

# **MINERAÇÃO URBANA DE REEE: UMA ANÁLISE SISTÊMICA DO PAPEL ESTRATÉGICO DOS CENTROS DE RECONDICIONAMENTO DE COMPUTADORES (CRC's) NO BRASIL**

## **URBAN WEEE MINING: A SYSTEMIC ANALYSIS OF THE STRATEGIC ROLE OF COMPUTER RECONDITIONING CENTERS (CRCs) IN BRAZIL**

**Emmanuelle Soares de Carvalho Freitas**

Bolsista PCI, Administradora, D.Sc.

**Lúcia Helena Xavier**

Supervisora, Bióloga, D. Sc.

### **Resumo**

A crescente geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE) posiciona a mineração urbana como uma alternativa estratégica e essencial para a transição à economia circular. Este artigo aborda o papel dos Centros de Recondicionamento de Computadores (CRC's) no Brasil, posicionados como uma valiosa etapa da cadeia de valor da mineração urbana de REEE no Brasil. A metodologia consiste na análise sistêmica baseada em dados empíricos dos 23 CRC's implantados e a consolidação do método CRC-ECM para avaliar a maturidade dos centros, bem como a aplicação de dinâmica de sistemas e janela de Overton para mapear a evolução do setor. Os resultados destacam cinco loops de reforço positivo que governam a sustentabilidade dos CRC's e demonstram a evolução paradigmática do recondicionamento de "impensável" para "política pública". Propõe-se uma reestruturação do fluxo operacional focada em três pontos de alavancagem estratégicos, visando maximizar a recuperação de valor e consolidar os CRC's como um modelo de sucesso na gestão dos REEE no Brasil.

Palavras-chave: Mineração Urbana, Dinâmica de Sistemas; Janela de Overton; Resíduos Eletroeletrônicos; Centros de Recondicionamento de Computadores.

### **ABSTRACT**

The growing generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE) positions urban mining as a strategic and essential alternative for the transition to a circular economy. This article addresses the role of Computer Reconditioning Centers (CRC's) in Brazil, positioned as a valuable stage in the WEEE urban mining value chain in Brazil. The methodology consists of a systemic analysis based on empirical data from the 23 implemented CRC's and the consolidation of the CRC-ECM method to assess the maturity of the centers, as well as the application of system dynamics and the Overton window to map the evolution of the sector. The results highlight five positive reinforcement loops that govern the sustainability of CRC's and demonstrate the paradigmatic evolution of reconditioning from "unthinkable" to "public policy". A restructuring of the operational flow is proposed, focused on three strategic leverage points, aiming to maximize value recovery and consolidate CRC's as a successful model in WEEE management in Brazil.

Keywords: Urban Mining, System Dynamics; Overton Window; Waste Electrical and Electronic Equipment; Computer Reconditioning Centers.

### **1. Introdução**

A geração exponencial de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) configura-se como um dos maiores desafios socioambientais. Segundo o relatório Global E-Waste Monitor (Baldé *et al.*, 2024), mais de 62 milhões de toneladas de REEE foram geradas mundialmente em 2022, das quais apenas 22% tiveram destinação ambientalmente adequada. Paradoxalmente, ao mesmo tempo em que os REEE representam um risco socioambiental crescente, eles também configuram uma fonte estratégica de materiais valiosos, fundamentais para a indústria tecnológica e para a transição energética (Zeng *et al.*, 2018). É nesse contexto que surgem os centros de recondicionamento de computadores (CRC's), vinculados ao programa computadores para inclusão

do Ministério das Comunicações (MCom). Esses centros atuam na revalorização de equipamentos eletroeletrônicos, promovendo a extensão do ciclo de vida dos dispositivos, a inclusão digital e a formação profissional de pessoas em situação de vulnerabilidade social.

