

# RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE) COMO FONTE DE MINERAIS ESTRATÉGICOS

*Data de aceite: 02/12/2023*

**Emmanuelle Soares de Carvalho Freitas**

**Kimberly Ribeiro Pazenhagem Lima**

**Lucia Helena Xavier**

**RESUMO:** Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são regulamentados no Brasil desde 2010 por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Apesar de representarem uma categoria de resíduos potencialmente perigosa, esses resíduos também possuem frações de materiais valiosos como ouro, cobre, níquel e alumínio, entre outros minerais que também são conhecidos como minerais estratégicos em razão do risco de suprimento e importância econômica para o país. O objetivo principal deste artigo é analisar o potencial da recuperação de materiais secundários a partir dos REEE como forma de incentivar a economia circular. Parte dos minerais estratégicos ainda são elementos importantes para a transição energética, focando em uma economia de baixo carbono. Assim, a partir da revisão da literatura, análise dos objetivos do desenvolvimento sustentável aplicada à

gestão dos REEE e da aplicação da matriz SWOT para os materiais lítio, cobre e níquel, foi possível analisar os processos que envolvem a circularidade dos recursos provenientes dos resíduos eletroeletrônicos, contribuindo para o processo decisório no setor. Os resultados evidenciam o potencial de cada um dos minerais analisados frente à aplicação como insumos primários e secundários na cadeia produtiva. Lítio e níquel se destacam em razão da crescente demanda para aplicação nas baterias elétricas, enquanto o cobre possui maior versatilidade em aplicações. A busca por fontes secundárias para os materiais analisados é uma alternativa que pode contribuir para atendimento aos princípios da economia circular, bem como mitigar o impacto da emissão de carbono a partir dos processos de exploração convencionais.

**PALAVRAS-CHAVES:** Transição energética; Economia circular; Materiais secundários; Minerais críticos; Minerais estratégicos.

**ABSTRACT:** E-waste has been regulated in Brazil since 2010 through the Brazilian Policy on Solid Waste. Despite representing a potentially dangerous category of waste, this waste also contains fractions of valuable

materials such as gold, copper, nickel and aluminum, among other minerals that are also known as strategic minerals due to the supply risk and economic importance for the country. The main objective of this article is to analyze the potential of recovering secondary materials from e-waste as a way of encouraging the circular economy. Some strategic minerals are still important elements for the energy transition, focusing on a low-carbon economy. Thus, based on the literature review, analysis of sustainable development objectives applied to the management of e-waste and the application of the SWOT matrix for lithium, copper and nickel materials, it was possible to analyze the processes that involve the circularity of resources from electronic waste, contributing to the decision-making process in the sector. The results highlight the potential of each of the minerals analyzed for application as primary and secondary inputs in the production chain. Lithium and nickel stand out due to the growing demand for application in electric batteries, while copper has greater versatility in applications. The search for secondary sources for the materials analyzed is an alternative that can contribute to meeting the principles of the circular economy, as well as mitigating the impact of carbon emissions from conventional exploration processes.

**KEYWORDS:** Energy transition; Circular economy; Secondary materials; Critical minerals; Strategic minerals.

## 1. INTRODUÇÃO

A população mundial cresce de forma exponencial, o que pode ser interpretado como aumento de crescimento econômico por meio da necessidade de consumo que, seguindo os padrões atuais dos sistemas produtivos, representam um considerável aumento nas quantidades de resíduos gerados (WEETMAN, 2019) que podem resultar em impactos negativos ao meio ambiente e a saúde humana, a partir de descartes inadequados. Dentro desses resíduos gerados, há os resíduos eletroeletrônicos (REEE) provenientes de equipamentos que necessitam de energia (corrente elétrica ou acumuladores – pilhas, baterias) para funcionamento. Estes tipos de resíduos contêm diversas substâncias importantes que possuem papéis significativos, ou até mesmo definitivos, dentro de cadeias de produção de diversos setores (BORSCHIVER e TAVARES, 2022). Nesse sentido, os danos causados pelo descarte incorreto dos REEE são significativos devido ao potencial impacto de substâncias perigosas que afetam diretamente a saúde humana e do meio ambiente. Assim, a adoção de novas práticas de consumo e produção que possam assegurar a integridade ambiental e humana, tem sido cada vez mais necessária. Portanto, é inevitável a transição do modelo tradicional (linear) baseado em “produzir-usar-descartar” e no uso de fontes não renováveis, para um modelo baseado nos princípios da economia circular (EC), maximizando o uso dos recursos (EMF, 2013).

