

Mineração Urbana de REEE no Brasil: Potencial, Gargalos para e Recuperação de Minerais Críticos e Estratégicos

Urban Mining of E-Waste in Brazil: Potential, Bottlenecks, and Recovery of Critical and Strategic Minerals

Luciana Silva Contador
Bolsista PCI, Bióloga, D.Sc.

Lúcia Helena Xavier
Supervisora, Bióloga, D. Sc.

Resumo

A Mineração Urbana é estratégia-chave para sustentabilidade e economia circular, ao recuperar materiais secundários de estoques antropogênicos, como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). Este estudo, do Projeto RECUPER3, analisa o potencial das minas urbanas brasileiras, considerando a capacidade produtiva de empresas de manufatura reversa e reciclagem, além de gargalos tecnológicos, logísticos e regulatórios que limitam a recuperação de minerais críticos e estratégicos. Identificou-se concentração de empresas no Sul e Sudeste, com capacidade instalada de 285 mil t/ano, porém subutilizada. Tecnologias de alto valor, como hidrometalurgia e biometalurgia, estão em estágio inicial no Brasil. A falta de atualização do Decreto nº 10.240/2020, que define metas de Logística Reversa até 2025, constitui lacuna regulatória crítica. Conclui-se que fortalecer a governança, investir em inovação tecnológica e integrar os agentes da cadeia é essencial para consolidar a mineração urbana como vetor estratégico da transição energética e da economia circular.

Palavras-chave: Mineração urbana; REEE; manufatura reversa; minerais críticos; logística reversa.

ABSTRACT

Urban Mining represents a key strategy for sustainability and the circular economy by promoting the recovery of secondary materials from anthropogenic stocks, such as Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). This study, conducted under the RECUPER3 Program coordinated by the Mineral Technology Center (CETEM), analyzes the potential of Brazilian “urban mines,” focusing on the productive capacity of demanufacturing and recycling companies, as well as the technological, logistical, and regulatory bottlenecks that hinder the recovery of Critical and Strategic Minerals (CSM). The research identified 320 companies operating in the WEEE value chain, with a strong regional concentration in the South and Southeast and an installed processing capacity exceeding 285,000 tons per year — underutilized mainly due to raw material scarcity. The findings reveal that high-value recovery technologies, such as hydrometallurgy and biohydrometallurgy, are still in early stages of development in Brazil. Furthermore, the lack of updates to Federal Decree No. 10.240/2020, which defines Reverse Logistics targets until 2025, constitutes a significant regulatory gap. It is concluded that strengthening governance, investing in technological innovation, and improving coordination across the value chain are essential steps to establish urban mining as a strategic driver of energy transition and circular economy in Brazil.

Keywords: Urban mining; WEEE; demanufacturing; critical minerals; circular economy; reverse logistics.

1. INTRODUÇÃO

A Mineração Urbana constitui um conceito central para a sustentabilidade e a economia circular, ao propor a recuperação de materiais secundários provenientes de estoques antropogênicos, isto é, de produtos e resíduos resultantes das atividades humanas (XAVIER & OTONI). Diferentemente da mineração tradicional, essa abordagem busca recursos em bens de consumo descartados, sendo os Resíduos de Equipamentos

Eletroeletrônicos (REEE) uma das fontes secundárias mais relevantes e de maior valor agregado (XAVIER, 2019; BALDE, 2024).

Os REEE apresentam elevada diversidade de materiais, expressivo potencial econômico e viabilidade técnica significativa para a recuperação de diferentes frações metálicas e não metálicas. Esses resíduos representam, portanto, uma oportunidade estratégica para reduzir a dependência da mineração primária e ampliar a oferta de Minerais Críticos e Estratégicos (MCE), essenciais à transição energética e tecnológica em curso (IBRAM, 2024).

A pesquisa que fundamenta este trabalho foi desenvolvida no âmbito do Programa RECUPER3, coordenado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), cujo objetivo é identificar e avaliar rotas de circularidade voltadas à recuperação de materiais secundários provenientes da mineração urbana de REEE no Brasil.

