reversa como componente essencial para a gestão sustentável dos recursos.

A logística reversa não se restringe à devolução de produtos ao ponto de origem, sendo concebida como uma estratégia central para a reintegração de materiais aos ciclos produtivos (Pozo, 2016; Leite, 2017; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015). Tal perspectiva orienta-se pela maximização do valor residual, pela mitigação de desperdícios e pela racionalização do uso de insumos naturais. Ao viabilizar a reintegração de insumos aos ciclos produtivos, a logística reversa configura-se como instrumento articulador entre desempenho produtivo e corresponsabilidade ambiental sistêmica compartilhada, promovendo a articulação entre cadeias lineares e modelos organizados sob os princípios da circularidade (Bowersox, Closs & Bixby Cooper, 2023).

No contexto brasileiro, a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, consagrou-se como referência normativa para a reconfiguração institucional e operacional da gestão de resíduos urbanos, ao introduzir o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A legislação atribui corresponsabilidades compartilhadas a todos os elos da cadeia, de produtores a consumidores, incluindo o Estado, no manejo adequado do ciclo de vida dos produtos, promovendo a corresponsabilidade pelas etapas de coleta, reaproveitamento, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010).



A integração entre logística reversa e economia circular impõe a necessidade de revisão dos paradigmas industriais tradicionais. A circularidade, ao contrário da linearidade do modelo de produção e descarte, propõe uma lógica de fluxo regenerativo, com valorização de materiais, extensão da vida útil dos produtos e inovação em *design* (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Geissdoerfer, Savaget, Bocken & Hultink, 2017). A literatura especializada destaca que essa abordagem requer mudanças estruturais na forma como empresas projetam, produzem e distribuem seus produtos, ao mesmo tempo em que depende de políticas públicas que incentivem práticas regenerativas e assegurem condições de viabilidade econômica (Korhonen, Honkasalo & Seppälä, 2018).

A aplicação da economia circular, no entanto, enfrenta limitações concretas. Pesquisas indicam que sua consolidação é dificultada pela falta de infraestrutura, pela volatilidade no valor dos materiais recicláveis e pela ausência de incentivos fiscais e financeiros estáveis (Bocken & Konietzko, 2022; Kirchherr, Yang, Schulze-Spüntrup, Heerink & Hartley, 2023). Esses entraves operacionais e regulatórios demonstram que o avanço teórico ainda não se traduziu plenamente em transformação prática. A análise crítica sugere que a circularidade corporativa tem se restringido, em muitos casos, à reformulação de modelos de negócios, sem alterar de forma significativa as estruturas produtivas lineares.

Unidades regionais especializadas em logística reversa de resíduos complexos, como os pneus inservíveis, têm desempenhado papel estratégico na transição para a economia circular, ao estruturar arranjos técnicos e operacionais voltados à reinserção de materiais em cadeias produtivas industriais. No entanto, a literatura aponta que tais estruturas ainda enfrentam desafios significativos, como a volatilidade no valor dos resíduos reaproveitados, a ausência de mecanismos estáveis de apoio institucional e a limitação de políticas públicas que reconheçam e incentivem sua contribuição ambiental e territorial (Gutberlet & Carenzo, 2020; Silva, Ribeiro, Mello & Domingos, 2022; Freitas, Araújo, Oliveira & Amorim, 2023). A carência de marcos regulatórios robustos e de instrumentos de financiamento adequados compromete sua capacidade de operar de forma contínua e de ampliar seu impacto dentro dos objetivos propostos pela economia circular.

A superação dessas fragilidades exige a articulação entre agentes públicos, privados e sociais em torno de uma política de transição justa. Estudos sugerem que, mesmo em setores com avanços normativos relevantes, como o da construção civil, a aplicação das diretrizes da economia

circular tem sido comprometida por fragmentações institucionais e pela escassez de instrumentos de monitoramento (Munaro & Tavares, 2022). Nesse sentido, torna-se evidente que o êxito da logística reversa e da economia circular depende da construção de um ambiente institucional propício, que combine inovação tecnológica, segurança jurídica e participação social qualificada.

Ao integrar fluxos materiais e energéticos sob a ótica da regeneração e do reaproveitamento, a logística reversa desponta como componente técnico-operacional indispensável na reestruturação dos sistemas produtivos. Para além da eficiência, seu valor está na capacidade de reconectar práticas empresariais aos princípios de sustentabilidade, promovendo a circularidade como estratégia de desenvolvimento.

2.2. Avaliação Emergética como Ferramenta para Sustentabilidade de Sistemas de Reciclagem

A contabilidade emergética constitui uma metodologia sistêmica para quantificar os aportes energéticos acumulados, diretos e indiretos, em unidades padronizadas de energia solar equivalente em sistemas ecológicos e produtivos, expressa em unidades de energia solar equivalente. Essa abordagem, desenvolvida inicialmente para integrar variáveis ecológicas e econômicas em uma estrutura comum de análise, proporciona uma leitura ampliada da sustentabilidade ao considerar não apenas os fluxos diretos de energia, mas também os insumos indiretos, os serviços de suporte e os recursos naturais empregados ao longo de toda a cadeia de transformação (Odum, 1996).

Sob esse prisma, a energia tem sido interpretada como uma ferramenta que permite avaliar a eficiência sistêmica de processos socioeconômicos. Sua utilidade reside na capacidade de sintetizar a complexidade dos sistemas em indicadores comparáveis, o que favorece análises integradas de sustentabilidade. Tal perspectiva possibilita que diferentes atividades humanas sejam avaliadas em termos de seu custo energético total, incorporando a energia embutida em materiais, infraestrutura, trabalho e serviços (Brown & Ulgiati, 1997).

Para além de sua função comparativa entre sistemas produtivos, a análise emergética tem sido mobilizada como instrumento analítico na avaliação integrada dos impactos ecológicos e socioeconômicos decorrentes dos processos de transformação material. Sua aplicação em contextos urbanos e industriais evidenciou a capacidade de integrar dimensões ambientais e econômicas, ao

mesmo tempo em que delimita os limites biofísicos das atividades antrópicas e sugere diretrizes para sua reestruturação sistêmica (Ulgiati & Brown, 1998).