Ademais, a EC pressupõe sistemas regenerativos, restaurativos e circulares, baseados na reinserção de resíduos e produtos pós-consumo na cadeia produtiva, o que pode ser viabilizado por meio de soluções como logística reversa, mercado de crédito de carbono e mineração urbana. Destarte, a transformação de um resíduo após o fim de sua

vida útil representa uma valorização desta matéria-prima, por meio da utilização de outros processos, contribuindo para soluções que estão associadas com o compromisso com a sustentabilidade do país (FC SILVA *et al*, 2019). Desta forma, impulsionando a necessidade de ações que contemplem uma perspectiva conjunta de inovação e sustentabilidade em todos os setores produtivos. Para que isso ocorra, a implementação de uma EC que compreende a recuperação de materiais a partir de fontes secundárias, pode representar uma solução para a gestão dos resíduos eletroeletrônicos. Neste contexto, considerando a recuperação de materiais secundários a partir dos REEE, a economia circular pode ser um instrumento que promove a circularidade deste tipo de resíduo, possibilitando a transformá-los em insumo produtivo.

A inserção de resíduos como material secundário 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 de aterros sanitários, construção e demolição (estoques de construção), resíduos eletroeletrônicos, veículos em fim de vida e sólidos municipais residuais (RSU) (ARORA *et al.*, 2017).

Os materiais encontrados nos resíduos eletroeletrônicos constituem os estoques antropogênicos, em contraponto com os estoques naturais que são provenientes de matéria prima finita (PETRUNGARO e XAVIER, 2020). Os recursos provenientes dos estoques antropogênicos, são ricos em materiais estratégicos e críticos, tais como: lítio, silício e nióbio, sendo estes, peças fundamentais para que a transição energética ocorra de maneira mais sustentável, renovável e rentável.

Tendo em vista o aumento populacional associado aos avanços tecnológicos, novas fontes de energia estão sendo desenvolvidas, sendo estas novas fontes necessariamente renováveis para suprir a demanda energética mundial sem impactar negativamente o meio ambiente. O futuro da energia precisa ser renovável e suas formas de extração, produção e consumo precisam contemplar as dimensões social, econômica ou ambiental (J GOLDEMBERG, 2007). Entretanto, as fontes que são comumente utilizadas em larga escala, atualmente, são as não renováveis, as quais trazem consigo diversas consequências negativas por utilizarem de recursos finitos e degradantes.

A transição energética para fontes renováveis será cada vez mais dependente de minerais. E o Brasil, se apresenta como grande potência por possuir uma grande reserva de minerais críticos e estratégicos (BNDES, 2023). O país já possui uma matriz energética predominantemente limpa e é um grande produtor mineral, uma vez que, os minerais estratégicos e críticos são alguns dos recursos que ajudam no impulsionamento da transição energética.

O uso de recursos secundários a partir de resíduos eletroeletrônicos para a transição energética representa uma amplificação da cadeia de valor dessas matérias-primas. Desta

maneira, em consequência deste cenário, a seguinte pesquisa busca discutir e analisar cinco critérios de três minerais estratégicos do Brasil. A partir da análise desses critérios estabelecidos, utilizando como ferramentas de análise as matrizes SWOT e GUT, será possível identificar se existem alternativas mais sustentáveis para o uso desse mineral e se há iniciativas para reduzir o seu consumo ou aumentar sua reciclagem. Além disso, é fundamental considerar se a extração, produção e o uso desses minerais estratégicos e críticos são economicamente viáveis, contribuindo, assim, para tomadas de decisão alinhadas com os princípios da sustentabilidade e as metas de desenvolvimento sustentável para uma transição energética mais eficiente.

## 1.1 Agenda 2030 (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecem um plano de ação sobre aspectos sociais, econômicos e ambientais e abordam sobre a necessidade de ações que possam promover o desenvolvimento sustentável e o bem-estar para todos, protegendo o meio ambiente dos efeitos nocivos das mudanças climáticas. Esses 17 objetivos precisam ser cumpridos até 2030 (ONU, 2020), conforme Figura 1.

Figura 1: Objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: Agenda 2030, 2023.

Assim, é possível identificar os ODS's que estão alinhados com este artigo, o uso de uma matéria-prima secundária em insumo produtivo e pela possibilidade de representar uma alternativa à escassez de recursos de natureza finita e a consolidação da economia circular como ferramenta para a transição energética no Brasil pela inserção de um novo insumo energético (Figura 2).

Figura 2: Objetivos da pesquisa que estão alinhados com os ODS



Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023.

