

# **A importância da mineração urbana para a gestão adequada dos resíduos eletroeletrônicos (REEE): proposta de um diagrama causal considerando a integração dos agentes e da cadeia de valor**

## **The importance of urban mining for the adequate management of electro-electronic waste (WEEE): proposal for a causal diagram considering the integration of agents and the value chain**

**Emmanuelle Soares de Carvalho Freitas**  
Bolsista PCI, Administradora, DSc.

**Lúcia Helena Xavier**  
Supervisora, Bióloga, DSc.

### **RESUMO**

O crescimento populacional e respectivo consumo de bens manufaturados resulta em um considerável aumento nas quantidades de resíduos gerados. As inovações tecnológicas, por sua vez, resultam na geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE), estimada em cerca de 50 milhões de toneladas anuais em todo o mundo. Assim, a recuperação de materiais a partir de fontes secundárias pode representar uma solução para a gestão deste tipo de resíduo. A falta de gestão deste tipo de resíduo gera uma série de problemas ambientais, sociais e econômicos. Nesse contexto, a mineração urbana passa a ser um instrumento da economia circular com a recuperação de materiais de fontes secundárias provenientes dos REEE. Desta forma, Este estudo propõe a elaboração de um diagrama causal, baseado em dinâmica de sistemas, considerando modelos de negócios e estruturas regulatórias, obtendo uma visão sistêmica dos fatores que interferem (positiva e negativamente) a cadeia de gestão integrada dos REEE. Os resultados obtidos por meio deste modelo, indicam que esses resíduos, sendo reintegrados em novos ciclos produtivos, contribuem para reduzir a dependência da extração de recursos naturais e, ao mesmo tempo, possibilitam a mitigação de impactos e contribuem, em alguns casos, para evitar o risco de suprimento.

**Palavras-chave:** Mineração urbana; economia circular; resíduos eletroeletrônicos; dinâmica de sistemas.

## 1. Introdução

O rápido crescimento populacional atrelado as altas taxas de consumo da população impulsionaram a produção de novos produtos nos últimos anos, incluindo os produtos eletrônicos. Logo, a geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE) cresce de forma acelerada com um aumento de uma taxa de 3% a 5% ao ano (CUCCHIELLA et al, 2015). Assim, demandando soluções que estejam associadas ao compromisso de sustentabilidade do país, impulsionando a necessidade de ações que possam equilibrar o crescimento econômico, inovação e sustentabilidade ambiental.

Atualmente, os esforços para desenvolver produtos e serviços mais sustentáveis e eficientes, com impactos ambientais reduzidos, são questões que motivam a necessidade de minimizar o desperdício e ainda alcançar objetivos econômicos e ambientais. Portanto, é fundamental a transição de uma economia linear para uma economia circular, colocando uma visão estratégica sobre o reaproveitamento dos resíduos, princípio básico para prolongar a vida útil dos produtos

A inserção de resíduos como materiais secundários em diferentes cadeias produtivas é um assunto relativamente recente e pode ser viabilizado por meio de ferramentas, tais como a mineração urbana (MU), que pode corroborar para a consolidação da economia circular em âmbito nacional. A MU tem sido estudada a partir da recuperação de diversos fluxos de materiais, provenientes, por exemplo, de aterros sanitários, construção e demolição (estoques de construção), resíduos eletroeletrônicos, veículos em fim de vida e resíduos sólidos (ARORA et al., 2017).

Destarte, a economia circular (EC) e a mineração urbana de resíduos eletroeletrônicos passam a ser uma abordagem inovadora para reduzir o impacto ambiental da eliminação deste tipo de resíduo. A economia circular pode contribuir para a transformação de resíduos em insumos produtivos, podendo possibilitar a reinserção destes resíduos dentro de novas cadeias produtivas, verificando as possíveis mitigações de impactos negativos que esses resíduos trazem ao meio ambiente e a saúde humana em decorrência da inadequada destinação (WEETMAN, 2019).