O presente artigo apresenta e discute os principais resultados da investigação realizada, com ênfase no potencial das minas urbanas brasileiras, nos gargalos tecnológicos e logísticos identificados e nas oportunidades de fortalecimento da cadeia de valor dos Minerais Críticos e Estratégicos (MCE). A relevância do estudo reside em sua contribuição científica e aplicada para o aperfeiçoamento de políticas públicas, o desenvolvimento tecnológico e o planejamento industrial voltados à recuperação de materiais de alto valor agregado e à consolidação de um modelo produtivo sustentável e circular no país. Especificamente, o trabalho tem como objetivo analisar o potencial das minas urbanas no Brasil, com foco no estoque de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) e na recuperação de Minerais Críticos e Estratégicos (MCE).

2. METODOLOGIA

A análise das empresas de Manufatura Reversa e Reciclagem no âmbito do Projeto RECUPER3 foi conduzida por meio de um estudo de campo detalhado, com o objetivo de diagnosticar suas operações, práticas de recuperação de REEE e desafios enfrentados na cadeia de Logística Reversa (LR).

O universo da pesquisa contemplou 320 empresas, identificadas a partir de bases secundárias, registros de licenciamento ambiental e indicações de sistemas coletivos de LR. A categorização inicial utilizou códigos CNAE, complementada por 17 subcategorias de atuação (ex.: manufatura reversa, reciclagem, recondicionamento, exportação e logística reversa) para refletir a diversidade operacional do setor.

A coleta de dados combinou entrevistas semiestruturadas com 57 empresas e visitas técnicas a 28 delas, abordando aspectos como origem dos resíduos, infraestrutura e tecnologias de processamento, critérios de triagem, volumes tratados, conformidade normativa (ABNT NBR 16156:2013 e NBR 15833:2018), integração com a cadeia e principais dificuldades técnico-operacionais. As informações obtidas — incluindo dados sobre capacidade instalada, volumes processados e práticas operacionais — foram autodeclaradas pelas próprias empresas, podendo refletir variações nos critérios internos de medição e registro.

A análise dos dados obtidos incluiu mapeamento das atividades, avaliação da interseccionalidade operacional por meio de diagrama de Venn, levantamento de capacidade produtiva e recursos humanos, além da avaliação

qualitativa do grau de maturidade das empresas (formalização, infraestrutura, integração, qualificação e conformidade ambiental).

Em síntese, a metodologia integrou abordagens quantitativa e qualitativa, priorizando agentes com maior impacto na mineração urbana de REEE, e permitiu identificar gargalos tecnológicos, logísticos e regulatórios, além de caracterizar o potencial e limitações do setor no Brasil.

3. Manufatura Reversa e Empresas de Reciclagem: Agentes e Capacidade Produtiva

A cadeia de valor da Logística Reversa (LR) de REEE é composta por diversos agentes, entre os quais a Manufatura Reversa (MR) e a Reciclagem desempenham papéis cruciais na etapa pós-consumo.

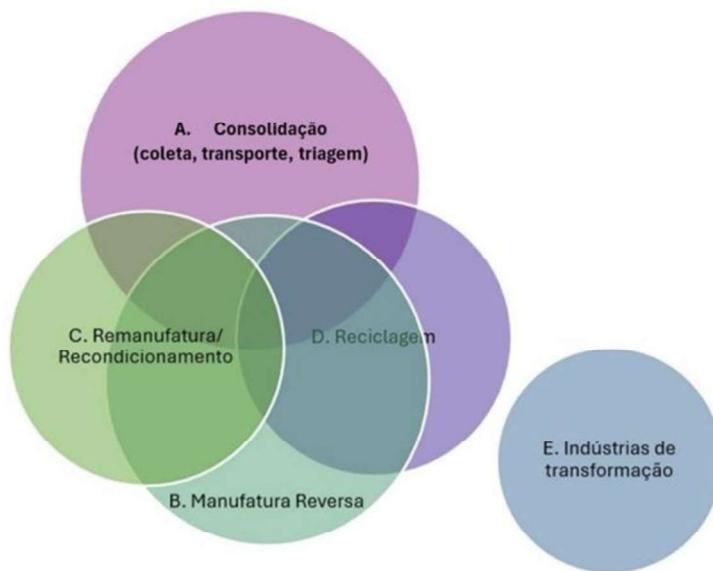


Figura 1 - Diagrama de Venn com as diferentes atividades identificadas na gestão de REEE

A partir da análise do diagrama de Venn elaborado na pesquisa (Figura 1), observou-se a sobreposição de funções entre os agentes envolvidos na cadeia de Logística Reversa (LR) de REEE — especialmente entre os segmentos de consolidação, manufatura reversa, recondicionamento e reciclagem.