## 2. OBJETIVO

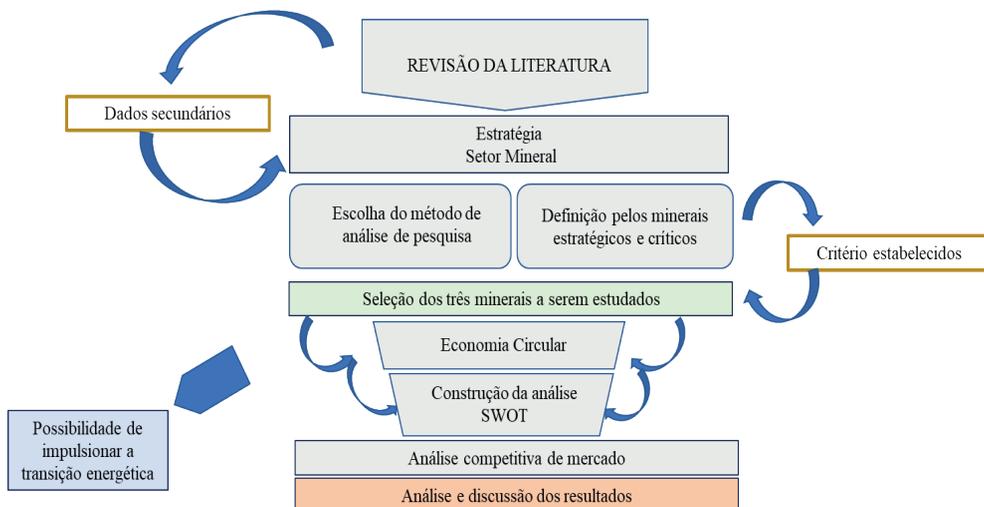
O seguinte trabalho tem como objetivo analisar de forma estratégica e competitiva o potencial de materiais secundários provenientes de REEE em novos modelos de mercado sustentáveis e verificar o papel da EC na reintrodução desses resíduos na cadeia produtiva a partir de minerais estratégicos e críticos economicamente importantes para a Transição Energética e para diversos outros setores econômicos mundiais.

## 3. METODOLOGIA

A abordagem metodológica englobou uma revisão da literatura sobre estratégia e mineração, seguida do levantamento dos dados que foram utilizados, posteriormente, nas análises realizadas neste trabalho, caracterizando-se como um estudo descritivo e analítico. Para tanto, foi realizado levantamento de artigos científicos sobre o tema da pesquisa, bem como relacionados à gestão de resíduos eletroeletrônicos, economia circular e transição energética. O estudo delimita-se a análise do cenário nacional e teve como objetivo avaliar o potencial de três minerais estratégicos e críticos como matéria-prima para a transição energética. Assim, os seguintes minérios escolhidos foram: **lítio, cobre e níquel**. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi estabelecida uma estrutura metodológica que está esquematizada na Figura 1.

As etapas das atividades adotadas nesta metodologia permitiram coletar os dados e propor um estudo que irá utilizar a análise SWOT com a finalidade de analisar os critérios que ajudam a definir a sustentabilidade no setor mineral para que a transição energética ocorra, em sua totalidade, de maneira mais consciente e responsável.

Figura 1 – Estrutura metodológica da pesquisa



Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

A primeira etapa se caracteriza por uma pesquisa descritiva e qualitativa. A metodologia empregada nesta etapa foi constituída da seguinte forma: (i) Levantamento sobre temas ligados aos aspectos acerca da pesquisa e como seria construída a pesquisa e (ii) Levantamento sobre temas ligados aos minerais estratégicos e críticos e sua utilização para a transição energética.

A segunda etapa se caracteriza pela definição dos critérios de seleção dos minerais estratégicos e críticos que seriam estudados. Esta etapa de análise consistiu em um estudo com uma abordagem mais estratégica sobre os três minérios priorizados pelo estudo. Para isto, buscou-se identificar dimensões estratégicas relevantes e apropriadas às particularidades desses minerais. Os três principais critérios que guiaram as priorizações foram: i) o tamanho atual do mercado e projeções de crescimento, ii) Proveniente de resíduos eletroeletrônicos e iii) as propriedades e aplicações desses minerais.

A terceira etapa foi estruturada da seguinte forma: (i) A importância dos minerais estratégicos e críticos provenientes dos resíduos eletroeletrônicos para a transição energética; (ii) Impactos positivos da valorização dos resíduos eletroeletrônicos; (iii) A economia circular como força impulsionadora da transição energética, envolvendo métodos e práticas sustentáveis.

Em seguida foi realizada uma análise de cada um desses três minerais. Foram feitas análises SWOT e de forças competitivas de mercado. A construção da análise competitiva se baseou em dados secundários sobre os três minerais estratégicos e críticos selecionados para o estudo.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise SWOT ressalta as oportunidades e ameaças dos minerais estratégicos e críticos selecionados para esta pesquisa, algumas das quais puderam ser observadas ao longo do estudo de análise estratégica e competitivas. Além disso, ela permite uma identificação inicial dos pontos fortes e fracos de cada mineral estudado.

Os elementos da análise SWOT estão apresentados abaixo.

### ANÁLISE SWOT DO MINERAL LÍTIO

# S

#### STRENGTHS:

- Crescente demanda por veículos elétricos;
- Uso em dispositivos eletrônicos;
- Disponibilidade Global.