Apesar da relevância crescente dos CRC's, há uma lacuna significativa na literatura científica sobre três aspectos fundamentais: (1) a dinâmica sistêmica que condiciona seu desempenho; e (2) a evolução da aceitação social do recondicionamento como alternativa ao descarte. Estudos internacionais (Althaf *et al.*, 2023; Yken *et al.*, 2021) exploram a reciclagem de REEE sob perspectivas tecnológicas e econômicas, mas poucos abordam modelos híbridos que integrem inclusão social, reaproveitamento de equipamentos e gestão de resíduos em uma perspectiva sistêmica. Essa lacuna é crítica, e a mineração urbana emerge como uma ferramenta da economia circular e uma estratégia central que propõe a ruptura do modelo linear (extrair-produzir-descartar) ao estabelecer sistemas regenerativos onde o valor do produto é mantido pelo maior tempo possível (EMF, 2015). Embora a mineração urbana englobe diversas cadeias de resíduos (como construção civil, veículos em fim de vida e outros), no contexto dos REEE, ela emerge como a estratégia que permite a recuperação de materiais valiosos de produtos descartados (Zeng *et al.*, 2018). É neste ponto que os CRC's se tornam cruciais: eles representam um importante elo da mineração urbana, uma aplicação prática desses princípios, atuando simultaneamente em múltiplas estratégias circulares: extensão da vida útil (recondicionamento), recuperação de componentes (remanufatura), reciclagem de materiais e formação de capital humano para a economia circular. Essa natureza híbrida distingue os CRC's de iniciativas focadas exclusivamente em reciclagem ou reaproveitamento.

Assim, este artigo busca preencher essa lacuna por meio de uma abordagem multidimensional: (1) dinâmica sistêmica dos CRC's; (2) a evolução da aceitação social do recondicionamento (janela de Overton) e (3) a avaliação de maturidade dos CRC's (Metodologia CRC-ECM).

## **2. Metodologia**

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e quantitativa, estruturada em três componentes metodológicos complementares:

### **3.1 Coleta de dados primários**

Entre julho e outubro de 2024, foram realizadas 23 entrevistas estruturadas com coordenadores de CRC's ativos em todas as regiões do Brasil, complementadas por 11 visitas técnicas presenciais. O instrumento de pesquisa consistiu em questionário com 22 perguntas abertas, organizado em quatro eixos: (1) operações e processos; (2) gestão de resíduos; (3) capacitação profissional; e (4) infraestrutura operacional.

### **3.2 Dinâmica de sistemas (DS) e modelagem causal**

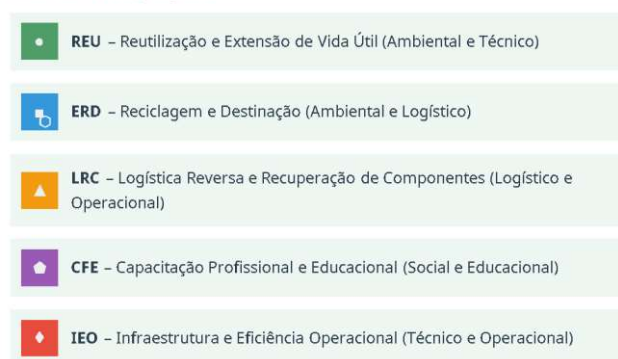
A Dinâmica de Sistemas (DS), desenvolvida por Forrester (1961) e consolidada por Sterman (2000), é uma metodologia para compreensão de sistemas complexos por meio da identificação de estruturas de feedback (loops causais) que geram comportamentos observados. Loops de reforço positivo (R+) amplificam mudanças, criando círculos virtuosos. A aplicação da DS à gestão de REEE é relativamente recente (Nowakowski, 2018), mas tem demonstrado potencial para identificar pontos de alavancagem, locais no sistema onde intervenções relativamente pequenas podem gerar mudanças significativas. A metodologia de DS foi aplicada seguindo protocolo adaptado

de Meadows (2008) e Luna-Reyes e Andersen (2003): **1. Articulação do problema:** definição das fronteiras do sistema e identificação das variáveis que influenciam o desempenho dos CRC's; **2. Formulação de hipóteses dinâmicas:** desenvolvimento de teorias preliminares sobre estruturas de feedback; **3. Mapeamento de estruturas causais:** construção de diagramas de loops causais (CLD) representando relações entre variáveis-chave, e **4. Análise de pontos de alavancagem:** identificação de intervenções estratégicas com potencial para gerar mudanças significativas.