Verifica-se, portanto, a inevitabilidade da transição de uma economia que apresenta um modelo tradicional (linear) seguindo um determinado padrão “*produzir – usar - descartar*”, que se baseia no uso de fontes não renováveis e finitas, com descarte de forma inapropriada para uma economia circular, que por sua vez pressupõe sistemas regenerativos, restaurativos e circulares (EMF, 2013) (Figura 1).

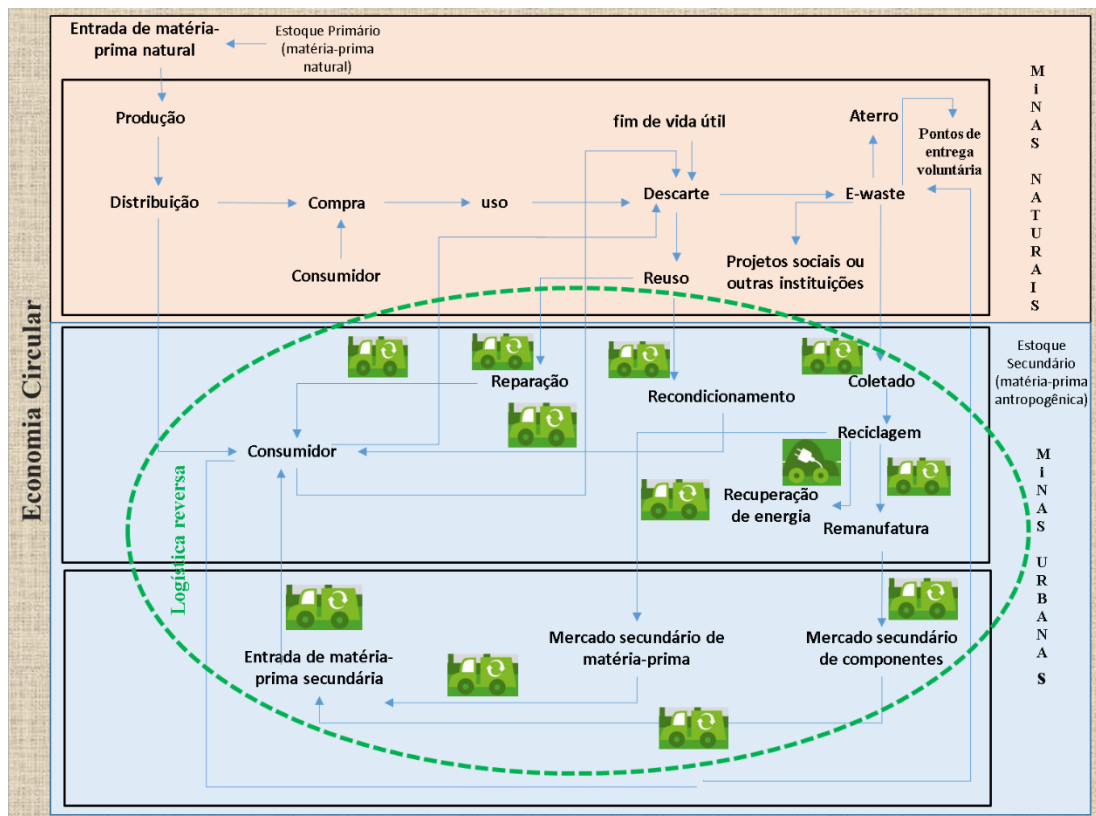


Figura 1: Esquema simplificado do processo linear e do processo circular

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

Alguns países desenvolveram legislações e normas específicas para o gerenciamento de resíduos, dentre os quais se destacam: o Brasil, com a Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define, em seu artigo 7º, a ordem de prioridade na gestão dos resíduos no país da seguinte forma: não geração, redução, reaproveitamento, reciclagem e tratamento de resíduos, bem como a sua disposição (BRASIL, 2010).

Sendo assim, que a exploração de matérias-primas secundárias requer o estabelecimento de Leis, Normas e Decretos específicos para a gestão do REEE na cadeia produtiva, possibilitando a formação de novos negócios e incorporando os princípios da economia circular e incluindo atividades de mineração urbana, motivando um amplo esforço envolvendo cooperação de diversos setores, em nível macro (cidades e países, envolvendo políticas nacional, regional e municipal) e micro (organizações, consumidores, produtos) (GUARNIERI, 2020).