# W

#### WEAKNESSES:

- Custos de produção e extração;
- Impactos Ambientais na extração e no processamento;
- Volatilidade no preço.

# O

#### OPPORTUNITIES:

- Aumento na demanda por veículos elétricos;
- Expansão da indústria de armazenamento;
- Desenvolvimento de tecnologias avançadas.

# T

#### THREATS:

- Concorrência com outros minerais;
- Regulamentações e políticas governamentais;
- Interrupções da cadeia de suprimentos.

### ANÁLISE SWOT DO MINERAL COBRE

# S

#### STRENGTHS:

- Alta condutividade elétrica e térmica;
- Versatilidade de uso;
- Reciclabilidade.

# W

#### WEAKNESSES:

- Sensibilidade a temperaturas elevadas;
- Tendência a oxidação;
- Vulnerabilidade a substitutos.

# O

#### OPPORTUNITIES:

- Crescimento da demanda por energia renovável;
- Expansão da infraestrutura;
- Avanços tecnológicos da indústria de eletrônicos.

# T

#### THREATS:

- Flutuação de preço;
- Substitutos e alternativas;
- Restrições ambientais e regulatórias.

## ANÁLISE SWOT DO MINERAL NÍQUEL

# S

### STRENGTHS:

- Abundância geográfica;
- Excelente propriedade magnética para uso em dispositivos eletrônicos;
- Alta resistência a corrosão.

# W

### WEAKNESSES:

- Dependência de um número limitado de países produtores;
- Impactos ambientais na extração e no processamento;
- Volatilidade no preço.

# O

### OPPORTUNITIES:

- Aumento na demanda por baterias de íon-lítio;
- Expansão da indústria de aço e veículos elétricos;
- Avanços nas tecnologias de energia renovável

# T

### THREATS:

- Substituição por materiais alternativos;
- Restrições ambientais e regulatórias.

## 5. CONCLUSÃO

A indústria mineral desempenha um papel de significativa relevância na Economia Circular (EC), uma vez que integra o setor primário da economia, fornecendo matéria-prima para outros setores. Nesse contexto, é importante observar que quanto menor for o teor de impurezas na matéria-prima comercializada, maior será a facilidade de reciclagem e reutilização dos produtos resultantes. No entanto, é necessário reconhecer que essa indústria muitas vezes está associada à exploração de terras para a extração de minerais e, à medida que a demanda por minerais estratégicos e críticos aumenta, o desmatamento ocorre de forma descontrolada para atender a essa demanda por insumos. Além disso, o grau de impureza desses recursos, embora relevante, não é o único fator determinante. Portanto, para garantir o abastecimento contínuo de materiais essenciais à economia global, é fundamental explorar alternativas para suprir essa demanda em constante crescimento. Nesse contexto, a Economia Circular emerge como uma solução viável para a gestão desses recursos que enfrentam o desafio de uma alta demanda em contraste com a escassez de recursos disponíveis.

Dessa forma, a reintrodução destes recursos no mercado produtivo torna-se uma perspectiva viável e a sustentabilidade emerge como uma consequência da circularidade desses materiais, garantida pela Economia Circular (EC). Essa reintrodução torna-se possível por meio da recuperação desses minerais a partir de REEE permitindo assim a agregação de valor a materiais que, de outra forma, seriam descartados. A inserção desses recursos na cadeia produtiva como matéria-prima para a Transição Energética tem suma importância para que o futuro seja mais sustentável e consciente com o meio ambiente

a partir de uma mudança de perspectiva da produção linear para a produção circular de recursos e resíduos.

No presente artigo, através da análise SWOT, é possível concluir que os minerais derivados de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) representam oportunidades significativas para enfrentar os desafios atuais que a sociedade enfrenta, incluindo questões relacionadas à disponibilidade, eficiência, capacidade de bateria e poluição, no contexto de novas tecnologias. Dessa forma, um caminho se delineia para um futuro mais consciente, abrindo portas para uma percepção de que a obtenção de recursos pode ocorrer de maneiras diversas e que materiais anteriormente destinados ao descarte podem, eventualmente, se transformar em insumos valiosos.

## REFERÊNCIAS

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

QUARTIM, E. **Recycling, upcycling e downcycling**. Disponível em <http://embalagensustentavel.com.br/2011/02/17/recycling-downcycling-upcycling/>. Acessado em julho de 2023.

SUNG, K. **A Review on Upcycling: Current Body of Literature, Knowledge Gaps and a Way Forward**. ICECESS 17<sup>a</sup> int. conf. Meio Ambiente. Culto. Econ. Soc. Sustentar, Academia Mundial de Ciência, Engenharia e Tecnologia (WASET) Veneza, 2015.

XAVIER, L. H. *et al.*, **Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining**. Resources Policy, 2019.

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