### 3.3 Metodologia CRC-ECM

Apesar da regulamentação e acompanhamento dos CRC's pelo Ministério das Comunicações, os mesmos apresentam níveis diferenciados de infraestrutura e operação. Assim, com o objetivo de avaliar o grau de maturidade dos CRC's, foi desenvolvida a Metodologia CRC-ECM (Economia Circular e Maturidade) com análise a partir de cinco pilares (Figuras 1a e 1b):

Cinco Pilares (Tipologias):



(1a)

Escala de maturidade

Nível	Pontuação Total	Classificação
1	0 - 20	Inicial
2	21 - 40	Básico
3	41 - 60	Intermediário
4	61 - 80	Avançado
5	81 - 100	Circular Total

( 1b)

Figuras 1a e 1b. Níveis de classificação e escala de maturidade dos CRC's.

Cada tipologia foi avaliada em escala de cinco níveis de maturidade, com pontuação de 0 a 100 por dimensão: **Nível 5 (Circular Total):** ampla infraestrutura, depósitos e estruturas de armazenamento, equipe técnica qualificada e atendimento operacional amplo. **Nível 4 (Avançado):** possuem a etapa de acondicionamento, realizam encaminhamento responsável para empresas certificadas, assegurando a destinação adequada dos resíduos. **Nível 3 (Intermediário):** estrutura funcional consolidada, mas ainda com melhorias necessárias em processamento, infraestrutura ou capacitação. **Nível 2 (Básico):** atuação mais restrita e infraestrutura limitada. - **Nível 1 (Inicial):** CRC's que começaram a operação recentemente.

**Obs.:** Essa classificação foi baseada em dados obtidos em entrevistas, cruzados com os pilares da metodologia CRC-ECM. E foram excluídos dessa análise os CRC's que encerram a parceria com o MCom em 2025 (FUNTAC e IDEAR).

### 3.4 Análise da janela de Overton

A evolução histórica do conceito de acondicionamento foi mapeada através de: (1) análise documental de políticas públicas (1990-2024); (2) revisão de literatura sobre gestão de REEE no Brasil; e (3) triangulação com dados das entrevistas para identificar marcos de mudança na aceitação social. A janela de Overton, conceito desenvolvido por Joseph P. Overton (1990) e popularizado por Lehman (2010), descreve como ideias transitam de "impensáveis" a "políticas públicas" através de estágios de aceitação social. Aplicada ao contexto dos CRC's, essa teoria permite

compreender como o condicionamento de equipamentos eletroeletrônicos evoluiu de uma prática marginal para uma política pública institucionalizada.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise por meio da DS revelou que o sistema de operacionalização dos CRC's é caracterizado por cinco loops de reforço. Essa configuração indica que o sistema tende a amplificar tanto sucessos quanto fracassos, tornando intervenções externas (especialmente políticas públicas) essenciais para correção de trajetórias negativas (Figura 2).