No contexto brasileiro, a emergia foi incorporada a estudos voltados à análise de sistemas sustentáveis de produção e de gestão de resíduos, com foco na identificação de estratégias que otimizem o uso de recursos e minimizem perdas energéticas. Investigações demonstraram que essa abordagem pode auxiliar no planejamento de atividades agrícolas, industriais e urbanas, contribuindo para a formulação de políticas públicas e práticas de gestão ambiental mais eficazes (Giannetti, Barrella, Bonilla & Almeida, 2006).

Estudos subsequentes enfatizaram que a contabilidade emergética permite a integração entre dimensões ambientais, econômicas e sociais. Ao converter todos os aportes sistêmicos em uma unidade energética comum, a análise emergética provê um indicador integrado para avaliar a sustentabilidade em múltiplas dimensões. Essa característica é particularmente relevante para sistemas complexos como a gestão de resíduos sólidos urbanos, onde coexistem variáveis técnicas, sociais e ecológicas (Giannetti, Almeida, Bonilla & Silva, 2013).

A aplicação da análise emergética à cadeia da reciclagem revela-se pertinente diante da necessidade de mensurar o equilíbrio entre a energia investida no processo e os benefícios ambientais advindos do reaproveitamento de materiais. Ao considerar desde a coleta até a reintegração dos resíduos, a análise emergética quantifica de forma abrangente os ganhos energéticos e as externalidades ambientais mitigadas. No contexto de unidades regionais especializadas na logística reversa de resíduos complexos, como os pneus inservíveis, a abordagem emergética permite mapear com precisão os pontos de ineficiência sistêmica, evidenciar gargalos operacionais e orientar a reorganização dos fluxos produtivos sob uma lógica de otimização energética e circularidade material.

Análises recentes têm indicado que a adoção dessa ferramenta pode contribuir para fortalecer iniciativas locais de economia circular. A emergia oferece suporte técnico-analítico à tomada de decisões orientadas por evidências, articulando aspectos de eficiência, resiliência ecológica e justiça territorial, integrando aspectos de eficiência energética, impacto ambiental e inclusão social. Isso se torna ainda mais relevante em contextos marcados por restrições estruturais e recursos limitados, onde decisões equivocadas podem comprometer a viabilidade técnica e econômica dos modelos de gestão de resíduos (Silvestrim, Rivas, Vieira & Santana, 2022).

Contudo, apesar de seu potencial analítico, a aplicação da contabilidade emergética ainda enfrenta desafios. A complexidade na obtenção de dados primários, a carência de coeficientes regionais de transformidade e a dificuldade de incorporação institucional desse tipo de análise limitam sua disseminação. Superar tais barreiras requer o fortalecimento de redes de pesquisa, capacitação técnica e a inclusão dessa abordagem em instrumentos de planejamento e regulação ambiental.

Portanto, ao articular variáveis técnicas e sociais sob uma lógica sistêmica, a emergia contribui não apenas para avaliar, mas também para redesenhar práticas associadas à logística reversa. Sua adoção pode favorecer modelos urbanos mais resilientes, energeticamente equilibrados e socialmente justos, desde que acompanhada de estratégias institucionais que garantam viabilidade operacional e legitimidade política.

2.3. Exergia, Emergética e Sustentabilidade em Sistemas de Logística Reversa

No campo da engenharia termodinâmica, a análise da eficiência energética evoluiu significativamente, passando da avaliação de desempenho de equipamentos isolados para uma abordagem mais sistêmica, que considera os limites físicos e as perdas associadas aos processos de conversão de energia. Nesse contexto, o conceito de exergia tornou-se fundamental, ao quantificar a quantidade máxima de trabalho útil que pode ser extraída de um sistema enquanto ele interage com seu ambiente até alcançar o equilíbrio termodinâmico (Moran, Shapiro, Boettner & Bailey, 2020).

Ao contrário da energia, que é conservada de acordo com a primeira lei da termodinâmica, a exergia não é conservada, sendo destruída em virtude das irreversibilidades presentes nos processos reais. Esse atributo confere à exergia elevada utilidade para detectar perdas significativas de qualidade energética nos processos produtivos ao longo de cadeias produtivas complexas, como aquelas envolvidas na logística reversa de resíduos sólidos (Dincer & Rosen, 2020).

A mensuração exergética ancora-se no conceito de estado morto, equilíbrio termodinâmico entre sistema e ambiente, a partir do qual se define a perda integral do potencial transformacional do sistema entre sistema e ambiente, a partir da qual se define a perda total do potencial de transformação útil, condição em que o sistema atinge equilíbrio com o ambiente de referência e, portanto, não possui mais potencial para realizar trabalho. No estado de equilíbrio termodinâmico



com o ambiente, o chamado estado morto, a exergia torna-se nula, pois não há mais potencial útil de transformação, dado que todas as propriedades se igualam às condições ambientais. A avaliação exérgica, ao comparar o estado real do sistema com esse estado de equilíbrio, fornece uma medida objetiva do desempenho termodinâmico e do potencial de melhoria dos processos energéticos (Çengel & Boles, 2015).

Em termos práticos, a exergia pode ser expressa por meio de equações que relacionam entalpia, energia cinética, energia potencial, temperatura e entropia com seus respectivos valores de referência, permitindo calcular o trabalho reversível máximo para um sistema em regime estacionário (Moran, Shapiro, Boettner & Bailey, 2020; Çengel & Boles, 2014; Bejan, 2016).

Além de sua aplicabilidade técnica, a análise exérgica adquire relevância crescente no campo da sustentabilidade, por permitir a identificação precisa das perdas irreversíveis de energia ao longo das cadeias produtivas (Wall, 1977; Dincer & Rosen, 2020). A partir da avaliação dos fluxos exérgicos e das ineficiências associadas aos processos industriais, torna-se possível orientar intervenções que maximizem o aproveitamento energético e minimizem os impactos ambientais (Wall, 1987; 1988). Em sistemas de logística reversa, como aqueles voltados à destinação de pneus inservíveis, essa abordagem oferece uma ferramenta estratégica para localizar os pontos de maior degradação energética e, portanto, de menor eficiência, contribuindo para o redesenho de processos mais sustentáveis.