## 2. Objetivo

O objetivo do presente artigo é mostrar a importância da mineração urbana para a gestão adequada dos resíduos eletroeletrônicos (REEE), sob a ótica da EC, por meio de uma abordagem orientada pelo uso de um modelo estruturado e causal de dinâmica de sistemas, apresentando uma possível solução para a circularidade dos resíduos eletroeletrônicos, coordenando sistemas de produção e consumo em circuitos fechados.

### 3. Metodologia

Este estudo consiste em abordagem exploratória e descritiva com proposição de um diagrama conceitual, propondo uma estruturação da mineração urbana de REEE, por meio de um modelo integrativo baseado nos princípios da economia circular. Deste modo, torna-se possível o estabelecimento de novos mercados, por meio da sinergia entre as indústrias (recicladoras e produtoras) e do compartilhamento dos produtos/resíduos, realizando um intercâmbio de materiais secundários para serem usados como insumos produtivos, estruturando um ciclo fechado de produção, considerando modelos de negócios e estruturas regulatórias, obtendo uma visão sistêmica dos fatores que interferem (positiva e negativamente) a cadeia de gestão integrada dos REEE.

Como proposta metodológica foi utilizado o modelo conceitual como suporte para a dinâmica de sistemas (DS) para a identificação dos fatores que exercem influência sobre a gestão de resíduos eletroeletrônicos. Para isto, foi necessário estabelecer os seguintes passos:

- Estudo exploratório e descritivo, elaborado a partir de informações relevantes sobre o estudo;
- Construção de um modelo de loop causal (ciclo fechado), seguindo os princípios da EC para maximizar a circularidade dos materiais e que represente a situação a ser estudada, utilizando o *software* Vensim PLE.

O modelo conceitual de DS estabelece uma ligação entre as variáveis que serão analisadas e qualquer alteração em uma dessas variáveis afeta uma ou mais variáveis, através de seus fluxos de forma dinâmica. Dentro do DS, existem processos de feedback, onde cada ação produz uma reação no sistema, alterando o estado deste sistema (STERMAN et al., 2015).

A modelagem por meio da dinâmica de sistemas é uma ferramenta capaz de compreender as interações complexas dentro de uma economia circular, possibilitando simular diferentes cenários e prever os impactos de diversas intervenções. Para o desenvolvimento da elaboração do modelo causal é necessário definir algumas etapas, como: a identificação dos agentes, a estruturação das relações entre os agentes, identificação dos fatores que influenciam o sistema e a coleta de dados. Ao modelar os fluxos de materiais e recursos, podemos identificar potenciais ineficiências e conceber sistemas circulares mais eficazes.

DS permite analisar cadeias de eventos circulares (loops) por meio de diferentes tipos de diagramas e a partir dele é possível expressar graficamente um sistema, por meio do uso de *software*, possibilitando a visualização do comportamento e dinâmica das relações de um sistema e suas variáveis. Pensar na cadeia de resíduos eletroeletrônicos trata-se de um novo modelo de sistema que se retroalimenta em uma economia circular, contribuindo para ações que tornem a gestão deste tipo de resíduo mais eficientes. Portanto, para lidar com todas as etapas que constituem a cadeia de resíduos eletroeletrônicos, torna-se necessário um modelo que compreenda toda a sua dinâmica e que auxilie na tomada de decisão. Assim, a escolha da dinâmica de sistemas como parte da metodologia deste estudo se deu pela possibilidade de analisar a dinâmica de funcionamento dos elos que envolvem esta cadeia por meio de análises qualitativas (através do diagrama de causa e efeito) sob a ótica dos princípios da economia circular. Vale ressaltar que a metodologia de dinâmica de sistemas permite a

simulação e criação de cenários que possibilitam a prospecção e antecipação de futuros desejados. Esses diagramas circulares de loop de causa e efeito (retroalimentação) permitem analisar as relações entre as variáveis de um sistema enquanto os modelos de estoque e fluxo representam, quantitativamente, a relação de causa e efeito (FREITAS et al., 2022).