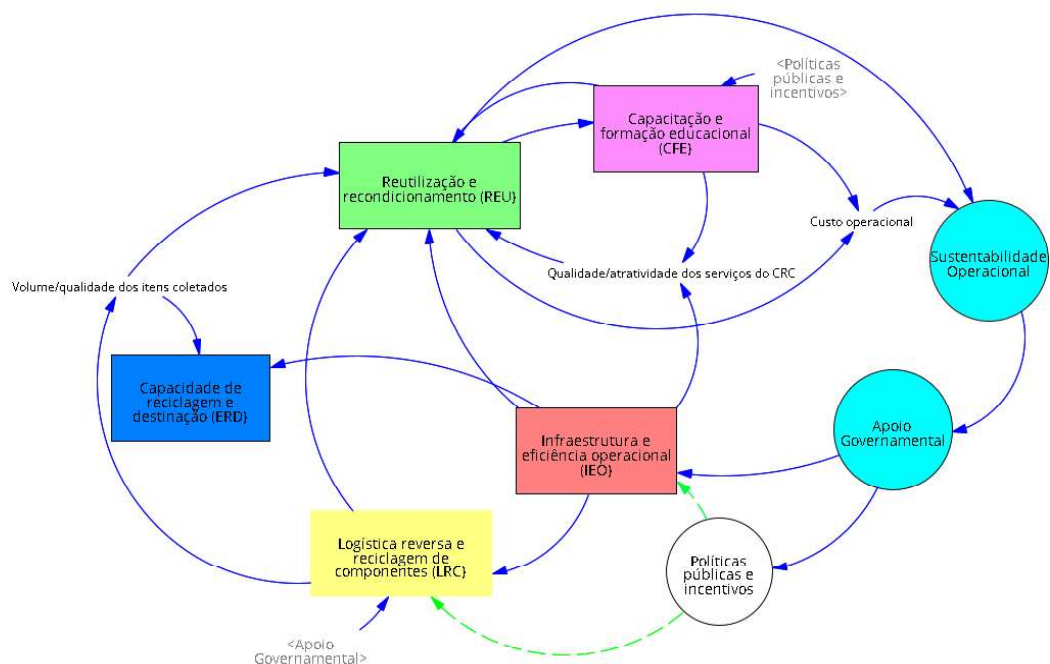
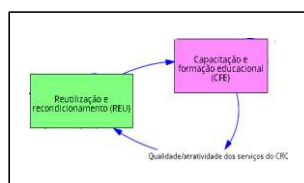
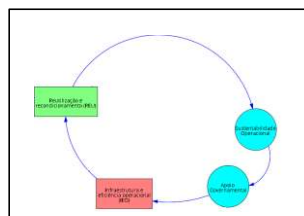


Figura 2. Dinâmica sistêmica dos CRC's: loops causais identificados

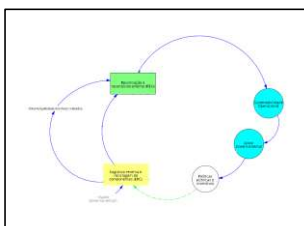
Os loops identificados são:



**Loop R1: Capacitação e Qualidade dos Serviços. Estrutura: CFE → Qualidade dos Serviços → REU/ERD → CFE.** A capacitação e formação educacional (CFE) melhora a qualidade dos serviços, ampliando a reutilização e condicionamento (REU/ERD), o que gera mais oportunidades de capacitação prática. Este é o loop mais consolidado (100% maturidade avançada em CFE).

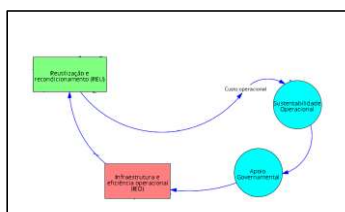


**Loop R2: Infraestrutura e Sustentabilidade Operacional. Estrutura: IEO → REU/ERD → Sustentabilidade Operacional → Apoio Governamental → IEO.** Melhor infraestrutura e eficiência operacional (IEO) aumenta a capacidade de REU/ERD, melhorando a sustentabilidade operacional (SO), o que fortalece a demanda por apoio governamental (AG) para aprimorar a IEO.