A exergia ultrapassa a função de mero índice térmico, oferecendo uma métrica abrangente do potencial útil de transformação energética remanescente em sistemas reais. Trata-se de uma ferramenta integradora que quantifica a distância de um sistema em relação ao equilíbrio termodinâmico, traduzindo esse desvio em potencial útil de transformação. Isso confere à exergia uma utilidade estratégica no planejamento energético regional, ao indicar quais fluxos de resíduos ou recursos ainda possuem valor energético significativo, mesmo após processos de descarte ou degradação (Kilkış & Kilkış, 2017).

A análise exérgica, portanto, não apenas complementa os diagnósticos convencionais baseados na primeira lei da termodinâmica, como também permite integrar diferentes formas de energia e matéria em uma métrica comum, viabilizando comparações objetivas entre sistemas diversos. No caso da logística reversa de pneus, por exemplo, o conhecimento do potencial exérgico residual desses materiais pode orientar decisões quanto à reutilização energética, à

recuperação de materiais ou à disposição final, sempre com base na maximização do aproveitamento técnico e na minimização das perdas entrópicas.

A literatura indica que sistemas ecológicos, por operarem em condições próximas ao equilíbrio termodinâmico, apresentam naturalmente baixa disponibilidade exergética. Em contraposição, os sistemas produtivos de origem antropogênica, especialmente os de base urbana e industrial, tendem a operar com elevadas taxas de degradação exergética, o que evidencia a necessidade de adoção de mecanismos de compensação e reaproveitamento de energia útil (Ludovisi, Pandolfi, & Taticchi, 2005). Sob essa perspectiva, a escassez de recursos exergéticos deve ser reconhecida como uma limitação estrutural à viabilidade de longo prazo dos modelos de desenvolvimento, exigindo sua incorporação como variável crítica no desenho de estratégias logísticas e de políticas públicas sustentáveis.

Em complementaridade, embora a energia forneça uma perspectiva sistêmica ao contabilizar a energia incorporada nos processos produtivos, ela não distingue com a mesma precisão a qualidade da energia nem o potencial real de transformação disponível. Assim, enquanto a energia revela a magnitude dos insumos utilizados ao longo da cadeia, a exergia permite avaliar a viabilidade termodinâmica dos fluxos residuais, sendo mais eficaz na otimização técnica dos processos (Agostinho & Siche, 2014; Sciubba & Ulgiati, 2005).

Por fim, a adoção da análise exergética na logística reversa de pneus inservíveis no estado de São Paulo pode oferecer subsídios técnicos para a construção de um modelo regional eficiente e sustentável.

Ao identificar onde e como ocorrem as perdas energéticas, torna-se possível propor soluções operacionais mais alinhadas aos princípios da economia circular, fundamentadas em métricas físicas e capazes de promover ganhos ambientais, econômicos e sociais a longo prazo (Zhang, Jin, Qiao, Hayat, Alsaedi & Ahmad, 2019).

A seguir, apresenta-se a Tabela 1, que resume as principais diferenças entre exergia e energia, destacando a complementaridade entre essas abordagens na avaliação integrada da sustentabilidade logística.

A tabela 1, evidencia que exergia e energia não são concorrentes, mas sim complementares: a primeira permite diagnósticos técnico-operacionais e a segunda, avaliações

amplas de sustentabilidade. A articulação entre ambas fornece uma métrica mais robusta para a análise de sistemas logísticos complexos como o da logística reversa de pneus.

Tabela 1 - Comparativo entre Exergia e Emergia

Critério	Exergia	Emergia
Unidade	Joule (J)	Solar emjoule (sej)
Base teórica	Segunda Lei da Termodinâmica	Teoria de Ecossistemas
Foco	Qualidade da energia	Energia incorporada total (direta e indireta)
Conservação	Não é conservada (destruída por irreversibilidades)	Conservada como energia acumulada ao longo dos processos
Aplicação	Diagnóstico técnico-operacional	Avaliação sistêmica e ambiental
Limitação	Não capta aspectos socioambientais indiretos	Não distingue qualidade energética

Fonte: Elaborada pelo Autor.

3. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e aplicada, com base em um estudo de caso único instrumental, conforme delineamentos propostos por Stake (1995) e Yin (2018). A escolha metodológica está ancorada na necessidade de captar, com profundidade e densidade contextual, a complexidade dos fluxos territoriais, energéticos e institucionais que moldam os sistemas regionais de logística reversa. Conforme Stake (1995), o estudo de caso instrumental permite não apenas descrever fenômenos singulares, mas explorar aspectos teóricos mais amplos a partir de situações particulares. Yin (2018), por sua vez, destaca a pertinência dessa estratégia em contextos onde os limites entre fenômeno e contexto não são nitidamente definidos, como ocorre nos arranjos logísticos descentralizados voltados ao reaproveitamento de resíduos complexos.

A investigação utilizou triangulação metodológica (Denzin, 2018), integrando quatro ferramentas principais: revisão de literatura e bibliográfica sistematizada, análise documental, entrevistas semiestruturadas e análise de conteúdo categorial.

A revisão de literatura foi conduzida com base nos procedimentos propostos por Gil (2017) e Bardin (2015), com foco na identificação e categorização dos principais conceitos teóricos relacionados à economia circular, logística reversa e avaliação energética de sistemas. Essa etapa permitiu estruturar uma base conceitual sólida para a interpretação crítica dos dados empíricos.

Em paralelo, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica sistemática, conforme Lakatos & Marconi (2021), priorizando publicações técnico-científicas nacionais e internacionais sobre métodos de análise exergética e emergética aplicados à gestão de resíduos sólidos. A seleção do material considerou critérios de relevância, atualidade e aderência temática, com base em bases como *Scopus*, *ScienceDirect*, *Google Scholar* e Portal de Periódicos da CAPES.