#### **4. Resultados e Discussão**

A inserção de matérias-primas secundárias, como solução alternativa para a os resíduos eletroeletrônicos, pode ser parte importante da futura conjuntura do desenvolvimento sustentável em âmbito nacional, uma vez que com os dados dos fatores estudados, foi possível verificar que a econômica circular pode apresentar benefícios ambientais imensuráveis, visto que pode colaborar para a gestão adequada dos resíduos eletroeletrônicos e minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte incorreto.

Assim como a economia circular, a mineração urbana, sendo uma ferramenta da EC, também se baseia nos princípios de eliminar resíduos e poluição, manter produtos e materiais em uso e regenerar sistemas naturais. Assim, as cadeias de valor circulares envolvem um ciclo contínuo de produção, consumo e descarte, com resíduos sendo reutilizados como insumos para novos produtos (WEETMAN, 2019).

Em relação ao modelo desenvolvido e as variáveis apresentadas, estas proporcionam diversas interpretações, contudo, para análise foram apresentadas no modelo de loop causal, as variáveis que apresentam maior relevância com o objetivo deste artigo (Figura 2).

No modelo proposto é possível identificar os fluxos e estoques relacionados à gestão dos REEE no Brasil. Tanto as alternativas de reuso, acondicionamento e reparo, quanto as soluções de reciclagem contribuem para a redução da pressão pela extração de recursos naturais. Em algumas alternativas se prioriza o aumento da vida útil, enquanto a reciclagem busca a recuperação de materiais secundários, mitigando o impacto de potenciais materiais perigosos.

Os REEE possuem tanto materiais valiosos como ouro, prata, paládio e platina, como também substâncias perigosas como cromo, chumbo, mercúrio e cádmio.

Os processos representados no diagrama causal representam um ponto importante no embasamento para a proposta de gestão dos resíduos eletroeletrônicos, possibilitando uma visão sistêmica de todo o processo, trazendo compreensão sobre todos os elos envolvidos na cadeia de gestão dos resíduos eletroeletrônicos.

