

# **Uma abordagem da dinâmica de sistemas aplicada na cadeia de valor dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil**

## **A system dynamics approach applied to the electro-electronic waste value chain in Brazil**

**Emmanuelle Soares de Carvalho Freitas**

Bolsista PCI, Administradora, DSc.

**Lúcia Helena Xavier**

Supervisora, Bióloga, DSc.

efreitas@cetem.gov.br

### **Resumo**

A cadeia de suprimentos reversa envolve a reutilização e reciclagem de produtos, componentes e materiais. A mineração urbana desempenha um papel crucial na recuperação de valor por meio de soluções circulares para o processamento de materiais secundários. No entanto, a complexidade desses sistemas e suas interações apresentam desafios para a eficácia dos processos de mineração urbana. Este estudo sugere o uso de dinâmicas de sistema como ferramenta para analisar e entender esses processos, com foco na gestão de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) em Desuso, considerando modelos de negócios. A "zona de transição", que se encontra na interseção de diferentes ambientes (futuro e passado), pode ser um ponto de partida ou um retrocesso. Os resultados da pesquisa destacam que os recursos obtidos de REEE estão sujeitos a níveis variados de regulação, o que impacta o movimento de resíduos entre fronteiras. Quanto aos modelos de negócios, existem abordagens para preparação para reutilização e reciclagem, embora em diferentes níveis de maturidade. As descobertas oferecem recomendações preliminares para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias operacionais que promovam a circularidade na gestão de resíduos, incluindo a simplificação das regulamentações transfronteiriças e o aprimoramento de modelos de negócios para aumentar a eficiência da gestão de REEE no contexto da mineração urbana.

Palavras-chave: Palavras-chave: Mineração Urbana; Material Secundário; REEE; Dinâmica de Sistemas.

### **Abstract**

The reverse supply chain involves the reuse and recycling of products, components and materials. Urban mining plays a crucial role in recovering value through circular solutions for the processing of secondary materials. However, the complexity of these systems and their interactions pose challenges for the effectiveness of urban mining processes. This study suggests the use of system dynamics as a tool to analyze and understand these processes, focused on the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), considering business models approach. The "transition zone", which lies on the intersection of different periods of time (future and past), can be a starting point or a step back. The research

results highlight those resources obtained from WEEE depend on the regulation levels, which impacts the waste movement across borders. As for business models, approaches to preparing for reuse and recycling exist, although at different levels of maturity. The findings provide preliminary recommendations for developing public policies and operational strategies that promote circularity in waste management, including simplifying cross-border regulations and improving business models to increase the efficiency of WEEE management in the context of urban mining.

Keywords: Keywords: Urban Mining; Secondary Material; WEEE; System Dynamics.

## 1. Introdução

No Brasil, o consumo crescente de produtos eletrônicos gera aproximadamente 2,4 bilhões de kg de resíduos anualmente, tornando o país o maior gerador da América do Sul (Baldé *et al.*, 2024). O Brasil é o segundo maior gerador de resíduos eletroeletrônico nas Américas, com 2,4 Mt, representando 16,6% do total de REEE gerado no continente. A maioria dos países da América Latina, como a Venezuela e o Paraguai, não possuem regulamentação sobre REEE (Baldé *et al.*, 2024). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi estabelecida em 2010 pela Lei nº 12.305 e regulamentada em 2022 pelo Decreto nº 10.936, que introduziu o fluxo de REEE e estabeleceu metas para recuperação e descarte sob um modelo de responsabilidade compartilhada. A gestão ambientalmente adequada desse tipo de resíduo enfrenta desafios devido às dimensões geográficas do Brasil e ao nível de comprometimento do setor informal nas atividades de coleta e reciclagem.

A transição para uma economia circular é essencial para atingir objetivos econômicos e ambientais, substituindo o modelo linear de "produzir-usar-descartar" por sistemas que reintegram resíduos ao ciclo produtivo (Ilankoon *et al.*, 2018). A mineração urbana (MU), que se refere à recuperação de materiais e recursos valiosos a partir de produtos e resíduos que já foram descartados ou estão em desuso nas áreas urbanas, como uma ferramenta da economia circular, possibilita a recirculação de materiais a partir de diversos fluxos produtivos, passa a ser uma abordagem promissora nesse contexto (Arora *et al.*, 2017; Xavier *et al.*, 2021).