A análise documental fundamentou-se no método descrito por Cellard (2014), envolvendo o exame de legislações setoriais, normativas técnicas, relatórios operacionais internos, planos de gerenciamento de resíduos e registros institucionais da unidade estudada. Esta ferramenta possibilitou o mapeamento das condições estruturais, normativas e organizacionais que influenciam diretamente a performance do modelo regional de logística reversa.

As entrevistas semiestruturadas foram realizadas com o gestor operacional, com base nos protocolos metodológicos de Minayo (2014) e Flick (2009). Os roteiros foram elaborados a partir das categorias definidas na revisão teórica. As entrevistas foram registradas com autorização dos participantes, assegurando anonimato e respeito aos princípios éticos da pesquisa.

Para o tratamento e interpretação dos dados coletados, foi empregada a análise de conteúdo categorial (Bardin, 2015), com codificação temática orientada por três eixos principais: estrutura operacional; desempenho energético e ambiental; e inserção territorial. A categorização seguiu abordagem mista, combinando categorias *a priori* (derivadas da literatura) com categorias emergentes (derivadas dos dados empíricos), assegurando coerência entre teoria e evidência.

A adoção dessas ferramentas metodológicas permitiu ampliar a confiabilidade dos achados e assegurar consistência e confiabilidade aos resultados, promovendo uma leitura integrada das dimensões técnicas e energéticas do sistema estudado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A operação analisada apresenta uma configuração técnica e organizacional voltada à logística reversa de pneus inservíveis, estruturada por um modelo modular com inserção territorial escalável, capaz de articular processos integrados desde o recebimento até o reaproveitamento material e energético. Com capacidade operacional média de 500 toneladas por mês, a estrutura é mantida por uma rede regionalizada de mais de 400 pontos de coleta, que inclui oficinas mecânicas,

centros automotivos e concessionárias, configurando uma malha logística articulada com a dinâmica territorial da região de atuação. A espacialização das atividades, em área superior a 15.000 m², viabiliza a integração sequencial das etapas de recepção, triagem, trituração e expedição de materiais, sustentada por uma equipe de cerca de 80 colaboradores alocados em funções técnicas, logísticas e administrativas, o que assegura o fluxo contínuo de processamento.

A seguir, apresenta-se a Tabela 2, que reúne os principais indicadores operacionais da unidade de logística reversa analisada. Ela permite compreender a relação entre capacidade produtiva, cobertura logística e recursos humanos. O volume total processado, dividido entre reaproveitamento direto (30%) e trituração (70%), demonstra a repartição entre rotas operacionais com ênfase na trituração mecânica para coprocessamento e participação relevante da destinação reuso direto que inclui práticas como recauchutagem, reaproveitamento industrial e aplicação em atividades não rodoviárias. Ambas as rotas coexistem na estrutura da unidade e respondem por diferentes estágios de reincorporação do resíduo em ciclos produtivos.

A Tabela 2 sintetiza os parâmetros operacionais críticos da unidade, articulando volume processado, cobertura logística e força de trabalho, aspectos que conferem robustez à cadeia reversa regionalizada. Esses elementos compõem uma base funcional relevante para a atuação no contexto da logística reversa.

Tabela 2 - Indicadores Operacionais da Unidade de Logística Reversa

Indicador	Valor	Observação
Volume processado mensal	500 t	Total de pneus recebidos de pontos de coleta
Volume reaproveitado	150 t (30%)	Pneus destinados a reuso direto
Volume triturado	350 t (70%)	Pneus moídos para coprocessamento e reaproveitamento
Área operacional	15.000 m ²	Espaços de recepção, triagem, moagem e armazenamento
Pontos de coleta	400+	Oficinas, frotistas, concessionárias
Colaboradores diretos	80	Equipes de operação e gestão

Fonte: Elaborada pelo Autor.

No âmbito termodinâmico, a análise exérgica permite quantificar a energia útil contida nos pneus inservíveis, distinguindo os fluxos segundo sua destinação. Estima-se que os 150

toneladas por mês (t/mês) direcionadas à rota de reuso direto preservem aproximadamente 4.500 gigajoules (GJ) de exergia, considerando um valor médio de 30 megajoules por quilograma (MJ/kg), parâmetro técnico associado a pneus automotivos ao final de sua vida útil.

Para avaliar a eficiência energética da operação, a Tabela 3 estima o volume de exergia reaproveitado em cada rota de reaproveitamento, com base em coeficientes médios aplicáveis a pneus em fim de vida útil.

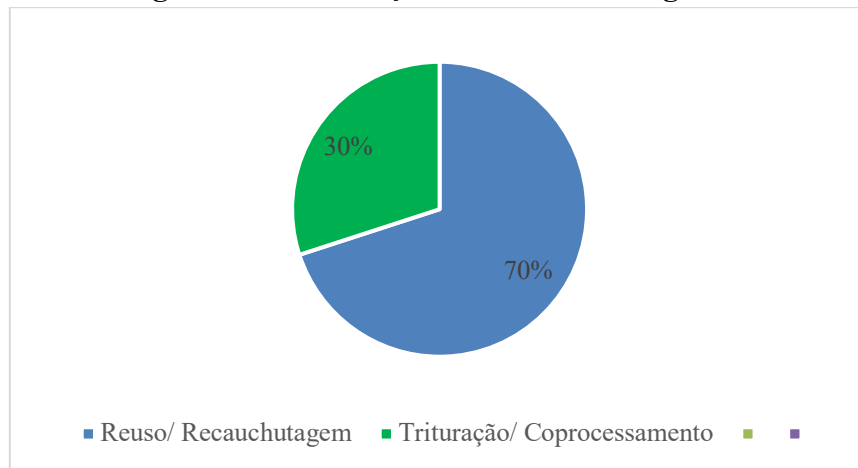
Para avaliar a eficiência energética da operação, a Tabela 3 estima o volume de exergia reaproveitado em cada rota de reaproveitamento, com base em coeficientes médios aplicáveis a pneus em fim de vida útil, a partir das rotas de reuso direto e trituração, permitindo comparar não apenas os volumes tratados, mas também o potencial de energia útil preservada em cada modalidade. A rota de reuso direto, por manter a estrutura material do pneu, apresenta menor dissipação exergética e maior eficiência termodinâmica por unidade reaproveitada. Em contrapartida, a trituração, apesar do maior volume processado, acarreta perdas irreversíveis de energia útil, conforme os princípios da segunda lei da termodinâmica.