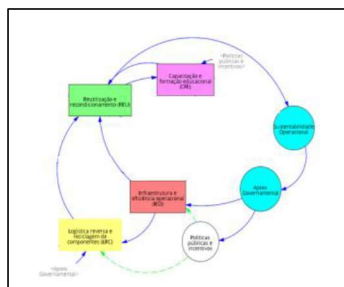


**Loop R3: Logística Reversa e Fortalecimento Operacional. Estrutura: LRC → Volume/Qualidade → REU/ERD → Sustentabilidade Operacional → Apoio Governamental → LRC.** sistemas de logística reversa e coleta (LRC) eficientes aumentam o volume/qualidade dos

itens, melhorando REU/ERD e a sustentabilidade operacional, o que reforça a necessidade de AG para fortalecer a LRC.



**Loop R4: Otimização de Custos e Eficiência. Estrutura: REU/ERD → Custo Operacional → Sustentabilidade Operacional → Apoio Governamental → IEO → REU/ERD.** Maior capacidade de REU/ERD reduz o custo operacional, aumentando a sustentabilidade operacional e reforçando a necessidade de AG para investir em IEO.



**Loop R5: Políticas Públicas e Fortalecimento Sistêmico. Estrutura: Políticas Públicas → LRC/IEO/CFE → (Feedback para demanda por Políticas).** Políticas públicas fortalecem LRC, IEO e CFE simultaneamente, gerando legitimidade e demanda por expansão das políticas. O Programa Computadores para Inclusão exemplifica este loop em ação, sendo o principal motor do AG.

A sustentabilidade operacional é uma propriedade emergente da interação eficiente de todos os componentes (LRC, REU/ERD, CFE, IEO), e não uma variável isolada. O apoio governamental (Loop R5) é o mecanismo externo essencial de regulação e ativação do sistema.

## 4.2 Janela de Overton: evolução da aceitação social do acondicionamento

A aplicação da Janela de Overton ao contexto dos CRC's revela uma trajetória de transformação paradigmática ao longo de três décadas (Quadro 1).

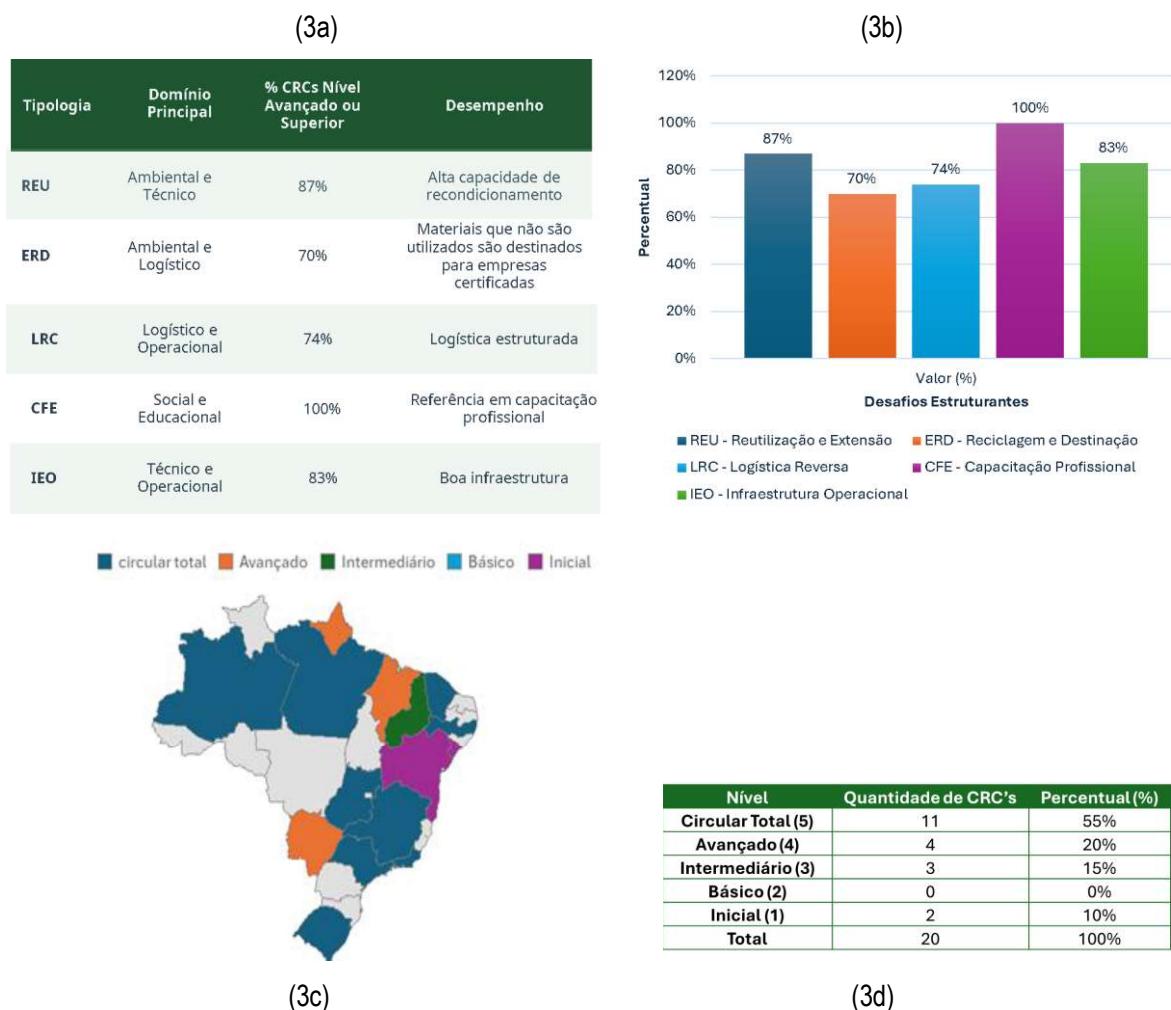
Quadro 1: Janela de Overton - evolução do conceito de acondicionamento