Desta forma, o conceito de recurso secundário é introduzido, onde materiais reciclados são processados com base em seu potencial de utilização, e tecnologias como remanufatura e reciclagem são fundamentais para reintegrar esses materiais nas cadeias de produção. Essa transformação dos resíduos ao final de sua vida útil representa um valor agregado e é um desafio a falta de conscientização sobre o valor econômico potencial desses produtos pós-consumo. E a viabilidade de recuperar materiais secundários a partir dos princípios de economia circular e práticas de mineração urbana passa a ser uma alternativa possível.

Os parâmetros dos R's (Reike *et al.*, 2018) oferece uma abordagem estruturada para gerenciar REEE, defendendo estratégias como Recusar, Repensar, Reduzir, Reutilizar, Reparar, Recondicionar,

Remanufaturar, Reaproveitar, Reciclar e Remineralizar. Para lidar com as complexidades desses sistemas, ferramentas como Dinâmica de Sistemas (DS) que é uma ferramenta poderosa para entender e otimizar a MU de REEE, ajudando a identificar interações complexas e feedbacks entre diferentes elementos do sistema são essenciais para analisar dados e apoiar a tomada de decisões por meio de percepções abrangentes sobre as interações da cadeia de valor.

## **2. Objetivo**

Este artigo analisa a cadeia de valor de REEE, focando na recuperação de materiais secundários, integrando princípios de economia circular e dinâmicas de sistemas, por meio de um ciclo fechado que converte REEE em insumos viáveis para a produção, promovendo a recuperação de valor e favorecendo a reutilização de materiais.

## **3. Metodologia**

O processo metodológico deste estudo envolveu várias etapas dinâmicas. Na primeira fase, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para consolidar aspectos relacionados à utilização de materiais secundários em ambientes produtivos. Em seguida, foi construído um modelo integrativo baseado nos princípios da economia circular, visando facilitar o desenvolvimento de um modelo causal utilizando dinâmica de sistemas. Para isso, utilizamos o software Vensim PLE, que permitiu a criação de modelos com funções como estoques, fluxos e variáveis, proporcionando uma visualização clara das relações entre os elementos do sistema estudado. O desenvolvimento do modelo causal seguiu etapas que incluíram a identificação de variáveis e componentes na gestão dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), o estabelecimento de relações causais, a modelagem de laços de feedback e a validação do modelo, assegurando sua precisão em refletir as dinâmicas do sistema.

O modelamento aqui empregado é do tipo “*Soft*”, que proporciona informações qualitativas. A etapa final incluiu a interpretação dos resultados e a elaboração de conclusões. Com base nas informações analisadas, foi desenvolvida uma estrutura circular que possibilita a valorização de matérias-primas derivadas de REEE.

## **4. Resultados e Discussão**

Neste caso, a dinâmica de sistemas ajudou a identificar interações complexas e feedbacks entre diferentes elementos do sistema, uma vez que a dinâmica de sistemas permite modelar as interações entre diferentes componentes, como a geração de resíduos, as taxas de coleta e reciclagem, e a demanda por materiais recuperados, ajudando a visualizar como mudanças em uma parte do sistema podem afetar o todo.

O modelo de gestão de REEE proposto integra estratégias que fecham ciclos, seguindo o conceito de economia circular. Esse modelo, composto por dois módulos—mineração urbana e economia circular—ilustra como os princípios da EC se aplicam à cadeia de valor dos resíduos eletrônicos e orienta a implementação de estratégias circulares (Figura 1). O aproveitamento de materiais secundários depende do volume coletado

e da especialização de novos modelos de negócios, além da maturidade do quadro regulatório. A gestão de REEE é um sistema complexo que envolve interações e feedbacks entre população, produção e consumo. A transição para o pensamento sistêmico, ou zona de transição (ZT), é vista como uma mudança fundamental na gestão deste resíduo.

O diagrama de loop causal (Figura 1) ajuda a identificar fatores que influenciam o descarte inadequado e a reciclagem. Os parâmetros utilizados por Reike *et al.* (2018), mencionados na página 2, serviram como base para desenvolver o modelo causal de dinâmica de sistemas, que incluem processos de feedback (Sterman *et al.*, 2015).



De acordo com Senge (2002), existem diferentes tipos de sistemas, e este artigo se concentra no tipo "limites ao crescimento", que inclui loops de reforço e equilíbrio. O modelo identifica treze loops, mostrando como a disponibilidade de matérias-primas e a produção afetam a quantidade de resíduos gerados e sua gestão. O aumento na produção de equipamentos leva a um maior volume de produtos nas mãos dos consumidores, que, por sua vez, resulta em mais resíduos, tanto pela obsolescência programada quanto pela mudança nos padrões de consumo que gera uma obsolescência perceptiva, onde o consumidor cria um ideia de que o produto está ultrapassado, gerando defeitos ou diminuindo a vida útil do produto (loops R1/B1).

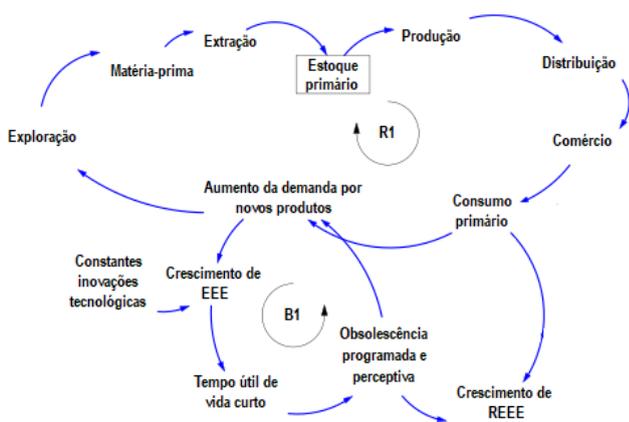


Figura 2: Diagrama de loop causal R1/B1.

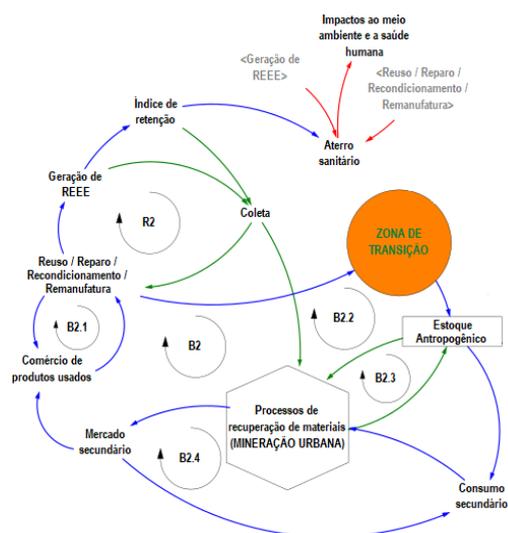


Figura 3: Diagrama de loop causal R2/B2/B2.1.

Na análise de Cucchiella et al. (2015), a geração de resíduos cresce entre 3% e 5% anualmente, com apenas 3% dos resíduos eletroeletrônicos sendo reciclados em 2019 (UN, 2019). Na Figura 2, o loop R2 destaca que o aumento dos resíduos resulta em maior quantidade de REEE destinados de forma inadequada, enquanto os loops B2, B2.1, B2.2 e B2.3 mostram que a valorização dos resíduos (Mineração Urbana) pode colaborar para a aceitabilidade de reprodutos, viabilizando e beneficiando o mercado secundário (produtos usados).

A Figura 3 apresenta a zona de transição, que é uma área que fica na intersecção entre diferentes ambientes (futuro e passado), pode ser um ponto de partida ou um retrocesso. (loop R3/B3, B3.1, B3.2 e B3.3), contribuindo para novas rotas de circularidade por meio da reintegração desses recursos dentro de novas cadeias produtivas, possibilitando o desenvolvimento de novos modelos de negócios, que geram oportunidades de emprego e expansão do mercado, reforçando a valorização dos materiais secundários. Além disso, pode ser crucial para viabilizar incentivos que colaborem para melhorias e/ou atualizações das regulamentações para o setor.