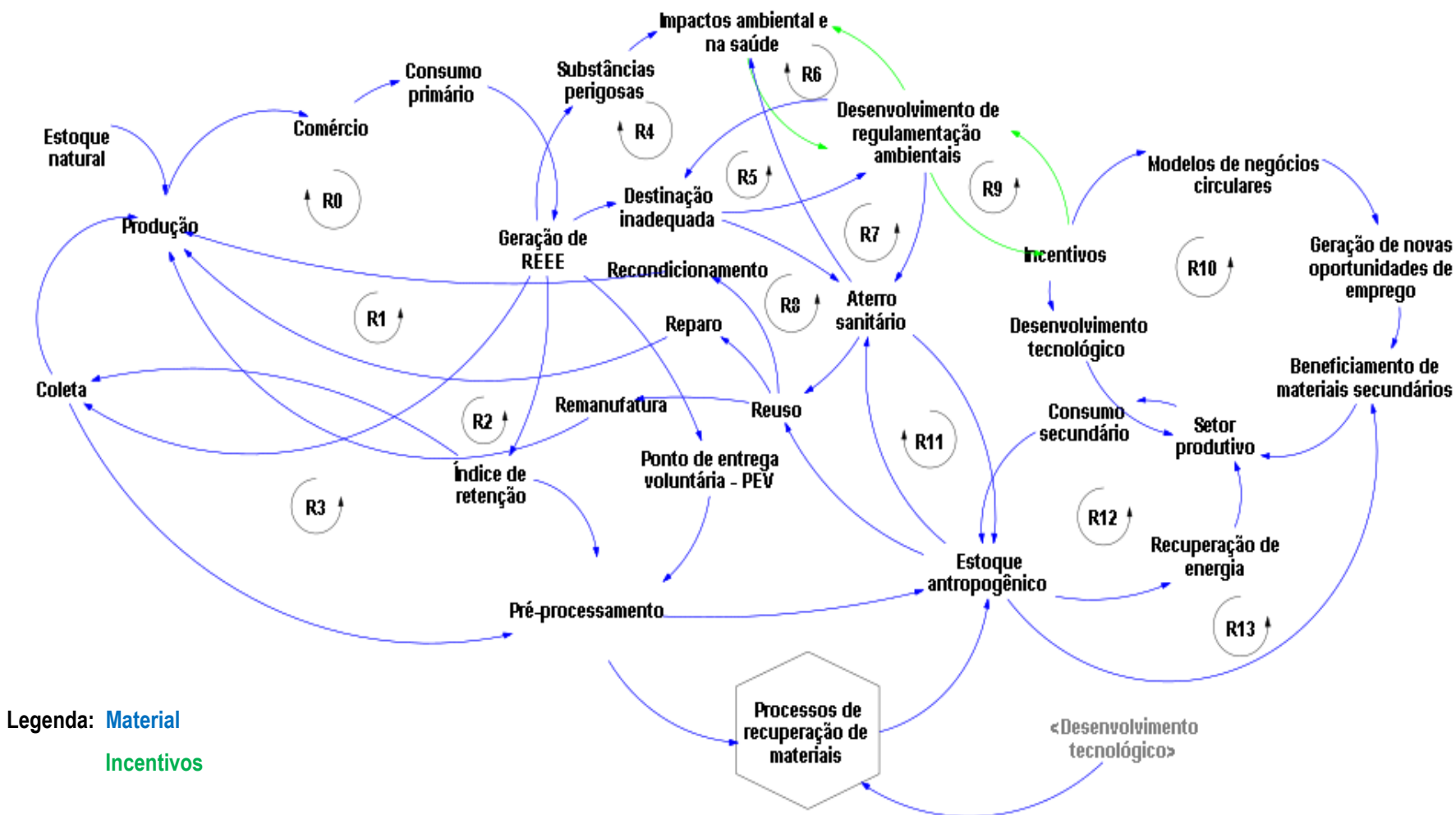


Figura 3. Diagrama de loop conceitual e causal dos fatores que exercem influência sobre a gestão de REEE.

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

É possível perceber que a variável “desenvolvimento tecnológico” é uma variável de sombra, referindo-se a outra variável definida em outro lugar, no intuito de reduzir a confusão e aumentar a clareza. O modelo desenvolvido consolidou aspectos relacionados ao uso de materiais secundários como instituição produtiva, estruturando um ciclo fechado e evidenciando a integração dos agentes e da cadeia de valor por meio da dinâmica de sistemas (FREITAS *et al.*, 2022).

## 5. Conclusão

A mineração urbana é capaz de reduzir a dependência existente da extração de matérias-primas naturais e auxiliar a economia circular na gestão dos resíduos gerados no fim dos processos produtivos e os em posse do consumidor. Portanto, a MU pode ser uma fonte potencial para a recuperação de materiais valiosos e perigosos, que podem ser prospectados para obtenção, revalorização e reintrodução de matérias-primas secundárias a partir do REEE. Contudo, para que a mineração urbana seja considerada viável, devem existir informações significativa, tais como: localização, tamanho, concentração de materiais e recursos a serem prospectados. É importante ressaltar que a metodologia utilizada contribuiu para identificar potenciais sinergias entre recicladoras e produtoras, estimulando uma integração entre os elos da cadeia de REEE, associado a novas estratégias para estimular o uso de insumos residuais.

## 6. Agradecimentos

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

## 7. Referências Bibliográficas

BRASIL, **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010 b.

CUCCHIELLA, F. et al, **Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams**. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Towards the circular economy: Opportunities for the consumer goods sector**. Ellen MacArthur Foundation, 2013.

FREITAS, E.S.C; et al., **System dynamics applied to second generation biofuel in Brazil: A circular economy approach**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS-ONU. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em [www.nacoesunidas.org](http://www.nacoesunidas.org). Acessado em novembro de 2023.

GUARNIERI, P. Transição de uma economia linear para uma economia circular: um caminho possível?. Disponível em: [https://patriciaquarnieri.blogspot.com/2020/10/transicao-de-uma-economia-linear-para.html#google\\_vignette](https://patriciaquarnieri.blogspot.com/2020/10/transicao-de-uma-economia-linear-para.html#google_vignette). Acesso em novembro de 2023.

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

WEETMAN, C. **Economia circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa**. São Paulo: 2019.