Tabela 3 - Estimativa de Fluxo Exergético Mensal da Operação

Etapa	Volume (t/mês)	Exergia estimada (GJ/mês)	Descrição
Reuso direto	150	4.500	Conserva exergia incorporada no produto
Trituração / Coprocesso	350	10.500	Aproveitamento em processos industriais
Total	500	15.000	Exergia total reaproveitada mensalmente

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A figura 1 a seguir oferece uma representação visual comparativa entre os fluxos de exergia preservada nas duas rotas tecnológicas adotadas, destacando o peso relativo do reuso direto frente à trituração, a distribuição dos fluxos exergéticos, evidenciando o domínio da trituração em termos de volume absoluto de reaproveitamento, em contraste com o reuso, cuja menor exergia representa, entretanto, maior eficiência energética por unidade reaproveitada, com destaque quantitativo para a trituração e representação complementar do reuso direto, cuja exergia é proporcionalmente inferior, mas associada a maior conservação da integridade material dos pneus.

Figura 1 - Distribuição dos Fluxos Exergéticos

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A aplicação da abordagem emergética permite interpretar os fluxos de energia acumulada em sistemas produtivos de forma integrada, considerando todas as etapas do ciclo de vida dos pneus, desde a extração de matérias-primas até a destinação final. Com base nessa perspectiva, os resultados obtidos indicam que a energia reaproveitada mensalmente pela operação analisada atinge aproximadamente $3,0 \times 10^{17}$ sej. Esse valor foi calculado a partir da adoção de um coeficiente médio de transformidade de $6,0 \times 10^{11}$ sej por quilograma de pneu, parâmetro que representa a energia total incorporada, tanto direta quanto indiretamente, ao longo de todo o processo produtivo e logístico. A utilização desse coeficiente baseia-se nas estimativas propostas por Giannetti, Almeida, Bonilla & Silva (2013) e por Silvestrim, Rivas, Vieira & Santana (2022), cujos estudos demonstram a viabilidade do uso da energia como indicador sintético de sustentabilidade em sistemas de reciclagem e reaproveitamento de resíduos complexos.

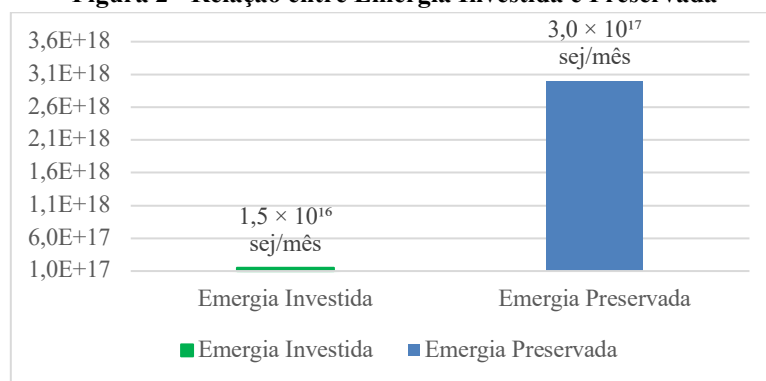
Com o objetivo de mensurar a energia total incorporada e reaproveitada na operação, a Tabela 4 apresenta os indicadores emergéticos da unidade, com base em coeficientes obtidos na literatura, para os principais indicadores emergéticos mensais da operação, permitindo quantificar a razão entre a energia preservada no fluxo de resíduos reaproveitados e a energia investida nas etapas de coleta, triagem, processamento e gestão, conforme evidenciado pelo índice EYR igual a 20, aplicados ao sistema. Essa razão revela o balanço energético interno da unidade no contexto da cadeia de pneus.

Tabela 4 - Indicadores Emergéticos da Operação

Indicador	Valor estimado	Interpretação
Energia preservada	$3,0 \times 10^{17}$ sej/mês	Energia acumulada mantida no ciclo
Energia investida	$1,5 \times 10^{16}$ sej/mês	Insumos logísticos, operacionais e estruturais
EYR	20	Alta relação entre energia preservada e energia investida
CO ₂ evitado	180 t/mês	Estimativa com base em reuso direto e substituição de combustíveis

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Esses dados revelam que a unidade consegue recuperar, por mês, uma energia vinte vezes superior à investida, o que configura uma operação energeticamente consistente sob a perspectiva energética. No entanto, a dependência de processos mecânicos intensivos na trituração exige atenção aos custos estruturais e riscos de perda de eficiência em escala. A figura 2 ilustra a relação entre os insumos energéticos aplicados e a energia reaproveitada, por meio da razão entre energia acumulada mantida no sistema e energia investida nas operações. A figura evidencia a eficiência sistêmica do modelo da unidade, destacando a predominância da energia incorporada nos materiais reaproveitados em relação aos aportes logísticos e operacionais. Essa configuração revela um ciclo energeticamente eficiente, no qual o saldo de energia é positivo sob a perspectiva da contabilidade sistêmica, uma vez que a energia acumulada nos fluxos recuperados excede substancialmente os insumos mensais requeridos para sua manutenção.

Figura 2 - Relação entre Energia Investida e Preservada

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A Tabela 5 consolida os principais indicadores mensais da unidade regional analisada, reunindo, em uma única comparação entre rotas, os dados de eficiência exergetica, desempenho



energético e emissões evitadas. Essa síntese permite visualizar, de forma integrada, os resultados operacionais e ambientais de cada alternativa de reaproveitamento.

Tabela 5 - Indicadores Consolidados da Eficiência da Unidade Regional

Indicador	Valor Total	Modalidade reuso direto	Modalidade Trituração
Volume processado (t/mês)	500	150	350
Exergia total (GJ/mês)	15.000	4.500	10.500
Emergia total (sej/mês)	$3,0 \times 10^{17}$	$9,0 \times 10^{16}$	$2,1 \times 10^{17}$
CO ₂ evitado (t/mês)	550	165	385
Exergia específica (GJ/t)	30	30	30
Emergia específica (sej/t)	$6,0 \times 10^{11}$	$6,0 \times 10^{11}$	$6,0 \times 10^{11}$

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A comparação direta mostra que, embora o reuso direto ofereça melhor conservação termodinâmica por unidade, a trituração contribui mais para resultados ambientais totais, justificando a coexistência das duas estratégias.

Para fins de contextualização setorial, a Tabela 6 apresenta uma comparação entre o desempenho da operação analisada e as metas e indicadores estabelecidos pela principal entidade nacional responsável pela logística reversa de pneus. Esse comparativo permite avaliar a aderência do modelo regional aos parâmetros institucionais vigentes.

A Tabela 6 revela que, embora em menor escala, a unidade regional apresenta estrutura organizacional consolidada, controle e integração industrial. Destaca-se a adoção de um sistema de rastreamento digital completo, que abrange todas as etapas da logística reversa, desde a coleta e o transporte até o destino final dos resíduos, por meio da geração de comprovantes digitais, georreferenciamento das rotas e registros em tempo real das quantidades movimentadas. Associada a uma operação contínua com mais de 400 pontos de coleta, essa estrutura indica um modelo organizacional regional com alto grau de rastreabilidade e controle operacional, em contraste com a parcialidade frequentemente observada em sistemas centralizados de maior escala. A elevada capilaridade logística por tonelada processada e a articulação direta com o setor industrial sugerem que arranjos descentralizados podem complementar, ou mesmo suprir, fragilidades presentes nas estruturas nacionais de logística reversa.



Tabela 6 - Comparativo com Dados Nacionais de Logística Reversa

Indicador	Unidade local	Nacional (Reciclanip, 2023)
Volume anual processado	6.000 t	418.000 t
Pontos de coleta	400+	1.400+
Destinação à indústria	Cimento, asfalto	Cimento, asfalto, siderurgia
Rastreamento digital	Total	Parcial

Fonte: Elaborada pelo Autor.

O uso integral de rastreamento digital na operação regional constitui uma vantagem tecnológica e de governança que reforça o potencial de arranjos descentralizados na contribuição ao cumprimento das metas estabelecidas pelo Acordo Setorial de Pneus. Esse instrumento normativo, firmado entre o setor empresarial e o Ministério do Meio Ambiente, estabelece diretrizes e metas para a coleta, destinação e rastreamento de pneus inservíveis em âmbito nacional (Brasil, 2010). A experiência regional analisada sugere que, quando articuladas a políticas públicas que valorizem o controle operacional, a rastreabilidade e a inserção industrial, estruturas regionais de médio porte podem oferecer suporte complementar, e em alguns contextos, estratégico, à política nacional. Adicionalmente, evidencia-se a necessidade de políticas que incentivem a territorialização da logística reversa em regiões economicamente dinâmicas, como forma de ampliar a eficácia sistêmica das ações de reaproveitamento.

A mensuração da eficiência em sistemas de logística reversa requer a utilização de indicadores que relacionem os fluxos de energia e recursos aos volumes efetivamente processados. A simples apresentação de valores absolutos em unidades como gigajoules (GJ) ou solar emjoules (sej) limita a interpretação do desempenho relativo entre as diferentes rotas de reaproveitamento.

Nesse sentido, a Tabela 7 foi elaborada para comparar a eficiência energética e emergética por tonelada de pneu processado em cada rota. Ela permite inferir quais modalidades apresentam melhor desempenho técnico-ambiental de exergia e emergia por tonelada de pneu processado, organizados segundo as rotas tecnológicas de reuso direto e trituração, além de um indicador emergético agregado do sistema como um todo. A inclusão desses parâmetros permite uma avaliação mais precisa do aproveitamento energético por unidade de massa e da eficiência sistêmica sob as perspectivas da termodinâmica e da contabilidade ambiental.



Tabela 7 - Eficiência Energética e Emergética por Modalidade de Reaproveitamento

Modalidade	Volume Processado (t/mês)	Exergia Total (GJ/mês)	Exergia Específica (GJ/t)	Energia Total (sej/mês)	Energia Específica (sej/t)	CO ₂ Evitado Estimado ¹ (t/mês)
Reuso direto	150	4.500	30	$9,0 \times 10^{16}$	$6,0 \times 10^{11}$	165
Trituração	350	10.500	30	$2,1 \times 10^{17}$	$6,0 \times 10^{11}$	385
Total	500	15.000	—	$3,0 \times 10^{17}$	$6,0 \times 10^{11}$	550

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Embora os indicadores específicos sejam equivalentes entre as rotas, a trituração destaca-se pelo impacto ambiental absoluto mais expressivo, evidenciado pelo maior volume de emissões de CO₂ evitadas. Em contrapartida, a rota de reuso direto preserva a integridade estrutural dos materiais, favorecendo ciclos de circularidade com menor degradação entrópica, o que representa um aproveitamento energético menos dissipativo e mais alinhado aos princípios da economia circular.

A exergia foi calculada com base no coeficiente médio de 30 MJ/kg, aplicável a pneus em fim de vida útil. A energia foi estimada por meio de coeficiente de transformidade de $6,0 \times 10^{11}$ sej/kg, segundo parâmetros estabelecidos por Giannetti, Almeida, Bonilla e Silva (2013) e Silvestrim, Rivas, Vieira e Santana (2022). O volume de dióxido de carbono evitado considera média de 1,1 t CO₂/t de pneu reaproveitado, com base em estimativas comparativas com destinação em aterro ou incineração sem recuperação energética.