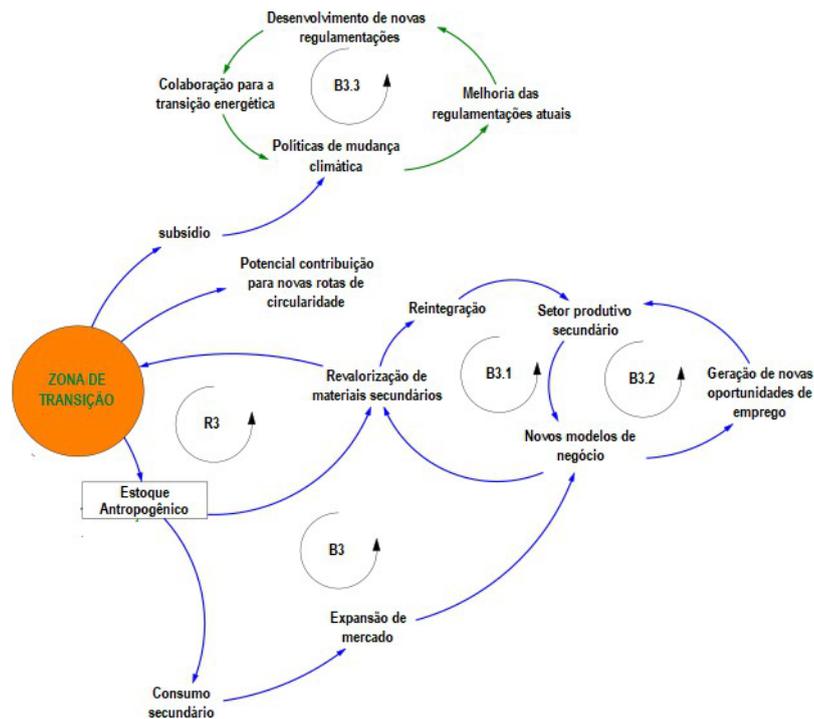


Figura 4: Diagrama causal do loop R3/B3, B3.1, B3.2 e B3.3.

A adoção de estratégias circulares é motivada por um conjunto de fatores interdependentes, tais como: regulamentações específicas, incentivos fiscais e inovações tecnológicas. Essas diretrizes e ferramentas são fundamentais para prolongar a vida útil dos produtos, permitindo não apenas o fechamento adequado dos ciclos de materiais, mas também a manutenção dos produtos e recursos em seu máximo potencial de utilidade. Ao criar um ambiente favorável a essas práticas, é possível transformar a economia linear em um modelo mais sustentável e regenerativo, promovendo a eficiência no uso de recursos.

## 5. Conclusão

Os recursos recuperados de REEE estão sob diferentes níveis de regulamentação. Dessa forma, é possível perceber que a exploração urbana de matérias-primas secundárias requer o estabelecimento de Leis, Normas e Decretos para a regulamentação e valorização desses recursos na cadeia produtiva, possibilitando a formação de novos negócios.

A cadeia de valor dos resíduos eletroeletrônicos envolve todas as etapas do ciclo de vida desses materiais, desde a sua geração até a destinação final e cada etapa da cadeia é essencial para maximizar a recuperação de recursos e minimizar os impactos ambientais. Desta forma, a gestão adequada deste tipo de resíduo pode facilitar a criação de marcos regulatórios para a recuperação de materiais, promovendo a mineração urbana como uma fonte valiosa de recursos secundários, desde que existam dados detalhados sobre sua localização, tamanho, concentração e materiais a serem prospectados.

Assim, a elaboração de normas específicas que integrem os princípios da economia circular e considerem

atividades da mineração urbana e identifiquem que diferentes políticas de incentivo (como subsídios para a reciclagem ou campanhas de conscientização) afetam a cadeia de valor, ajudam a formular políticas mais eficazes que ajudem a identificar os fatores que influenciam a coleta de resíduos eletroeletrônicos, possibilitando estratégias mais eficazes resultar em uma gestão mais eficaz, sustentável e integrada.

## 6. Agradecimentos

Agradeço ao grupo R3minare pelo companheirismo. Ao CNPq, pelo apoio financeiro em forma de concessão de bolsa (301999/2023-6) e ao CETEM pelo apoio tecnológico.

## 7. Referências Bibliográficas

ARORA, R., PATEROK, K., BANERJEE, A., SALUJA, M.S., 2017. **Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities**. IIMB Manag. Rev. 29, 210-224. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2017.06.001>.

BALDE, C.P., *et al.*, **The Global E-Waste Monitor 2024. Quantities, Flows, and the Circular Economy Potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – cohosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305/10. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 2010 b. Brasília. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm).

BRASIL. Decreto nº 10.240/20. **Implementação de sistema de logística reversa de produtos eletrônicos e seus componentes para uso doméstico**. Brasília [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm).

REIKE, D., VERMEULEN, W.J.V. & WITJES, S. (2018): **The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0?**

- **Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options**, Resources, Conservation and Recycling, 135, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>

SENGE, P. M. **The Fifth Discipline: Art and Practice of the Learning Organization**. 13a ed. São Paulo: Best Seller, 2002.

STERMAN, J. D. *et al.*, **System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management**. Journal of Operations Management, 2015.

UNITED NATIONS, 2019. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>

XAVIER, L.H., OTTONI, M., LEPAWSKY, J., Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks, Journal of Cleaner Production, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126570>.