De acordo com essa análise, o agente de manufatura reversa é definido como a pessoa jurídica responsável pela recepção, armazenamento, segregação, desmontagem, reparo e comercialização de partes, peças e componentes provenientes de equipamentos eletroeletrônicos descartados. Esses agentes atuam como elo intermediário entre a coleta e a reciclagem, desempenhando papel essencial na recuperação de valor e na extensão do ciclo de vida dos produtos.

Para operar, esses agentes devem estar formalmente constituídos e licenciados pelos órgãos ambientais competentes, em conformidade com a legislação vigente, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei Federal nº 12.305/2010) e o Decreto Federal nº 10.240/2020.

As atividades de manufatura reversa e reciclagem envolvem:

- Processos não destrutivos: visam recuperar a funcionalidade de produtos, partes ou peças para reuso. A PNRS prioriza a reutilização e a “preparação para o reuso” (conceito adotado em diretrizes europeias) antes da reciclagem, prolongando a vida útil dos equipamentos.
- Processos destrutivos: incluem desmontagem, separação, Trituração e moagem, seguidos por técnicas de mineração urbana como pirometalurgia, hidrometalurgia, biometalurgia e eletrometalurgia, que permitem a recuperação de materiais secundários.

Os dados analisados demonstram uma elevada concentração da capacidade instalada de processamento em quatro grandes empresas — Ambipar, Natusomos, Vertas e Indústria Fox — responsáveis por mais de 285 mil toneladas de REEE por ano, o que representa cerca de 88% da capacidade total declarada pelas empresas participantes.

Apesar dessa capacidade instalada expressiva, a capacidade produtiva efetiva está abaixo de 180 mil toneladas/ano. A principal causa dessa subutilização é a escassez de matéria-prima, evidenciando que, embora exista infraestrutura para processar grandes volumes, o sistema de logística reversa ainda não consolida nem direciona quantidades suficientes de REEE para essas empresas.

Há uma forte concentração regional dessas empresas nas regiões Sul e Sudeste, principalmente no Estado de São Paulo, onde se localizam três das quatro maiores operadoras. Nesse contexto, a atuação descentralizada de pequenas e médias empresas é essencial para a capilaridade do sistema de LR.

Essas empresas de menor porte, embora operem com estruturas mais simples, destacam-se por adotar processos não destrutivos, que possibilitam melhor segregação e recuperação de materiais reutilizáveis. Já as empresas altamente automatizadas tendem a empregar métodos destrutivos, que podem causar mistura de materiais e reduzir o potencial de reaproveitamento de recursos.

4. Análise do Potencial das Minas Urbanas e Minerais Estratégicos

Os REEE são fontes de recursos secundários particularmente relevantes por conterem Minerais Críticos e Estratégicos (MCE).

A recuperação de MCE a partir de fontes secundárias é essencial para reduzir a dependência da mineração primária e mitigar riscos de suprimento de insumos críticos à transição energética.

- Impacto ambiental: a logística reversa e o processamento adequado dos REEE evitam o descarte incorreto de componentes potencialmente perigosos, como cromo, cádmio, mercúrio, chumbo e retardantes de chama presentes em plásticos. A reciclagem de MCE pode evitar 25% a 40% da demanda por mineração primária até 2050 para minerais como lítio, níquel, cobre e cobalto, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa em até 80%.

- Recursos recuperáveis: minerais como lítio (essencial para baterias recarregáveis), cobre e alumínio (estratégicos para eletrificação) estão presentes em abundância nos REEE.