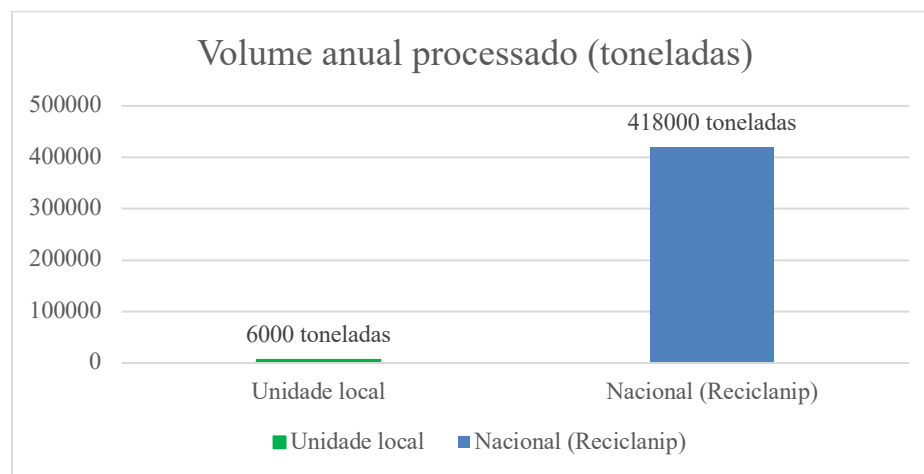
Os dados apresentados indicam uma distribuição equilibrada da eficiência exergética entre as duas modalidades de reaproveitamento, com 30 GJ de exergia preservada por tonelada em ambas as rotas. Isso se justifica pelo uso de um coeficiente unificado para pneus em fim de vida útil. No entanto, sob a ótica emergética, observa-se equilíbrio na energia específica entre as rotas, mantendo-se constante em $6,0 \times 10^{11}$ sej/t.

Apesar da aparente uniformidade nos índices específicos, a rota de trituração apresenta maior volume processado e, por conseguinte, maior contribuição ambiental mensurável em termos absolutos, incluindo a maior quantidade de CO₂ evitada. Por outro lado, a rota de reuso direto conserva maior integridade material do pneu, resultando em menores perdas exergéticas dos pneus, implicando em menores perdas termodinâmicas no ciclo de reaproveitamento.

Os resultados obtidos indicam que a análise integrada de exergia e emergia proporciona uma avaliação da sustentabilidade operacional das rotas estudadas. A aplicação de indicadores específicos, como gigajoules por tonelada (GJ/t) e *solar emergy* joules por tonelada (sej/t), revela-se essencial tanto para a comparação técnica entre alternativas quanto para a formulação de estratégias otimizadas de reaproveitamento.

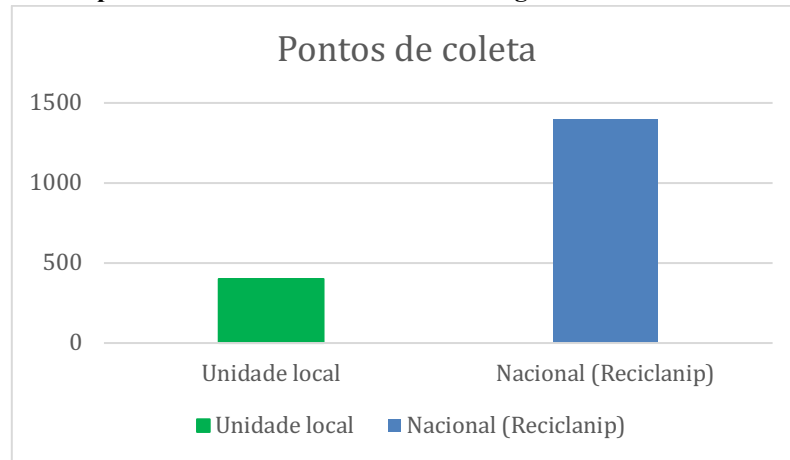
As figuras 3 e 4 comparam, respectivamente, o volume anual processado e o número de pontos de coleta da unidade regional em relação ao desempenho nacional. Essa visualização facilita a compreensão da densidade operacional local e seu papel na complementação de sistemas logísticos centralizados.

Figura 3 - Comparativo com Dados Nacionais de Logística Reversa- Volume anual processado



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 4 - Comparativo com Dados Nacionais de Logística Reversa- Pontos de Coleta



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Assim, os resultados obtidos demonstram a estrutura e os fluxos que sustentam a logística reversa da unidade estudada, caracterizados por diferentes rotas operacionais, com aproveitamento energético parcial e reinserção de resíduos em cadeias produtivas industriais regionais. Os fluxos apresentados revelam a viabilidade de arranjos operacionais regionais com estrutura para aferição contínua de indicadores técnicos e ambientais, viabilizando seu uso como referência em estudos comparativos e políticas públicas de logística reversa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada descreve um arranjo técnico-operacional voltado à logística reversa de pneus inservíveis, com ênfase em múltiplas rotas de reaproveitamento que articulam diferentes escalas regionais e rotas múltiplas de reinserção de resíduos na cadeia produtiva. A partir da articulação entre reuso direto e trituração para coprocessamento, se constata uma estrutura operacional capaz de combinar escala e qualidade, com desempenho tecnicamente consistente tanto em métricas energéticas quanto em indicadores ambientais e sociais.

Do ponto de vista exergético a comparação com os dados nacionais reforça o papel potencialmente replicável da unidade regional no contexto da circularidade aplicada. Mesmo operando em escala significativamente menor, a unidade demonstra capacidade de rastreamento total dos fluxos, integração com diferentes setores da indústria e capilaridade logística



considerável, atributos que, quando presentes de forma combinada, ampliam o potencial de desempenho técnico-ambiental das operações regionais de logística reversa, embora ainda sejam pouco frequentes no cenário nacional.

Não obstante os avanços evidenciados, o modelo enfrenta entraves estruturais que comprometem sua escalabilidade e perenidade, exigindo políticas públicas que internalizem os ganhos socioambientais da circularidade. A assimetria concorrencial com atores informais, os custos logísticos e a limitada valorização financeira dos materiais reaproveitados comprometem a estabilidade de longo prazo. Adicionalmente, a ausência de incentivos diretos à circularidade por parte do Estado dificulta a internalização das externalidades positivas geradas por tais sistemas.