Ano	Estágio	Contexto
1990	Impensável	Descarte de equipamentos eletrônicos em lixo comum era prática normalizada. Recondicionamento era visto como "gambiarra" ou prática marginal.
2000	Radical	Primeiras iniciativas de reciclagem de materiais emergem, mas recondicionamento ainda é visto com desconfiança. Predomina a cultura de obsolescência programada.
2005	Aceitável	Doação de equipamentos usados para entidades sociais ganha aceitação, mas sem estrutura formal de recondicionamento.
2010	Sensato	Recondicionamento profissional é reconhecido como alternativa viável. Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) estabelece responsabilidade compartilhada.
2015	Popular	CRC's em expansão. Equipamentos recondicionados ganham mercado e aceitação social. Consumidores começam a valorizar a extensão da vida útil.
2020-2024	Política Pública	CRC's institucionalizados como política pública federal. Recondicionamento é reconhecido como estratégia central de economia circular e inclusão digital.

Essa evolução demonstra uma mudança de paradigma fundamental: da cultura de descarte para a cultura de reaproveitamento; da obsolescência programada para a extensão da vida útil; da economia linear para a economia circular. A transição da janela de Overton foi impulsionada por três fatores convergentes: (1) crescente consciência ambiental sobre REEE; (2) políticas públicas estruturantes (PNRS, Programa Computadores para Inclusão); e (3) demonstração prática da viabilidade técnica e social do condicionamento pelos CRC's pioneiros.

#### 4.3 Maturidade dos CRC's

A aplicação da Metodologia CRC-ECM nos 23 CRC's revelou uma maturidade assimétrica entre as cinco dimensões avaliadas (Figuras 3a, 3b, 3c, 3d).



Figuras 3a, 3b, 3c, 3d. Análise da maturidade dos CRC's

A aplicação da Metodologia CRC-ECM revelou que 74% dos CRC's estão nos níveis Avançado ou Circular Total. No entanto, a maturidade é desigual. Enquanto 100% atingiram maturidade avançada em Capacitação e Formação Educacional (CFE), a Logística Reversa (LRC) e a Infraestrutura e Eficiência Operacional (IEO) ainda apresentam desafios.

#### 4.4 Pontos de alavancagem identificados

A análise integrada dos loops causais e da janela de Overton permite identificar três pontos de alavancagem estratégicos: **1. Estruturação de sistemas Integrados de Logística Reversa com rastreabilidade:** Ativa os



Loops R2, R3 e R4, garantindo fluxo constante de REEE e segurança de dados (mitigando a retenção); **2. Padronização e certificação de processos de recondicionamento:** Fortalece o loop R1 (qualidade dos serviços), aumentando a confiança no produto recondicionado e facilitando a aceitação social e de mercado; **3. Expansão do Apoio Governamental (AG) para IEO e LRC:** Ativa o loop R5, fornecendo o capital necessário para superar os desafios de infraestrutura e logística reversa, que são os pontos de menor maturidade.

## 5. Conclusão

Os centros de recondicionamento de computadores (CRC's) são mais do que meros pontos de inclusão social; eles são um elo estratégico e na cadeia de valor da mineração urbana de REEE no Brasil. A análise sistêmica demonstrou que a sustentabilidade dos CRC's é governada por cinco loops de reforço interconectados, sendo o apoio governamental o principal mecanismo de ativação e regulação do sistema. A evolução do conceito de recondicionamento, mapeada pela janela de Overton, confirma uma transição paradigmática de uma prática marginal para uma política pública institucionalizada, solidificando o papel dos CRC's como pilares da economia circular e da inclusão digital. Os CRC's representam uma inovação sociotécnica brasileira com potencial para servir de modelo para outros países emergentes. No entanto, apesar da alta maturidade em capacitação, os desafios persistem na logística reversa e na infraestrutura operacional. A intervenção estratégica nos três pontos de alavancagem identificados são cruciais para consolidar os CRC's como um modelo de sucesso.

## 6. Agradecimentos

Este artigo é parte integrante do Projeto RECUPER3 Nº 01207.000170/2023-35, apoiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SETEC).

## 7. Referências Bibliográficas

- ALTHAF, S., BABBITT, C. W., & CHEN, R. (2020). **The evolution of consumer electronic waste in the United States**. Journal of Industrial Ecology. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13074>
- BALDE, C.P., et al., 2024. **The Global E-Waste Monitor 2024. Quantities, Flows, and the Circular Economy Potential**. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – cohosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. 120 p. Disponível: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2015). **Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition**.
- FORRESTER, J. W. (1961). **Industrial Dynamics**. MIT Press.
- LEHMAN, J. (2010). **The Overton Window**. Mackinac Center for Public Policy. Disponível em: <https://www.mackinac.org/OvertonWindow>
- LUNA-REYES, L. F., & ANDERSEN, D. L. (2003). **Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics: Methods and models**. System Dynamics Review, 19(4), 271-296. DOI: <https://doi.org/10.1002/sdr.280>
- MEADOWS, D. H. (2008). **Thinking in systems: A primer**. Chelsea Green Publishing.
- NOWAKOWSKI, P. (2018). **A novel, cost efficient identification method for disassembly planning of waste electrical and electronic equipment**. Journal of Cleaner Production, 172, 2695-2707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.142>.
- VERTON, J. P. (1990). **The Overton Window: A model for understanding political change**. Mackinac Center for Public Policy. Disponível: <https://www.mackinac.org/OvertonWindow>
- STERMAN, J. D. et al., **System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management**. Journal of Operations Management, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jom.2015.07.001>
- YKEN, J., BOXALL, N. J., CHENG, K. Y., NIKOLOSKI, A. N., MOHEIMANI, N. R., & KAKSONEN, A. H. (2021). **E-waste recycling and resource recovery: A review on technologies, barriers and enablers with a focus on Oceania**. Metals, 11(8), 1313. <https://doi.org/10.3390/met11081313>