5. Tecnologias de Recuperação de Minerais Críticos

A recuperação de materiais valiosos das frações de REEE envolve tecnologias complexas.

As Placas de Circuito Impresso (PCI) constituem uma das frações mais valiosas dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, por apresentarem elevadas concentrações de metais de interesse econômico, como cobre (10–27%), ouro (20–1200 ppm), prata (200–3000 ppm) e paládio (10–300 ppm). No Brasil, entretanto, a maior parte das empresas realiza apenas o pré-processamento mecânico, envolvendo etapas como trituração e separação granulométrica, e posteriormente exporta as frações metálicas concentradas para refinadores internacionais, como Lorene (Japão) e Umicore (Bélgica). Essa prática reduz significativamente o aproveitamento econômico e tecnológico nacional. As tecnologias de refino mais avançadas combinam pirometalurgia e hidrometalurgia, permitindo a recuperação de metais de alto valor agregado. No contexto brasileiro, a bio-hidrometalurgia — que emprega microrganismos na dissolução seletiva de metais — encontra-se em estágio de desenvolvimento intermediário (nível TRL baixo a médio), com destaque para projetos conduzidos pela Itatijuca Biotech, em parceria com a Sinctronics, voltados à aplicação industrial dessa rota inovadora.

No caso dos painéis fotovoltaicos, empresas brasileiras como SunR e Solar 55 empregam predominantemente processos mecânicos para a separação de componentes. Apesar de tecnicamente viáveis, esses processos configuram operações de baixo valor agregado (downcycling), uma vez que recuperam, em sua maioria, vidro, cobre e alumínio, enquanto as tecnologias avançadas utilizadas internacionalmente permitem a recuperação de silício (Si) e prata (Ag) de alta pureza, agregando maior valor econômico e tecnológico ao processo.

Quanto às baterias de íons de lítio (LIB), a reciclagem concentra-se majoritariamente nos cátodos, devido ao elevado valor de metais como cobalto (Co) e níquel (Ni). O Brasil tem apresentado avanços nesse segmento, com destaque para a atuação da empresa Energy Source.

O Brasil tem apresentado avanços no campo da recuperação de Elementos de Terras Raras (ETR), impulsionados pela iniciativa da Viridion Rare Earths, em cooperação com o Centro de Refino, Reciclagem e Inovação de Terras Raras (CRITR). Essa parceria busca escalar industrialmente as rotas de recuperação de ETR a partir de resíduos tecnológicos, promovendo a internalização de etapas de refino e agregando valor à cadeia produtiva nacional.

6. Discussão

A gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no Brasil caracteriza-se por elevada complexidade, decorrente da heterogeneidade dos agentes envolvidos, da persistência de práticas informais em parte da cadeia e da fragmentação das rotas de destinação.

A análise realizada identificou dois gargalos estruturais que limitam a consolidação de um sistema eficiente de Logística Reversa (LR) de REEE no país: o logístico e o tecnológico-econômico.

O gargalo logístico está associado à baixa articulação entre os agentes da cadeia e à dificuldade de consolidação de volumes de resíduos em escala economicamente viável. A ausência de mecanismos eficazes de incentivo ao descarte adequado por parte dos consumidores, somada às limitações do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) — instrumento de natureza autodeclaratória e sujeito a inconsistências —, compromete a rastreabilidade e a transparência dos fluxos de REEE. Esse cenário evidencia a necessidade de aprimoramento dos sistemas de informação e controle, com a adoção de ferramentas digitais de monitoramento e a integração de dados referentes às etapas de coleta, transporte e processamento.

O gargalo tecnológico e econômico, por sua vez, decorre do predomínio de operações de manufatura reversa restritas ao pré-processamento mecânico, como trituração e separação física, seguidas da exportação das frações metálicas de alto valor. Esse modelo limita o aproveitamento econômico nacional e evidencia o déficit de investimentos em tecnologias de refino e recuperação de Minerais Críticos e Estratégicos (MCE), como hidrometalurgia, pirometalurgia e biotecnologias aplicadas. Além disso, a alta concentração de capacidade instalada em poucas empresas de grande porte restringe a capilaridade territorial do sistema e dificulta a integração de pequenas e médias empresas à cadeia de valor.