Recomenda-se, portanto, o aprofundamento de estudos que integrem análise de ciclo de vida, contabilidade ambiental e modelagem multicritério para avaliação sistêmica dessas unidades, bem como o acompanhamento longitudinal de indicadores emergéticos e exergéticos. Tais iniciativas podem fortalecer as bases científicas para políticas públicas mais eficazes e para a consolidação de economias circulares regionais em países em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

Agostinho, F., & Siche, R. (2014). Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as a case study. *Biomass & Bioenergy*, 71, 69–83.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.024>

Ballou, R. H. (1993). *Business logistics management: Planning, organizing, and controlling the supply chain* (3rd ed.). Prentice Hall.

Bardin, L. (2015). *Análise de conteúdo*. Edições 70.

Bejan, A. (2016). *Advanced engineering thermodynamics* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Bertaglia, P. R. (2020). *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos* (4ª ed.). Saraiva Educação.

Bocken, N. M. P., & Konietzko, J. (2022). Circular business model experimentation: Process and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132300.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132300>



Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Bixby Cooper, M. (2023). *Supply chain logistics management* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Brasil. (2010). *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm

Brown, M. T., & Ulgiati, S. (1997). Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering*, 9(1–2), 51–69. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5)

Cellard, A. (2014). A análise documental. In J. Poupart, L.-H. Groulx, J.-P. Deslauriers, A. Laperrière, R. Mayer & A. Pires (Eds.), *A pesquisa qualitativa: Enfoques epistemológicos e metodológicos* (pp. 295–316). Vozes.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Professional.

Christopher, M. (2018). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson Education.

Denzin, N. K. (2018). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods* (4th ed.). Routledge.

Dincer, I., & Rosen, M. A. (2020). *Exergy: Energy, environment and sustainable development*. Elsevier Science.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://ellenmacarthurfoundation.org>

Freitas, F. C. H. P., Araújo, E. T., Oliveira, R. T. D., & Amorim, R. M. (2023). A nova política nacional de economia circular e a proteção e inclusão de catadores(as) de resíduos no Brasil. *ENEPCP*. <https://anepecp.org/ojs/index.php/br/article/view/335>

Flick, U. (2009). *Introdução à pesquisa qualitativa* (3ª ed.). Artmed.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Giannetti, B. F., Almeida, C. M. V. B., Bonilla, S. H., & Silva, W. F. (2013). Emergy accounting for a recycling cooperative: A case study in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 47, 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.036>



- Giannetti, B. F., Barrella, F. A., Bonilla, S. H., & Almeida, C. M. V. B. (2006). Emergy assessment of integrated crop–livestock systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 14(2), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.05.009>
- Gil, A. C. (2017). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (7ª ed.). Atlas.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Gutberlet, J., & Careno, S. (2020). Waste pickers at the heart of the circular economy: A perspective of inclusive recycling from the Global South. *Worldwide Waste: Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(1), 6, 1–14. <https://doi.org/10.5334/wwwj.50>
- Kılıkış, Ş., & Kılıkış, B. (2017). Integrated circular economy and education model to address aspects of an energy-water-food nexus in a dairy facility and local contexts. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1084–1098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.178>
- Kirchherr, J., Yang, Y., Schulze-Spüntrup, M., Heerink, N., & Hartley, K. (2023). Circular economy implementation: Barriers and enablers from a systems perspective. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137288>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Lakatos, E. M., & Marconi, M. A. (2021). *Fundamentos de metodologia científica* (8ª ed.). Atlas.
- Leite, P. R. (2017). *Logística reversa: Meio ambiente e competitividade* (2ª ed.). Pearson.
- Ludovisi, A., Pandolfi, P., & Taticchi, M. I. (2005). The strategy of ecosystem development: specific dissipation as an indicator of ecosystem maturity. *Journal of Theoretical Biology*, 235(1), 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2004.12.017>
- Minayo, M. C. S. (2014). *O desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde* (14ª ed.). Hucitec.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2020). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Munaro, M. R. & Tavares, S. A. (2022). A economia circular na construção civil brasileira: Desafios para a implementação de políticas públicas. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 14(e0290), 1–19. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e0290>



Novaes, A. G. (2021). *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição* (4ª ed.). Campus Elsevier.

Odum, H. T. (1996). *Environmental accounting: Energy and environmental decision making*. John Wiley & Sons.

Pozo, H. (2016). *Administração de logística integrada: Cadeia de suprimentos* (4ª ed.). Atlas.

Reciclanip. (2023). *Destinação de pneus inservíveis*. Recuperado em 31 de julho de 2025, de <https://www.reciclanip.org.br/destinados/>

Sciubba, E., & Ulgiati, S. (2005). Energy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? *Energy (Oxford, England)*, 30(10), 1953–1988. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.003>

Silva, R. R., Ribeiro, D. D., Mello, G. N., & Domingos, J. (2022). Limites estruturais da economia circular no Brasil: Um olhar sobre as cooperativas de catadores. *Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 56, 150–174. <https://doi.org/10.5380/dma.v56i0.79913>

Silvestrim, A., Rivas, A. L., Vieira, E. V., & Santana, M. L. (2022). Avaliação emergética em cooperativas de reciclagem: Sustentabilidade, inclusão e eficiência. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 14(e0293), 1–15. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014.e0293>

Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. SAGE Publications.

Ulgiati, S., & Brown, M. T. (1998). Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 108(1–3), 23–36. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00020-6)

Wall, G. (1977). *Exergy - a useful concept within resource accounting*. <https://www.semanticscholar.org/paper/4d4eccdb3d9820e4499c856b5abfd828036d33>

Wall, G. (1987). Exergy conversion in the Swedish society. *Resources and Energy*, 9(1), 55–73. [https://doi.org/10.1016/0165-0572\(87\)90023-5](https://doi.org/10.1016/0165-0572(87)90023-5)

Wall, G. (1988). Exergy flows in industrial processes. *Energy (Oxford, England)*, 13(2), 197–208. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(88\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(88)90046-1)

Yin, R. K. (2018). *Estudo de caso: Planejamento e métodos* (5ª ed.). Bookman.

Zhang, B., Jin, P., Qiao, H., Hayat, T., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2019). Exergy analysis of Chinese agriculture. *Ecological Indicators*, 105, 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.054>