Do ponto de vista regulatório, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010) e o Decreto Federal nº 10.240/2020 instituíram a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e estabeleceram metas progressivas de Logística Reversa até 2025. Contudo, a implementação prática dessas metas ainda é incipiente na maioria dos estados, sendo mais consistente apenas em São Paulo, Minas Gerais e Paraná, que dispõem de regulamentações complementares no âmbito do licenciamento ambiental.

Outro gargalo identificado está na ausência de transparência e publicidade dos resultados do Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP), o que limita o acompanhamento social e científico da efetividade do sistema de logística reversa de REEE e dificulta a identificação de pontos críticos para melhoria.

A ausência de atualização do Decreto nº 10.240/2020 e de novas metas para o período pós-2025 constitui uma lacuna regulatória significativa, com impactos diretos sobre a previsibilidade normativa e a atração de investimentos privados. Sem a revisão periódica e o fortalecimento dos mecanismos de monitoramento, há risco de descontinuidade das ações de economia circular e de fragilização das cadeias de manufatura reversa e reciclagem.

Diante desse cenário, torna-se fundamental que o Governo Federal, em articulação com os entes federativos, fabricantes, recicladores e entidades gestoras, promova a atualização das metas de Logística Reversa, acompanhada de políticas de incentivo à inovação tecnológica, formalização do setor e fortalecimento institucional. Tais medidas são essenciais para consolidar a mineração urbana de REEE no país, ampliar a

recuperação de materiais de alto valor agregado e alinhar o Brasil às metas internacionais de sustentabilidade e transição energética.

7. Conclusão

O Brasil possui um vasto e, em grande parte, inexplorado potencial de minas urbanas nos estoques de REEE.

Apesar da capacidade instalada relevante (mais de 285 mil toneladas/ano entre as principais empresas), o sistema ainda opera com subutilização, devido à ineficiência da logística reversa na consolidação de matéria-prima.

Para maximizar o potencial de recuperação de valor, especialmente dos MCE, é imperativo que o país:

- Aprimore a eficiência da Logística Reversa, fortalecendo a articulação entre consumidores, comerciantes, assistências técnicas e recicladores.
- Invista em tecnologias avançadas, promovendo o desenvolvimento e a adoção de técnicas de refino de alto valor — como a hidrometalurgia e a biometalurgia — para reduzir a dependência da exportação de pré-processados.
- Garanta a divulgação pública e periódica dos resultados do Grupo de Acompanhamento de Performance (GAP), assegurando transparência, fortalecendo o controle social e permitindo a avaliação contínua da efetividade da logística reversa de REEE.
- Fortaleça a fiscalização e a regulamentação, harmonizando legislações, aprimorando sistemas de rastreabilidade e convertendo passivos ambientais em ativos econômicos.

A superação do atual cenário, fragmentado e tecnologicamente limitado, exige foco contínuo em inovação, integração digital e políticas públicas robustas que transformem o potencial das minas urbanas em uma fonte alternativa e sustentável de Minerais Críticos e Estratégicos.

8. Agradecimentos

Agradeço à Lúcia Xavier, à equipe R3minare e Recuper3. Agradeço ao CNPq, pelo apoio financeiro em forma de concessão de bolsa (302164/2024-4) e ao CETEM pelo apoio tecnológico.com o trabalho.

9. Referências Bibliográficas

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). ABNT NBR 15833: Manufatura reversa – aparelhos de refrigeração. Rio de Janeiro, 2018

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). ABNT NBR 16156: Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos — Requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro, 2013

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) – cohorted 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/>

BRASIL (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm).

BRASIL (2020). Decreto Federal nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm. Acesso em: 25/02/2024.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. Fundamentos para Políticas Públicas em Minerais Críticos e Estratégicos para o Brasil. 1.ed. - Brasília: 2024. 355p.

XAVIER, L. H. (2019). Mineração urbana e a gestão de resíduos eletroeletrônicos: Estado da arte do arcabouço legal e normativo. Rio de Janeiro.

XAVIER, L. H. D. S. M., & OTTONI, M. D. S. O. (2021). Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos.